



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS EN QUEMADOR PATRÓN

POR

Johann Antonio Durán Faúndez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:
Dr. Oscar Farías F.
Profesor Co-Guía:
Dr. Hugo Garcés H.

Septiembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Johann Antonio Durán Faúndez

© 2024 Johann Antonio Durán Faúndez

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

Agradecimientos

Siempre me he considerado de pocas palabras, pero en esta instancia quiero dar agradecimiento a las personas que estuvieron en este proceso.

Dar gracias a mi familia quien con bastante esfuerzo y su constante apoyo han contribuido a mi formación tanto como persona y como profesional. A mis abuelos los cuales se alegrarán donde estén.

A mis amigos y compañeros, son tantos los buenos momentos y las frases de apoyo que hicieron esta etapa una las mejores de mi vida.

Agradecer a mis profesores guías Oscar Farías y Hugo Garcés, por la paciencia y la ayuda brindada para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El análisis de llamas generadas por combustibles gaseosos es una de las formas de establecer parámetros de operación ideales en varios procesos industriales, optimizando la fuente térmica y reduciendo los contaminantes asociados.

La presente memoria de título tiene como objetivo caracterizar las llamas de hidrocarburos producidas por un quemador patrón con enfoque en el análisis de la radiación espectral y la estabilidad de la llama utilizando equipos optoelectrónicos. También ser el punto inicial para producir ensayos de mezclas de gas natural con hidrógeno.

Para el desarrollo del objetivo se monta un set-up experimental donde se instala el quemador patrón Gülder, el espectrómetro USB2000 que mide en un rango espectral que va desde los 200 a 850 nm, el sensor de flujo de calor GG01-250, la cámara Basler acA2440-75uc y termocuplas tipo k.

A continuación, se procede realizar mediciones experimentales en una llama de gas natural en seis puntos de operación, variando el flujo de aire para analizar la estabilidad de la llama, la variación de temperatura y la presencia de los radicales libres CH , OH y C_2 en tres zonas de la llama.

Las mediciones espectrales fueron consistentes con la literatura, logrando una clara diferenciación entre el ruido ambiental y los puntos de operación. Las temperaturas registradas por las termocuplas mostraron una tendencia acorde a lo esperado, aunque los valores del sensor de flujo de calor no pudieron ser validados, lo que resalta la necesidad de desarrollar un método de validación más preciso. El análisis radiativo permitió relacionar la razón C_2/CH con la irradiancia y la temperatura, identificando el punto de operación 2 como el óptimo, aunque es necesario considerar más parámetros para obtener un control más completo de la combustión.

Las condiciones del laboratorio afectaron la determinación precisa de los límites de estabilidad de la llama debido a perturbaciones externas, aunque se observó una mayor estabilidad con un aumento en el exceso de aire. Este trabajo deja una guía metodológica para futuros ensayos de gas natural con hidrógeno, subrayando la importancia de seguir mejorando las técnicas de medición y control para optimizar la eficiencia de la combustión en estudios posteriores.

Palabras clave: Caracterización, llamas, equipos optoelectrónicos, espectral.

Abstract

The analysis of flames generated by gaseous fuels is one of the key methods for establishing ideal operating parameters in various industrial processes, optimizing thermal sources and reducing associated pollutants.

This thesis aims to characterize hydrocarbon flames produced by a standard burner, focusing on spectral radiation analysis and flame stability using optoelectronic equipment. It also serves as a starting point for future experiments with natural gas and hydrogen mixtures.

An experimental setup was developed, which included the Gülder standard burner, the USB2000 spectrometer measuring in the 200 to 850 nm spectral range, the GG01-250 heat flux sensor, the Basler acA2440-75uc camera, and type-K thermocouples.

Experimental measurements were conducted on a natural gas flame at six operational points, varying air flow to analyze flame stability, temperature variations, and the presence of free radicals CH , OH , and C_2 in three flame zones.

The spectral measurements were consistent with literature, successfully differentiating between ambient noise and operational points. Temperatures recorded by the thermocouples followed expected trends, although heat flux sensor values could not be validated, highlighting the need for a more precise validation method. The radiative analysis linked the C_2/CH ratio with irradiance and temperature, identifying operational point 2 as optimal, though additional parameters are necessary for more comprehensive combustion control.

Laboratory conditions affected the precise determination of flame stability limits due to external disturbances, but greater stability was observed with increased excess air. This work provides a methodological guide for future experiments with natural gas and hydrogen, emphasizing the importance of improving measurement and control techniques to optimize combustion efficiency in subsequent studies.

Keywords: Characterization, flames, optoelectronic equipment, spectral.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos.....	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Tabla de Contenidos.....	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	x
Nomenclatura	xi
CAPÍTULO 1: Introducción.....	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Hipótesis	5
CAPÍTULO 2: Marco teórico	6
2.1 Combustión.....	6
2.1.1 Fases de la reacción de combustión	6
2.1.2 Mezcla de combustibles y aire	6
2.1.3 Intercambiabilidad de gases	6
2.1.4 Formación de contaminantes	7
2.1.5 Teoría de la llama.....	7
2.1.5 Estabilidad de la llama	9
2.1.6 Quemadores Patrón.....	11
2.2 Espectroscopia de combustión y llama.....	12
2.2.1 Radiación térmica y quimioluminiscencia.....	12
2.2.2 Espectros de radicales	13
2.3 Equipos optoelectrónicos.....	14
2.3.1 Cámaras CCA	14
2.3.2 Sensor de calor	15
2.3.3 Espectrómetro	15
CAPÍTULO 3: Set-up experimental.....	17
3.1 Set-up experimental	17
CAPÍTULO 4: Metodología.....	18
4.1 Consideraciones previas al ensayo	18
4.1.1 Intercambiabilidad del gas combustible.....	18

4.1.2	Proceso de combustión, radio de equivalencia y porcentaje de exceso de aire	19
4.1.3	Calibración de los instrumentos de medición	20
4.1.4	Condiciones experimentales	20
4.2	Instalación de los equipos.....	21
4.2.1	Sensor de alto flujo GG01-250	21
4.2.2	Termocuplas tipo K.....	22
4.2.3	Espectrómetro USB2000+	22
4.2.4	Cámara Basler acA2440-75uc	22
4.3	Procesamiento de datos	22
4.3.1	Procesamiento de las imágenes de la llama	22
4.3.2	Procesamiento temperatura.....	23
4.3.3	Procesamiento de los datos del radiómetro.....	23
4.3.4	Procesamiento de los datos del espectrómetro.....	24
CAPÍTULO 5: Resultados		27
5.1	Imágenes de la altura de llama en los puntos de operación.....	27
5.2	Temperaturas en los puntos de operación y resultados estadísticos.....	27
5.3	Irradiancia medida en los puntos de operación y resultados estadísticos.....	29
5.4	Espectros de radiación en puntos de operación.....	31
CAPÍTULO 6: Discusión y propuesta de ensayo.....		34
6.1	Interpretación de resultados.....	34
6.1.1	Radicales	34
6.1.2	Temperaturas.....	36
6.1.3	Irradiancia	37
6.1.3	Razón <i>C2/CH</i>	38
6.2	Limitaciones	39
6.3	Propuesta de ensayo de mezclas de gas natural e hidrógeno.....	40
CAPÍTULO 7: Conclusiones y Trabajo futuro		41
7.1	Conclusiones.....	41
7.2	Trabajo futuro	42
Referencias		43
Anexo A: Código para compilar imagen promedio		47
Anexo B: Código para establecer la escala píxel/centímetro		48
Anexo C: Código para determinar la altura de la llama		49

Anexo D: Código para determinar estadísticas de las temperaturas	52
Anexo E: Código para determinar estadísticas de la irradiancia.....	55
Anexo F: Código para el análisis de los espectros	57
Anexo G: Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en los puntos de operación.	61
Anexo H: Histograma, curva de gauss y boxplot de irradiancia medida en los puntos de operación.	63
Anexo Y: Consideraciones para ensayo de mezcla de gas natural con hidrógeno	65

Lista de Figuras

Figura 1: Variación del índice de Wobbe en función del porcentaje de adición de hidrógeno [12]....	7
Figura 2: Esquema de clasificación de las llamas [15]	8
Figura 3: Principio de estabilización en un quemador [21]	10
Figura 4: Quemador Gülder (Fuente: Elaboración propia)	11
Figura 5: Vista de corte quemador Gülder [50]	12
Figura 6: Espectro de llama típico de hidrocarburos [9].....	14
Figura 7: Sensor de alto flujo de calor GG01-250 [42].....	15
Figura 8: Espectrómetro de fibra óptica en miniatura USB2000+ [45].	16
Figura 9: Diagrama del banco de ensayos de análisis de llama (Fuente: elaboración propia).....	17
Figura 10: Presiones de servicio [55].....	21
Figura 11: Conexión eléctrica GG01-250 [49]	21
Figura 12: Ruido ambiente y medición del punto de operación 1 a 10 mm (Fuente: elaboración propia)	25
Figura 13: Cotización del equipamiento de hidrógeno	26
Figura 14: Altura de la llama en los distintos puntos de operación (Fuente: elaboración propia).....	27
Figura 15: Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 1 (Fuente: elaboración propia)	28
Figura 16: Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 1 (Fuente: elaboración propia).....	30
Figura 17: Intensidad promedio en los puntos de operación a 10 mm (Fuente: elaboración propia)	31
Figura 18: Intensidad promedio en los puntos de operación a 18 mm (Fuente: elaboración propia)	32
Figura 19: Intensidad promedio en los puntos de operación a 30 mm (Fuente: elaboración propia)	33
Figura 20: Variación de la intensidad promedio de los radicales a 10 mm y 18 mm (Fuente: elaboración propia).....	34
Figura 21: Mediana de las temperaturas en los puntos de operación (Fuente: elaboración propia) ..	36
Figura 22: Mediana de la irradiancia en los puntos de operación (Fuente: elaboración propia)	37
Figura 23: Razón $C2/CH$ (Fuente: elaboración propia).....	38

Lista de Tablas

Tabla 1: Rangos de Reynolds y comportamientos de fluidos [20]	9
Tabla 2: Longitudes de onda de emisión de llama para radicales de combustión comunes [38].....	13
Tabla 3: Especificaciones técnica de la cámara a utilizar (Fuente: Elaboración propia)	14
Tabla 4: Poder calorífico superior, densidad relativa e índice de Wobbe (Fuente: elaboración propia)	19
Tabla 5: Razón de conversión de flujo (Fuente: elaboración propia)	20
Tabla 6: Condiciones experimentales (Fuente: elaboración propia).....	20
Tabla 7: Presión de los gases (Fuente: elaboración propia)	21
Tabla 8: Resultados estadísticos de la medición de la temperatura TCK1 con radio de equivalencia (Fuente: elaboración propia)	28
Tabla 9: Resultados estadísticos de la medición de la temperatura TCK2 con radio de equivalencia (Fuente: elaboración propia)	28
Tabla 10: Variación de intensidad promedio medida (Fuente: elaboración propia)	34
Tabla 11: Mediana de los datos medidos (Fuente: elaboración propia).....	36
Tabla 12: Razón C ₂ /CH en función del exceso de aire (Fuente: elaboración propia)	38

Nomenclatura

CH	:	Enlace carbono-hidrógeno
C_2	:	Carbono diatómico
NH_3	:	Amoniaco
H_2	:	Hidrógeno diatómico
UV	:	Ultravioleta
VIS	:	Visible
IR	:	Infrarrojo
CCA	:	Carga acoplada de dispositivos
CMOS	:	Complementary metal-oxide-semiconductor

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

“Sí, mis amigos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de lo que está formada, usados por separados o en forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz. El agua será el carbón del futuro” [1].

El contenido de esta cita publicada hace más de 40 años nos lleva a ver como una idea se ha ido desarrollando durante el tiempo para hacerla tangible. Desde varios siglos la humanidad ha utilizado materias primas para generar energía, donde los procesos involucrados han ido afectando el medio ambiente. Dada la fuerte necesidad de frenar la generación de gases de efecto invernadero se han potenciado formas de generar energía reduciendo las emisiones de estos gases.

El hidrógeno hasta ahora ha sido un insumo fundamental en la industria química. La diversificación de aplicaciones hará que el hidrógeno renovable sea un recurso importante en el futuro mercado energético mundial. Establecer una infraestructura y desarrollar métodos económicamente competitivos de producción de hidrógeno renovable, fortalecerá el papel de Chile en el mercado energético [2].

Debido a sus propiedades únicas, es decir, baja energía de ignición y amplio rango de inflamabilidad, el uso de hidrógeno puro presentaba varios inconvenientes desde el punto de vista de la seguridad. Por ejemplo, el autoencendido del hidrógeno liberado a alta presión es una cuestión crucial, así como la principal barrera para el despliegue del hidrógeno, especialmente en los dispositivos domésticos actuales [3].

Pese a su importancia en el papel de reducir el factor entre la energía producida por cantidad de gases emitidos, el hidrógeno presenta ciertas dificultades en su implementación generalizada dado a su composición química se requiere un alto costo en tecnología de almacenamiento. No obstante estudios recientes sobre la aplicación de mezclas de hidrógeno tanto a motores de combustión interna como a quemadores atmosféricos demostraron que los valores de CO y CO_2 producidos a partir de la quema de mezclas de gas natural enriquecido con hidrógeno son más bajos que los de cualquier otro combustible gaseoso. De este modo, las grandes instalaciones de almacenamiento, construidas para la distribución de combustibles fósiles, podrían combinarse con una producción distribuida de hidrógeno mediante su inyección directa en tuberías [3].

La reacción de combustión se revela como un factor de vital importancia en diversas instancias vinculadas a la generación de energía y procesos industriales de todo tipo [4]. La llama premezclada, ya sea en su configuración laminar o turbulenta, se encuentra invariablemente presente en los dispositivos de combustión industriales, desempeñando una función de considerable relevancia en la eficiencia operativa de dichos sistemas [5]. Por consecuencia al estar presente en varios procesos a nivel industrial, se han dedicado varios autores a la caracterización espectral de la llama.

En la investigación “Flame measurement and combustion diagnoses with spectrum analysis” [6], se destacó la importancia de implementar estrategias de control de combustión para mejorar la eficiencia y seguridad en diversos procesos industriales. En este estudio, el autor introdujo una innovadora técnica de espectroscopía para analizar los espectros de emisión obtenidos mediante un arreglo CCD con una respuesta espectral que abarcaba desde 200 hasta 1100 nm. El propósito de esta técnica era proporcionar un criterio sólido para el diagnóstico de la combustión. Durante el análisis de los espectros adquiridos, se observaron notables discontinuidades que se atribuyeron a la presencia de carbón, hollín y cenizas en la mezcla de combustión. Estas irregularidades en los espectros ofrecieron información valiosa sobre la composición y el proceso de combustión. Como resultado se llegó a la conclusión de que las líneas espectrales brindan una herramienta efectiva para el diagnóstico de la combustión. Además, se destacó que el espectro de emisión de la llama está estrechamente ligado al tipo de combustible utilizado y a la temperatura del sistema. Estos hallazgos subrayan la importancia de comprender la influencia de estos factores en los procesos de combustión y proporcionan una base sólida para el desarrollo de estrategias de control más efectivas y personalizadas.

En el artículo “Diagnóstico de la combustión de gas y petróleo mediante el análisis del espectro visible de la llama” [7], se basó en la búsqueda de una forma de optimizar la combustión en equipos industriales con indicadores espectrales. Para ello se implementó radiómetros, que operan dentro del rango visible y fotodiodos equipados con filtros cuya banda espectral se centra en longitudes de onda correspondientes a las emisiones de radicales CH y C_2 y emisiones de hollín. La información obtenida de los ensayos de la llama en ambiente confinado y no confinado, logro determinar un conjunto de indicadores espectrales a fin de correlacionar la señal óptica de la llama con los parámetros estudiados variando el exceso de aire. La conclusión obtenida fue que para las llamas de hidrocarburos se poseen emisiones específicas de radicales, C_2 y CH en ambos ambientes. Para las llamas de gas la razón entre C_2/CH es un buen indicador para el estado de la combustión permitiendo predecir el punto óptimo del exceso de aire y para llamas a petróleo se recomienda el control de la combustión en base a las emisiones de hollín.

Entre las alternativas similares en la búsqueda de combustibles libres de carbono en “Experimental studies on the OH^* chemiluminescence and structure characteristics in NH_3/H_2 and NH_3 /cracked gas swirl flames” [8], se llevó a cabo un estudio experimental sobre la quimioluminiscencia del radical OH^* y las características estructurales en llamas de remolinos de NH_3/H_2 y NH_3 /Gas craqueado. Se realizó una comparación de las distribuciones de las mezclas bajo diferentes niveles de adición y relaciones de equivalencia, donde el resultado de aumentar la relación de equivalencia generó que el pico de radiancia OH^* de la llama NH_3/H_2 sea mayor, formando una zona de circulación en el centro de la llama. Con el aumento de la concentración de H_2 , la intensidad de la quimioluminiscencia de OH^* aumenta rápidamente y el gradiente creciente se hace más pequeño gradualmente. Respecto a X_{NH_3} disminuyó de 80% a 60%, la radiación OH^* en $\Phi = 0,8$ y $0,9$ aumentó en 57,5% y 48,2%, respectivamente. El efecto de la relación de equivalencia es más fuerte que el efecto de dilución de NH_3 en una llama pobre en combustible en condiciones pobres, aunque los dos efectos son comparables en condiciones de equivalencia y ricas en combustible. En

comparación con la llama de NH_3/H_2 , el ancho de la llama de NH_3 /gas craqueado es más estrecho pero el valor máximo de OH^* es mayor, lo que indica que el efecto de estiramiento de la llama de NH_3 /gas craqueado es más fuerte. Frente a los resultados presentados nos podemos dar cuenta que el indicador de quimioluminiscencia de OH^* da una relación directa a los efectos de relación de equivalencia y adición de H_2 .

En el artículo “Hydrogen addition in methane-oxygen laminar inverse diffusion flames: A study focused on free radical chemiluminescence and soot formation” [9], se realizó un estudio centrado en la quimioluminiscencia de radicales libres y la formación de hollín, donde se adiciona hidrógeno en llamas de difusión inversa laminar de metano-oxígeno. Se realizaron mediciones experimentales y cálculos cinéticos de simulación para explorar la influencia de la quimioluminiscencia de los radicales libres $OH^*/CH^*/C_2^*/CO_2^*$ en el mecanismo de formación de hollín. La investigación determina la relación entre la quimioluminiscencia de los radicales libres y la formación de hollín. Los hallazgos revelan que, de manera similar a los resultados de la simulación, la fracción de volumen máxima de hollín (SVF) se reduce en aproximadamente un 60% cuando la hidrogenación aumenta al 40%, y la posición inicial de producción de hollín se mueve a la raíz de la llama. El análisis cinético mostró que la quimioluminiscencia de los radicales era suprimida en la región llena de hollín, y la adición de hidrógeno producía el mismo fenómeno, demostrando que las vías de generación del hollín y la quimioluminiscencia son opuestas.

Dada la época de cambio que se está viviendo en la búsqueda de un medio ambiente seguro para las futuras generaciones, el estudio sobre la reducción de emisiones de fuentes de energía convencionales utilizadas en la industria generan un cambio más gradual, pero menos agresivo con la estructura industrial existente. Este enfoque permite obtener resultados favorables y con modificaciones menos radicales.

1.2 Objetivos

Objetivo general: Caracterizar llamas gaseosas de hidrocarburos en quemador patrón desde el punto de vista de la radiación espectral y la estabilidad.

Objetivos específicos:

- 1) Realizar calibración y montaje de equipos para efectuar ensayos de llamas de gas natural.
- 2) Analizar las características radiativas para diferentes regímenes de operación.
- 3) Determinar los límites de estabilidad de llama en función a las condiciones operacional.
- 4) Proponer ensayo de mezclas de gas natural con hidrógeno basado en análisis optoelectrónico de llamas.

1.3 Hipótesis

La utilización de métodos optoelectrónicos para el análisis de llamas permite monitorear características de las llamas. Estos métodos facilitan la captura y análisis de señales ópticas emitidas por la llama, dando paso a determinar indicadores claves como la temperatura, radiación y espectros centrados en las emisiones de radicales OH , CH y C_2 . Con la información entregada por los indicadores se puede señalar la tendencia a la condición de operación óptima para el proceso de combustión.

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 [10].

2.1.1 Fases de 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 [10].

2.1.2 Mezcla de combustibles y aire

La mezcla de aire y combustible es un factor crítico en el proceso de combustión, ya que afecta directamente la eficiencia y la estabilidad de la llama. Una relación estequiométrica entre el aire y el combustible es esencial para lograr una combustión completa y eficiente, donde todo el combustible se quema con todo el oxígeno presente en el aire. Sin embargo, en la práctica, las mezclas ligeramente ricas o ligeramente pobres pueden ser preferidas dependiendo de las condiciones de operación y los requisitos específicos del proceso de combustión [11].

2.1.3 Intercambiabilidad de gases

La intercambiabilidad de gases combustibles es un tema importante en mezclas combustible, los parámetros de intercambiabilidad generalmente se definen para aspectos críticos del rendimiento del dispositivo que genera la combustión. Para ello se debe considerar el índice de Wobbe, índice que relaciona el PCS de un elemento con la raíz cuadrada de la densidad relativa del mismo. Se utiliza principalmente para evaluar la intercambiabilidad de combustibles.

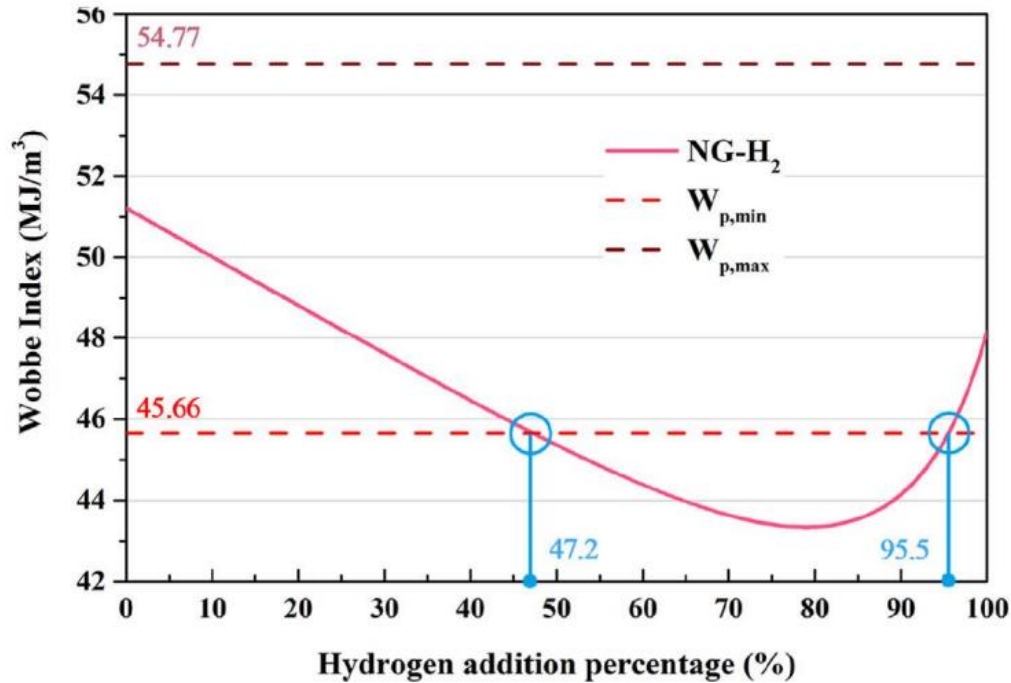


Figura 1: Variación del índice de Wobbe en función del porcentaje de adición de hidrógeno [12]

En la Figura 1 se presentan dos zonas en las que se puede considerar la implementación de adición de hidrógeno, estas son las zonas en las que la curva del índice de Wobbe de la mezcla está dentro de las curvas discontinuas [12].

2.1.4 Formación de contaminantes

Durante el proceso de combustión, se forman una variedad de contaminantes atmosféricos, incluyendo óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y partículas sólidas. Estos contaminantes son el resultado de reacciones químicas complejas que ocurren a altas temperaturas y presiones en la atmósfera de combustión. La formación de estos contaminantes puede ser influenciada por una serie de factores, como la composición del combustible, la relación aire-combustible, la temperatura de combustión y la presencia de catalizadores. La reducción de la emisión de contaminantes durante la combustión es un desafío importante en la protección del medio ambiente y la salud humana [13].

2.1.5 Teoría de la llama

La teoría de la llama es una rama fundamental en la ciencia de la combustión, que nos permite entender cómo ocurren las reacciones químicas y la liberación de energía en una llama [14].

Las llamas se pueden clasificar según su forma, color, propiedades radiativas, etc. Estas características están ligadas a factores químicos y físicos como: composición y mezcla del combustible, relación aire/combustible y la fuerza del flujo. En la Figura 2 se presenta un esquema de clasificación.

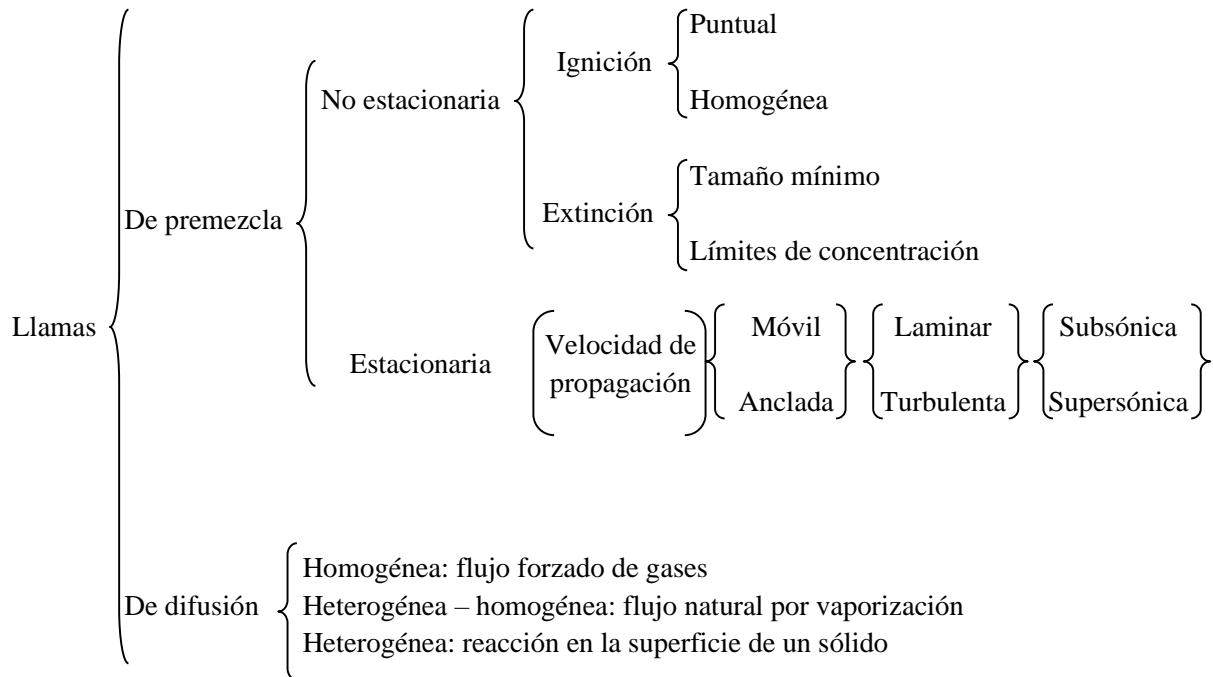


Figura 2: Esquema de clasificación de las llamas [15]

Las llamas de premezcla, donde el combustible y el oxidante se mezclan antes de la ignición, son caracterizadas por una combustión más uniforme y controlada. Este tipo de llama es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su capacidad para minimizar las emisiones y maximizar la eficiencia energética [16]

Las llamas de difusión se forman cuando el combustible y el oxidante se mezclan durante la combustión. A diferencia de las llamas de premezcla, donde la mezcla se produce antes de la ignición, en las llamas de difusión, la mezcla ocurre durante el proceso de combustión. Este tipo de llama tiende a ser menos estable y más propensa a la formación de productos de combustión incompletos, lo que puede resultar en emisiones más altas de contaminantes [17].

Las llamas laminares se caracterizan por tener una estructura ordenada y un flujo suave de gases en dirección axial. Por otro lado, las llamas turbulentas muestran un movimiento caótico y una mezcla turbulenta de los gases en la región de reacción [18].

Claude R. Reynolds propuso una clasificación empírica de llamas basada en el número de Reynolds, que es una medida de la relación entre los efectos inerciales y viscosos en un flujo. Según esta clasificación, las llamas pueden ser categorizadas como laminar, transitorias o turbulentas, dependiendo de los valores del número de Reynolds y otros parámetros específicos de la llama [19]. El número adimensional queda expresado por la ecuación (1).

$$Re = \frac{uL_c}{\nu} \quad (1)$$

Donde,

u es la velocidad de fluido en $\frac{m}{s}$

L_c es el largo característico que es responsable de formar la capa límite de la zona de transferencia de calor en m

ν es la viscosidad cinemática en $\frac{m^2}{s}$

El número de Reynolds indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. En la Tabla 1, podemos apreciar esta clasificación.

Tabla 1: Rangos de Reynolds y comportamientos de fluidos [20]

Reynolds	Características
0 – 0	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 – ∞	turbulento, débil dependencia del número de Reynolds

2.1.5 Estabilidad de la llama

La estabilidad de una llama depende principalmente de las condiciones cercanas al borde del quemador, especialmente de los efectos de extinción de las paredes del quemador.

El principio de estabilización se ilustra en la Figura 3. En la posición 1, la velocidad de deflagración S_u^o es menor que la velocidad del flujo por las pérdidas de calor y la destrucción de radicales, lo que hace que la onda de combustión se aleje, llegando a una posición 2, donde estas velocidades son iguales y logrando la estabilización. En la posición 3, la velocidad de deflagración es mayor a la velocidad del flujo ya que hay menos pérdidas de calor y destrucción de radicales, entonces, la onda de combustión vuelve nuevamente a la posición estable 2.

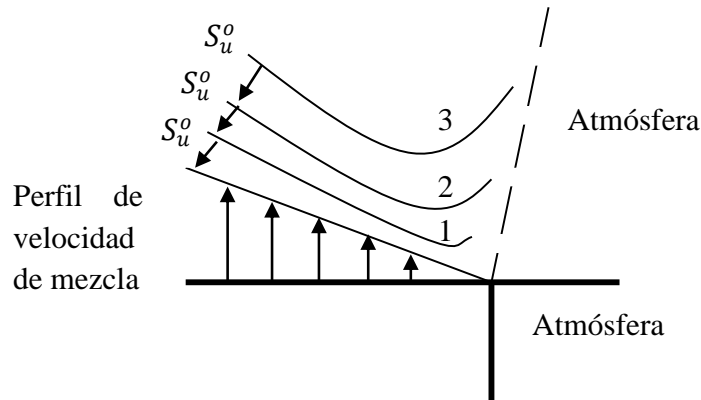


Figura 3: Principio de estabilización en un quemador [21]

Cuando el flujo se aumenta aún más, el frente de llama se aleja lo suficiente del borde del quemador para permitir la entrada de aire exterior diluyendo la mezcla, con lo que la velocidad de deflagración disminuye alcanzando el límite de desprendimiento de llama. De la misma manera, si se reduce la velocidad del flujo, se alcanzará un punto en el cual la velocidad de deflagración será mayor a la del flujo. De esta forma, la llama se propagará hacia dentro del quemador, alcanzando el límite de retrollama [21],[22]. Adicionalmente, las condiciones ambientales influyen en la velocidad de deflagración laminar [23]. Cuando el diámetro del tubo del quemador es lo suficientemente grande en relación a las distancias críticas de enfriamiento [24], el perfil de velocidad del flujo se puede asumir como lineal en la cercanía de la pared. Así, se puede escribir la ecuación (2) para la velocidad:

$$V_{mezcla} = gy \quad (2)$$

Donde,

y es la distancia desde la pared

g es una constante llamada gradiente de velocidad

Si el flujo de gas es reducido, g se reduce igualmente y la posición 2 de equilibrio de la Figura 3 se alcanza. Si se reduce más el flujo, se alcanza la condición descrita anteriormente en donde la velocidad de deflagración es mayor a la del flujo y se produce el fenómeno de retrollama y el valor crítico de g en el cual esta condición se obtiene se denomina gradiente crítico de retrollama o flashback y se denota g_F . Análogamente, cuando se tiene la condición de desprendimiento de llama, el valor crítico de g se denomina gradiente crítico de desprendimiento o blow-off y se denota g_B .

2.1.6 Quemadores Patrón

Los quemadores patrón son fuentes de luz de alta intensidad y espectro conocido utilizadas en la calibración precisa de instrumentos espectroscópicos. Estos quemadores emiten líneas espectrales bien definidas que sirven como estándares de referencia para la determinación de la respuesta del instrumento a diferentes longitudes de onda. Los quemadores patrón son fundamentales en la espectroscopia de emisión, ya que permiten la calibración y la validación de los espectrómetros, garantizando mediciones precisas y confiables en una variedad de aplicaciones científicas y tecnológicas.

A continuación, se presentan los quemadores a utilizar en esta memoria, en la Figura 4 se aprecia el quemador Gülder, sus características son:

- Diámetro interno de salida: 11 mm
- Diámetro interno de salida de aire: 89.5 mm
- Diámetro externo del quemador: 109.5 mm
- Largo del quemador: 350 mm
- Posee dos entradas, una para el ingreso de aire y el otro para el combustible.

No posee un sistema de autoignición, por lo que se requiere de una chispa externa para comenzar el proceso de combustión. Las condiciones de flujo estándar para el quemador son de 0.194 L/min estándar de etileno (20°C, 1 atm) y 284 L/min estándar de aire. La llama está diseñada para no estar confinada para mejorar la estabilidad de la llama. La altura de medición estándar está en la línea central del quemador, 42 mm por encima de la punta de la boquilla de combustible [25].



Figura 4: Quemador Gülder (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 5 se puede apreciar un esquema representativo del interior del quemador. El quemador contiene varias esferas hechas de materiales cerámicos o metálicos de alta resistencia, como el carburo de silicio o el acero inoxidable. Estas esferas tienen múltiples funciones críticas:

incrementan la superficie de contacto entre el aire y el combustible, mejoran la distribución uniforme del calor, estabilizan la llama, aumentan la turbulencia del flujo de aire y combustible, y actúan como filtros para partículas no deseadas. La incorporación de estas esferas facilita una mezcla homogénea, resultando en una combustión más completa y eficiente, lo que es esencial para aplicaciones industriales que requieren un control preciso de la temperatura y eficiencia energética [51, 52].

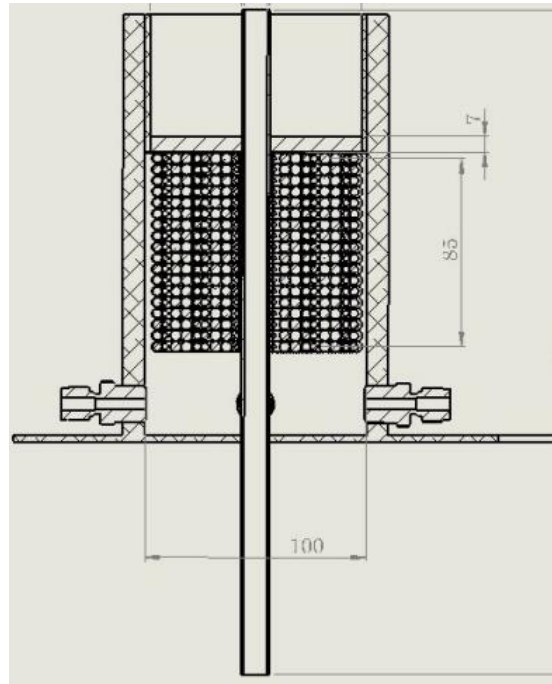


Figura 5: Vista de corte quemador Gülder [50]

2.2 Espectroscopia de combustión y llama

Mediante el análisis de la información entregada por los espectros se puede obtener una evaluación del proceso de combustión. La energía emitida por una llama se distribuye espectralmente en las regiones ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarroja (IR), y se ha clasificado en espectros continuos y discontinuos [27].

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 (pirometría de dos colores) [28]. 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 [29].

2.2.1 Radiación térmica y quimioluminiscencia

La radiación es un proceso fundamental en la transferencia de energía a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas. Puede manifestarse en diversas formas, desde la radiación electromagnética, como la luz visible, los rayos X y los rayos gamma, hasta la radiación corpuscular, que implica la emisión de partículas cargadas como electrones, protones y neutrones. Además, esta radiación puede ser clasificada como ionizante o no ionizante, dependiendo de su capacidad para liberar electrones de los átomos al interactuar con la materia [30].

La quimioluminiscencia es un fenómeno fascinante en el que la energía liberada durante una reacción química es emitida en forma de luz, ésta ocurre cuando los productos de una reacción química excitada por energía química emiten fotones de luz al volver a su estado fundamental [31].

La forma de cuantificar la radiación de un cuerpo negro fue planteada en 1899 por Planck donde 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 [32]. Luego la expresión para la intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro es la siguiente:

$$I_{b\lambda}(\lambda) = \frac{\frac{c_1}{c_2}}{\lambda^5 [e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1]} \quad (3)$$

Donde c_1 y c_2 son conocidas como constante de Planck, las cuales equivalen a:

$$c_1 = 8\pi hc^2 = 1,4997 \times 10^{-15} [\text{Wm}^2]$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,438 \times 10^{-2} [mK]$$

2.2.2 Espectros de radicales

Los espectros de radicales en la combustión son fundamentales para comprender los complejos procesos químicos y físicos que ocurren durante la reacción de combustión. Los radicales libres, como el radical hidroxilo (OH^*) es una especie altamente reactivas que desempeñan un papel crucial en la iniciación, propagación y extinción de la llama. La espectroscopía de absorción óptica, la espectroscopía de emisión y la espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica (ESR) son técnicas comúnmente utilizadas para investigar la presencia, concentración y comportamiento de estos radicales en diferentes condiciones de combustión, como presión, temperatura y composición de la mezcla de combustible. Las longitudes de ondas características de los radicales de combustión se pueden ver en la Tabla 2 y en la Figura 6 se muestra un espectro de llama de hidrocarburo típico.

Tabla 2: Longitudes de onda de emisión de llama para radicales de combustión comunes [38]

Especies	Longitud de onda (nm)
OH^*	306-315
NH^*	336
CN^*	359-386
CH^*	390,432
C_2^*	469-473, 510-516
CH_2O^*	395,423
CO_2^*	Banda ancha

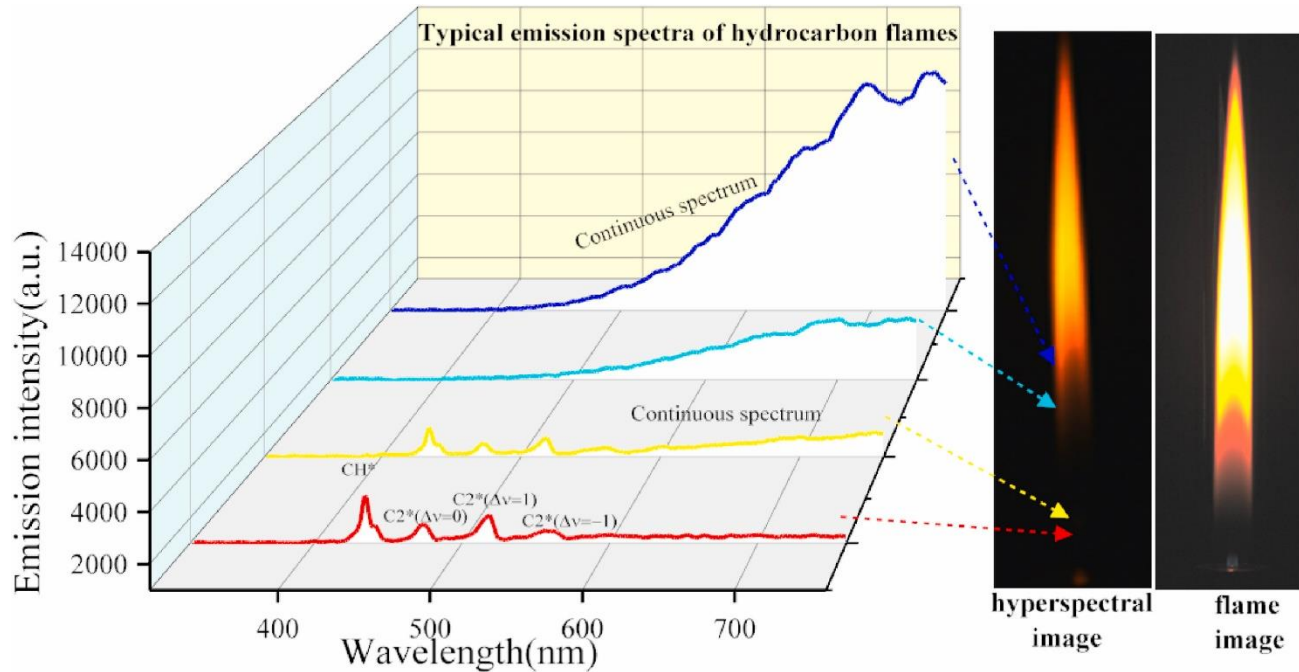


Figura 6: Espectro de llama típico de hidrocarburos [9]

2.3 Equipos optoelectrónicos

2.3.1 Cámaras CCA

Las cámaras CCA, o Carga Acoplada de Dispositivos, son dispositivos electrónicos que se utilizan para la captura y recuperación de información espectral en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas.

Constan de una matriz de píxeles fotosensibles que convierten la energía luminosa en señales electrónicas, las cuales pueden ser procesadas y analizadas para obtener información sobre la distribución espectral de una señal luminosa. Estas cámaras son especialmente útiles en aplicaciones de espectroscopia, donde se requiere la captura y el análisis preciso de la intensidad luminosa en diferentes longitudes de onda. Además, las cámaras CCA ofrecen una alta sensibilidad y resolución espacial, lo que las convierte en herramientas indispensables en campos como la astronomía, la bioquímica y la investigación de materiales [39].

Las especificaciones técnicas de la cámara a utilizar se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones técnica de la cámara a utilizar (Fuente: Elaboración propia)

Marca	Modelo	Resolución (H x V)	Sensor	Tamaño del sensor	Tecnología del sensor	Tamaño píxel [μm^2]	Frecuencia de imagen [fps]	Potencia de Consumo [W]	Peso (g)
Basler	acA2440-75uc	2448x2048	Sony IMX250	2/3"	CMOS	3,45x3,45	75	3,4	80

2.3.2 Sensor de calor

Los sensores de calor, que detectan la radiación infrarroja, son esenciales en la investigación de llamas, permitiendo el análisis detallado y en tiempo real de la temperatura y la composición de la combustión. Estos sensores se utilizan para monitorizar llamas en diversos entornos industriales, optimizando procesos de combustión en calderas y hornos, y garantizando la seguridad mediante la detección temprana de incendios. Además, facilitan estudios avanzados sobre la dinámica de la llama y la formación de contaminantes, contribuyendo al desarrollo de tecnologías de energía más limpia y eficiente [40,41].

El sensor utilizado es el modelo GG01-250 el que representa en la Figura 7, este permite la medición del flujo de calor en el rango de $(250 \text{ a } 1000) \times 10^3 \frac{W}{m^2}$. Equipados con un absorbente negro, los sensores de flujo de calor de este tipo están diseñados para medir en un entorno en el que el flujo de calor está dominado por la radiación. El sensor de calibre GG01 Gardon, basado en materiales termopares, genera un voltaje de salida proporcional a la irradiancia entrante. Un termopar tipo K mide la temperatura corporal. Se puede conectar directamente a sistemas de registro de datos de uso común. El flujo de calor, φ , en $\frac{W}{m^2}$, se calcula dividiendo la salida del GG01, un pequeño voltaje U, por la sensibilidad S. Cuenta con una ventana de zafiro la que permite al usuario medir sólo el componente radiativo del flujo de calor [42].

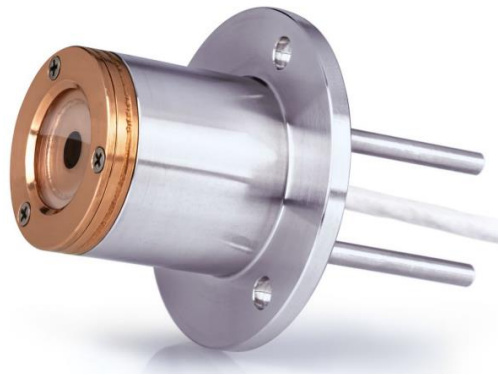


Figura 7: Sensor de alto flujo de calor GG01-250 [42]

2.3.3 Espectrómetro

Los espectrómetros son instrumentos críticos en el análisis espectral, utilizados para descomponer la luz en sus componentes espectrales y analizar su distribución en función de la longitud de onda o frecuencia. Estos dispositivos funcionan mediante la dispersión de la luz a través de prismas o rejillas de difracción, lo que permite la identificación precisa de las distintas longitudes de onda presentes en una muestra [43].

El espectrómetro se compone principalmente de una fuente de luz, un dispersor y un detector. La fuente de luz produce un haz que es dispersado en sus componentes espectrales por el dispersor, el cual puede ser un prisma o una rejilla de difracción. El detector capta esta luz dispersada y mide su intensidad en función de la longitud de onda, proporcionando una representación detallada del espectro de la muestra. Esta capacidad de análisis espectral detallado permite la detección de

diferencias mínimas en la composición de la luz, lo que es crucial para el análisis químico cualitativo y cuantitativo [44].

En la investigación científica, los espectrómetros son herramientas indispensables debido a su alta resolución y capacidad para abarcar un amplio rango de longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Esto permite a los investigadores estudiar con precisión las propiedades ópticas de los materiales, identificar compuestos químicos y analizar la radiación emitida por cuerpos celestes. La versatilidad y precisión de los espectrómetros los hacen esenciales en el avance del conocimiento en múltiples áreas científicas, contribuyendo significativamente a la comprensión y el desarrollo de nuevas tecnologías [43,44].

El espectrómetro utilizado es de fibra óptica en miniatura USB2000+ de la marca Ocean Optics, responde entre 200 y 850 nm, pero el rango y la resolución específicos dependen de las opciones de rejilla y hendidura de entrada [45]. En la Figura 8 se ilustra el espectrómetro.



Figura 8: Espectrómetro de fibra óptica en miniatura USB2000+ [45].

CAPÍTULO 3: Set-up experimental

3.1 Set-up experimental

El montaje experimental se llevó a cabo en el laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción. La configuración consiste en un banco de ensayos para mezclas de gases combustibles, el cual está equipado con un quemador patrón tipo Gülder y diversos dispositivos optoelectrónicos. La distribución detallada del banco de ensayos y el nombre de los dispositivos se muestra en la Figura 9.

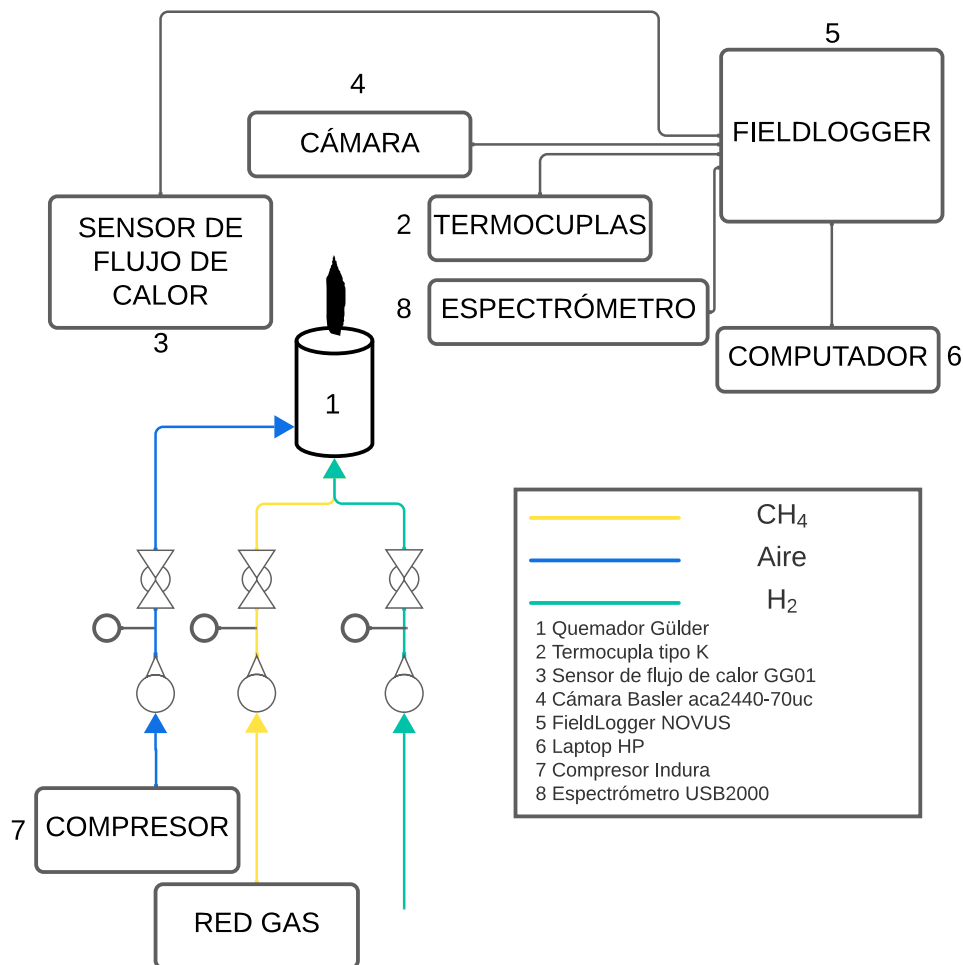


Figura 9: Diagrama del banco de ensayos de análisis de llama (Fuente: elaboración propia)

CAPÍTULO 4: Metodología

4.1 Consideraciones previas al ensayo

Dado a que se trabajará con el quemador Gülder, el cual está diseñado para trabajar con etileno se hará una caracterización del quemador con pruebas con gas natural, con el fin de definir los límites de estabilidad de la llama en función de la relación aire/combustible. Para ello se observa visualmente el comportamiento de la llama.

Una vez determinados se procederá a definir 6 puntos de operación y se monitorearan parámetros clave como la altura, la temperatura, la radiación emitida y los espectros de los radicales. Con el fin de encontrar correlaciones entre los parámetros y el comportamiento de la razón $\frac{C_2}{CH}$ de los radicales en función del exceso de aire.

4.1.1 Intercambiabilidad del gas combustible

El quemador Gülder está diseñado para el uso de etileno, por tanto, se empezó por un análisis de intercambiabilidad con el gas natural. Se puede considerar que dos gases son intercambiables si las características de la llama son satisfactorias después de la sustitución de un gas por otro.

Para que un gas sustituto sea intercambiable con el gas base, debe ocurrir que los límites de llama del gas base, en términos de la tasa de entrada de gas y la aireación primaria, estén incluidos dentro de los límites de llama del gas sustituto.

Se considera que dos gases son intercambiables si sus índices de Wobbe están dentro de un rango del 5-10% entre sí. Este criterio asegura que la entrega de energía por unidad de volumen será similar para ambos gases, minimizando el riesgo de mal funcionamiento del equipo o problemas de seguridad [46].

Para el análisis de intercambiabilidad nos basaremos en los métodos de índices simples, específicamente en el índice de Wobbe, utilizando la ecuación (3).

$$IW = \frac{PCS}{\sqrt{Gr}} \quad (3)$$

Donde,

IW índice de Wobbe

PCS poder calorífico superior

Gr densidad relativa

En la Tabla 4 se presenta el gas natural y el etileno, junto con el poder calorífico superior y la densidad relativa [47], y el índice de Wobbe.

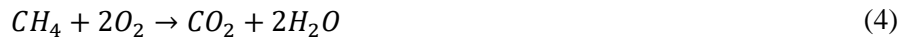
Tabla 4: Poder calorífico superior, densidad relativa e índice de Wobbe (Fuente: elaboración propia)

	$PCS \frac{kJ}{kg}$	Gr	$IW \frac{kJ}{kg}$
Gas natural	42000	0.65	52095
Etileno	60400	0.97	61326

Dado a que la diferencia entre los índices de Wobbe de los dos gases combustibles, se puede decir que no son fácilmente intercambiables. Por tanto, que se deben tomar consideraciones en las condiciones operativas del equipo.

4.1.2 Proceso de combustión, radio de equivalencia y porcentaje de exceso de aire

A continuación, se detalla en la ecuación (4) el proceso de combustión completa del metano componente principal del gas natural.



Esta ecuación indica que 1 mol de metano requiere 2 moles de oxígeno para producir 1 mol de dióxido de carbono (CO_2) y 2 moles de agua (H_2O).

El aire atmosférico contiene aproximadamente un 21% de oxígeno en volumen, lo que significa que para cada volumen de oxígeno, necesitamos aproximadamente 4.76 volúmenes de aire.

Dado que se requieren 2 moles de oxígeno para la combustión de 1 mol de metano, la cantidad total de aire necesario es aproximadamente 9.52 volúmenes de aire por cada volumen de gas natural (principalmente metano) para lograr una combustión completa y estequiométrica [48].

El radio de equivalencia en volumen se calcula mediante la ecuación (5), si $\phi < 1$ la mezcla es pobre en combustible y $\phi > 1$ la mezcla es rica en combustible.

$$\phi = \frac{\frac{V_{aire}}{V_{comb_{est}}}}{\frac{V_{aire}}{V_{comb}}} \quad (5)$$

El porcentaje de exceso de aire se calcula utilizando la ecuación (6).

$$\lambda = \frac{1 - \phi}{\phi} \times 100 \quad (6)$$

4.1.3 Calibración de los instrumentos de medición

Dado que los instrumentos de medición y regulación de flujo están diseñados para aire, se procederá a calibrar la relación entre el gas original y el gas medido en el caudalímetro rotámetro y el medidor de flujo. Para ello se utiliza la ecuación (7).

$$\dot{V}_{GN} = \dot{V}_{GO} \sqrt{\frac{R_{GN}}{R_{GO}}} \quad (7)$$

Donde,

\dot{V}_{GN} caudal de gas natural $\frac{L}{min}$

\dot{V}_{GO} caudal de gas original $\frac{L}{min}$

$R_{GN,GO}$ constante de gases para gas natural y gas original $\frac{J}{kg*K}$

Obteniendo así la razón de conversión para el gas natural, la cual se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5: Razón de conversión de flujo (Fuente: elaboración propia)

	Gas Natural	R_{GN}	R_{GO}
Razón de conversión para flujo medido por rotámetro de aire	1.33	506.26	287.042

4.1.4 Condiciones experimentales

Teniendo en consideración los cálculos anteriores se precede a generar las condiciones de llama que quedan descritas en la Tabla 6.

Tabla 6: Condiciones experimentales (Fuente: elaboración propia)

Condiciones	Gas Natural (L/min) con razón de conversión	Aire (L/min)	RAC real	Radio de equivalencia ϕ	Exceso de aire λ (%)
1	0.466	6	12.88	0.74	35
2	0.466	10	21.46	0.44	126
3	0.466	14	30.04	0.32	212
4	0.466	18	38.63	0.25	300
5	0.466	22	47.21	0.2	400
6	0.466	26	55.79	0.17	488

La presión medida del gas natural de la red de gas y del aire comprimido por el compresor se pueden ver en la Tabla 7.

Tabla 7: Presión de los gases (Fuente: elaboración propia)

GN (kPa)	Aire(kPa)
2.07	200

Se puede ver la presión del gas natural de la red concuerda con el decreto N°67 donde se establece la presión de servicio del gas natural, ver en la Figura 10.

PRESIONES DE SERVICIO			
GAS DE CIUDAD	Presión Nominal:	1,8 kPa	(180 mm H ₂ O)
	Presión Mínima :	1,4 kPa	(140 mm H ₂ O)
	Presión Máxima:	2,2 kPa	(220 mm H ₂ O)
PROPANO, BUTANO O MEZCLA DE ÉSTOS EN FASE GASEOSA	Presión Nominal:	2,7 kPa	(270 mm H ₂ O)
	Presión Mínima :	2,2 kPa	(220 mm H ₂ O)
	Presión Máxima:	3,3 kPa	(330 mm H ₂ O)
GAS NATURAL	Presión Nominal:	1,8 kPa	(180 mm H ₂ O)
	Presión Mínima :	1,5 kPa	(150 mm H ₂ O)
	Presión Máxima:	2,2 kPa	(220 mm H ₂ O)
MEZCLA DE AIRE-PROPANO	Presión Nominal:	1,8 kPa	(180 mm H ₂ O)
	Presión Mínima :	1,4 kPa	(140 mm H ₂ O)
	Presión Máxima:	2,2 kPa	(220 mm H ₂ O)
MEZCLA DE AIRE-GAS NATURAL	Presión Nominal:	1,9 kPa	(190 mm H ₂ O)
	Presión Mínima :	1,0 kPa	(100 mm H ₂ O)
	Presión Máxima:	2,8 kPa	(280 mm H ₂ O)

Figura 10: Presiones de servicio [55]

4.2 Instalación de los equipos

En esta sección se explica cómo se tomaron las mediciones y la descripción de la experiencia.

4.2.1 Sensor de alto flujo GG01-250

Las mediciones realizadas con el sensor de alto flujo GG01-250 con ventana de zafiro y un ángulo de lectura de 150°.

Para la instalación del sensor se procede a:

1. Posicionar el sensor en un soporte a 15 cm de la llama.
2. Conectar el sensor al Fieldlogger siguiendo las indicaciones de la Figura 11, considerando que el sensor tiene que ir conectado a dos canales del Fieldlogger NOVUS uno para la termocupla K del cuerpo del sensor y otra para el sensor de flujo.

WIRE	MEASUREMENT SYSTEM	
Red	signal [+]	voltage input [+]
Black	signal [-]	voltage input [-]
Green	thermocouple [+]	thermocouple input [+]
White	thermocouple [-]	thermocouple input [-]
Grey	shield	ground

Figura 11: Conexión eléctrica GG01-250 [49]

4.2.2 Termocuplas tipo K

La medición de la temperatura de la llama fue realizada mediante termocuplas tipo K. Para la instalación de las termocuplas se procede a:

1. Ubicar las termocuplas de forma axial desde la boquilla del quemador a las alturas de 35 mm y 17 mm.
2. Conectar las termocuplas al Fieldlogger, una en cada canal cable rojo (-) y cable positivo negro (+).

Se proceden a tomar mediciones durante 30 segundos después de haber esperado una estabilización de la llama en su punto de operación.

4.2.3 Espectrómetro USB2000+

Las mediciones son realizadas por el espectrómetro USB2000 conectado a una fibra óptica QP400-2-UV-VIS los cuales permiten obtener el espectro en el rango de los 200 a 850 nm.

Para preparar el equipo para tomar las mediciones se procedió a:

1. Ajustar el lente colimador a la fibra óptica y se fija a un soporte quedando el lente a 7 cm del centro de la llama.
2. Conectar la fibra óptica al espectrómetro USB2000, luego se conecta el USB2000 a la laptop mediante la conexión USB.
3. Configurar los parámetros de adquisición en el software Ocean Optics SpectraSuite.

Las mediciones fueron tomadas con un tiempo de integración de 100 ms en tres puntos de la llama haciendo un barrido axial de la llama desde la boquilla del quemador a la altura de 10 mm, 18 mm y 30 mm. Las señales adquiridas fueron entre 16 y 17 por cada punto de operación.

4.2.4 Cámara Basler acA2440-75uc

Las imágenes fueron tomadas con la cámara Basler acA2440-75uc que captura imágenes con una resolución espacial de 2448x2048 pixeles y 75 fps.

Para preparar el equipo se procede a:

1. Ajustar la cámara al soporte y ubicarla a una distancia que capture la altura de la llama.
2. Conectar la cámara mediante el cable USB-MICRO B al laptop.
3. Ajustar el obturador y el enfoque de la llama cuidando que los pixeles no se saturen.
4. Configurar los parámetros de software Pylon Viewer.

Para la configuración en el software Pylon Viewer se seleccionó un recording buffer size de 50, record a frame every de 30 y stop recording after de 2 segundos. Con esta configuración se obtuvieron 60 imágenes por punto de operación.

4.3 Procesamiento de datos

4.3.1 Procesamiento de las imágenes de la llama

Para determinar la altura de la llama se procedió generar un código en MATLAB donde se inicializa un acumulador de imágenes con dimensiones y tipo de datos adecuados para evitar el desbordamiento. Luego, se leen las imágenes en un bucle, se convierten a formato double para mantener la precisión y se suman al acumulador. Una vez sumadas todas las imágenes, se calcula la

imagen promedio dividiendo el acumulador por el número total de imágenes, lo que reduce el ruido al promediar los valores de los píxeles. Esto permite obtener una imagen más precisa y clara de la llama observada, al reducir las variaciones aleatorias y destacar las características constantes de la imagen. Este código se puede ver en el [Anexo A](#).

Luego se crea un código donde se carga una imagen de la llama con una regla de referencia, y se visualiza en pantalla para permitir la selección de dos puntos a lo largo de la regla, cuyos valores en píxeles son utilizados para calcular la escala en centímetros por píxel. Después, se solicita ingresar la longitud real de la referencia en centímetros para establecer dicha escala. Ver en el [Anexo B](#).

Finalmente se crea un código que mide la altura de la llama de la imagen procesada, asegurando que el ruido y las interferencias se minimicen. Primero, se carga la imagen y se convierte a escala de grises para facilitar el procesamiento. Luego, se aplica un filtro Gaussiano para suavizar la imagen y reducir el ruido, seguido de un ajuste de contraste para mejorar la visibilidad de los detalles. La imagen ajustada se convierte en una imagen binaria mediante umbralización, destacando las áreas relevantes de la llama. Posteriormente, se aplican operaciones morfológicas para refinar la imagen binaria, eliminando pequeños componentes no deseados. También se agrega seleccionar manualmente zonas de ruido para eliminarlas de la imagen, refinando aún más la representación de la llama. La altura de la llama se mide en píxeles y se convierte a milímetros utilizando la referencia de la escala conocida. Finalmente, se visualiza la altura de la llama y se dibuja una escala graduada sobre la imagen original para representar la altura medida, facilitando la interpretación visual y cuantitativa de los resultados. Este procedimiento asegura una medición precisa y clara de la altura de la llama en el contexto de un análisis optoelectrónico avanzado. Ver en [Anexo C](#).

4.3.2 Procesamiento temperatura

El procesamiento de las temperaturas fue mediante un código generado en MATLAB que extrae los datos de las columnas de un archivo Excel y calcula estadísticas descriptivas clave, como la media, la desviación estándar, la mediana y los cuartiles. Luego, se generan gráficos que incluyen histogramas con superposición de la curva de Gauss y diagramas de caja (boxplots) para visualizar la distribución y dispersión de los datos. Este procedimiento es fundamental para analizar datos experimentales de manera sistemática y obtener una visión integral de la distribución de los valores. Ver en [Anexo D](#).

4.3.3 Procesamiento de los datos del radiómetro

Las lecturas del radiómetro son interpretadas en voltaje en el fieldlogger NOVUS. Mediante la ecuación (8) y con la sensibilidad del sensor se determina la irradiancia.

$$\varphi = \frac{U}{S} + \sigma(T + 273.15)^4 \quad (5)$$

Donde,

φ irradiancia $\frac{W}{m^2}$

U voltaje medido V

S sensibilidad $24 \times 10^{-9} \frac{V}{W}$
 $\frac{W}{m^2}$

σ constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^2}$

T temperatura sensor °C [49]

Para el procesamiento de estas lecturas son similar al de las temperaturas donde se genera un código en Matlab para calcular estadísticas descriptivas como media, mediana, desviación estándar y cuartiles. Los resultados se presentan visualmente a través de un histograma con curva de ajuste Gaussiano y un diagrama de caja (boxplot), proporcionando una comprensión detallada de la distribución y variabilidad de los datos. Ver en [Anexo E](#).

4.3.4 Procesamiento de los datos del espectrómetro

El procesamiento de los datos del espectrómetro es mediante un código generado en MATLAB que se enfoca en analizar y visualizar la variación de la intensidad de la luz a través de diferentes longitudes de onda para varios radicales en un formato tridimensional. El código comienza definiendo el número de puntos de operación y los rangos de longitud de onda específicos para los radicales de interés como CH , OH y C_2 . Posteriormente, se carga y procesa los datos de ruido ambiental para obtener un fondo limpio, lo cual es crucial para la precisión del análisis. Utilizando los datos de señal para cada punto de operación, se limpian las intensidades y se suavizan para mejorar la visualización. Finalmente, estos datos se plotean en un gráfico 3D, lo que facilita la comparación visual entre ellos.

Luego, se procede a desarrollar un código que calcula la intensidad promedio de cada radical en cada punto de operación. Para ello, se establecen los rangos de longitud de onda para cada radical (CH : 430-435 nm, OH : 305-315 nm, C_2 : 510-520 nm). Inicialmente, se crea una estructura de datos para almacenar los resultados compilados y los promedios de intensidad de cada radical.

Los datos de ruido ambiental se cargan desde archivos de textos y se calcula el promedio de ruido para cada longitud de onda. Para cada punto de operación, se seleccionan y procesan los archivos de señal medidos. Las intensidades medidas se limpian restando el ruido ambiental interpolado y se suavizan utilizando un promedio. Posteriormente, se calcula la intensidad promedio para cada radical y cada punto de operación dentro del rango de longitud de onda definido.

Los resultados se visualizan en un gráfico de líneas, donde cada línea representa un radical diferente, ofreciendo una comparación clara de las variaciones de intensidad a través de los puntos de operación. Esta representación gráfica facilita la comprensión de cómo las diferentes condiciones operativas afectan la emisión de los radicales CH , OH y C_2 . Ver en [Anexo F](#).

En la Figura 12 se puede ver el ruido ambiente del laboratorio y establecer una comparación con el punto de operación 1 a 10 mm. El ruido es generado por las condiciones de iluminación del laboratorio el cual será filtrado de las demás mediciones, cabe señalar que las mediciones fueron captadas en un ambiente de oscuridad.

El ruido captado es estable entre los 140 a 150 counts en todo el rango de longitud de onda, facilitando la diferenciación entre la medición del punto de operación. Esto sugiere que la medición no es afectada por el ruido ambiental captado por el espectrómetro.

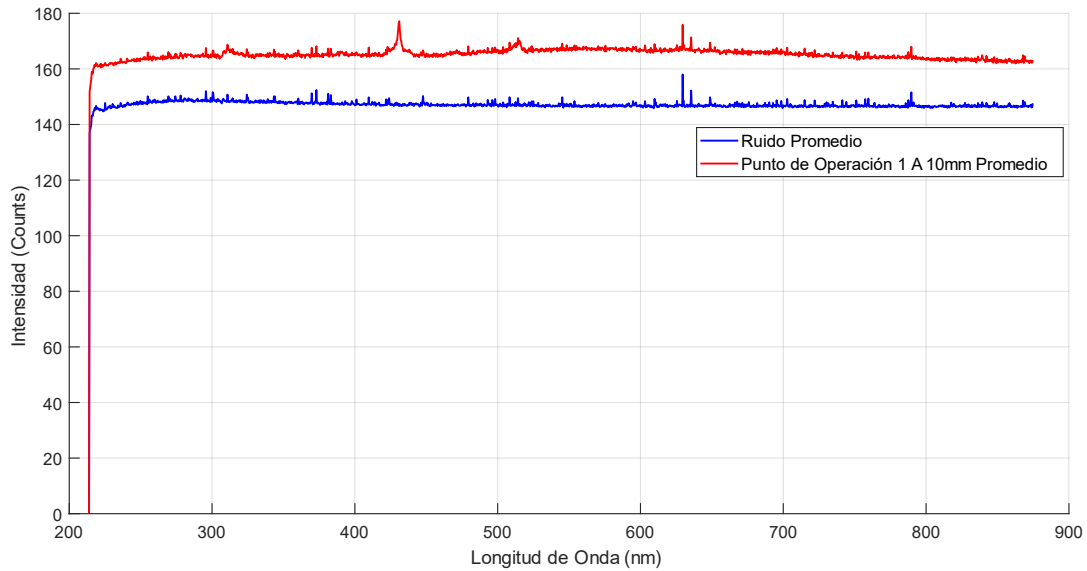


Figura 12: Ruido ambiente y medición del punto de operación 1 a 10 mm (Fuente: elaboración propia)

4.4 Propuesta de ensayo de mezclas de gas natural e hidrógeno

Esta propuesta será basada en el ensayo de gas natural con sugerencias para implementar un ensayo con gas natural con adición de hidrógeno.

En la Figura 13 se presenta la cotización de materiales para la conexión de hidrógeno. Esta fue solicitada a la empresa INDIGAS.

Ítem		Descripción	Unidad	Precio Unitario	Cantidad	Total
1		Central Manual Simple (Regulador)	Gl	695,500	1	695,500
		Puesto de Consumo de baja 0 a 3 Bar	Gl	471,900	1	471,900
		Arresta llama para Hidrogeno	Gl	65,002	1	65,002
		Coil Tubing 1/8" OD x 1/4" NPT	Gl	71,500	1	71,500
		Conector Recto 1/8" x 1/4"NPT	Gl	10,400	1	10,400
		Cilindro de Hidrogeno (H2) 7m7	Gl	387,400	1	387,400
				Subtotal Materiales		\$1,701,702
Ítem		Descripción	Unidad	Precio Unitario	Cantidad	Total
1		Traslado Especial Cilindro H2 Santiago - Concepcion	Gl	\$454,000	1	\$ 454,000
				Total		\$454,000
				total Proyecto NETO		\$2,155,702
Formas de Pago:						
1.- Al Contado.						
2.- Orden de compra: 50% Anticipo - 50% Final una vez entregado los equipos.						
3.- Todos los Valores son Netos + IVA.						

Figura 13: Cotización del equipamiento de hidrógeno

CAPÍTULO 5: Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mediciones.

5.1 Imágenes de la altura de llama en los puntos de operación

En la Figura 14 se presentan las alturas de la llama de cada punto de operación, las cuales se identifican con letras. La letra A corresponde al punto de operación 1, y así sucesivamente para los demás puntos de operación.

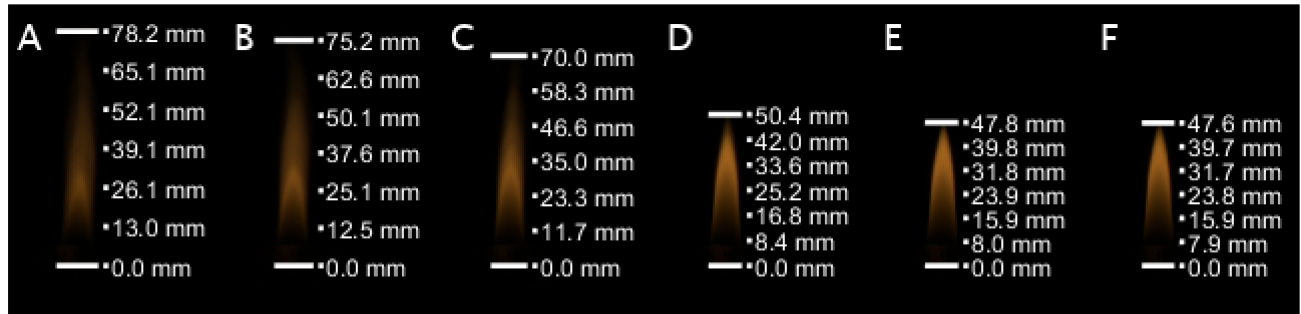


Figura 14: Altura de la llama en los distintos puntos de operación (Fuente: elaboración propia)

Se puede visualizar que a medida que se aumenta el exceso de aire la altura de la llama disminuye notablemente, igual que el brillo de la llama se ve más concentrada en los puntos de operación con más exceso de aire.

5.2 Temperaturas en los puntos de operación y resultados estadísticos

Las Figura 15 se muestran los histogramas, las curvas de Gauss y los boxplots de las mediciones de los parámetros definidos TCK1 y TCK2, tomados durante el período de estudio para el punto de operación 1. Los gráficos correspondientes a los demás puntos de operación se pueden ver en el [Anexo G](#).

TCK1 y TCK2 representan las temperaturas medidas por las termocuplas tipo K, ubicadas a 17 mm y 35 mm, respectivamente, desde la base de la llama.

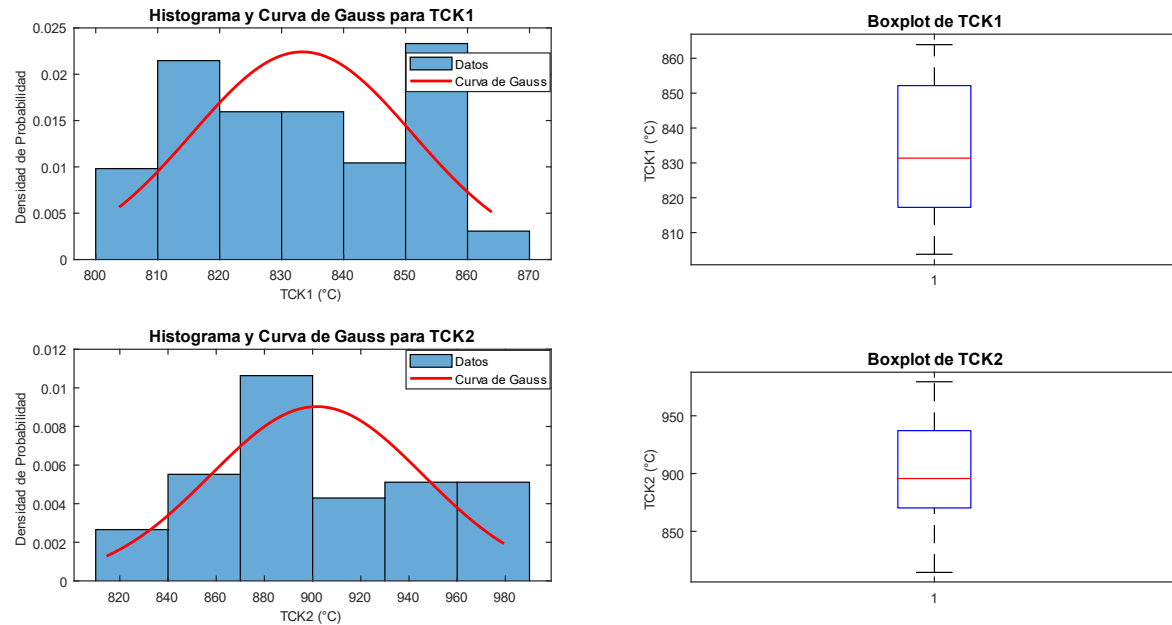


Figura 15: Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 1 (Fuente: elaboración propia)

Las Tablas 8 y 9 muestran un resumen de los resultados estadísticos de la medición de la temperatura en grados Celsius (°C) de TCK1 y TCK2. Los parámetros incluidos son la media, desviación estándar, mediana, cuartiles Q1, Q2 (mediana) y Q3.

Tabla 8: Resultados estadísticos de la medición de la temperatura TCK1 con radio de equivalencia (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	1	2	3	4	5	6
ϕ	0.74	0.44	0.32	0.25	0.2	0.17
λ	35	126	212	300	400	488
Media	833	842	810	801	818	811
Desviación Estándar	17	9	7	9	4	3
Mediana	831	845	810	798	819	811
Cuartil Q1	817	836	804	796	814	809
Cuartil Q2 (Mediana)	831	845	810	798	819	811
Cuartil Q3	852	848	816	800	821	813

Tabla 9: Resultados estadísticos de la medición de la temperatura TCK2 con radio de equivalencia (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	1	2	3	4	5	6
ϕ	0.74	0.44	0.32	0.25	0.2	0.17

λ	35	126	212	300	400	488
Media	901	957	934	925	927	915
Desviación Estándar	44	19	39	21	4	10
Mediana	895	955	935	925	927	913
Cuartil Q1	870	941	906	913	924	907
Cuartil Q2 (Mediana)	895	955	935	925	927	913
Cuartil Q3	837	966	975	933	930	927

Se puede observar que la medición de TCK2 a los 35 mm es mayor que TCK1 a los 17 mm. Esto es consistente con la literatura, dado que la combustión completa y la liberación de mayor energía ocurre en la zona más alta de la llama. Además, ambas comparten una tendencia similar indicando un patrón continuo en la llama.

La tendencia a aumentar la temperatura entre el punto de operación 1 y 2, disminuyendo en los puntos de operación siguientes se vincula con el exceso de aire. Esta tendencia también es consistente con la teoría de combustión, puesto que a mayor exceso de aire se produce una dispersión de calor donde el aire adicional pasa a absorber el calor generado reduciendo la temperatura.

La desviación estándar en TCK2 indica que es la zona sujeta a más fluctuaciones térmicas, pudiendo explicarse por la dinámica del flujo de aire al ser una llama no confinada.

5.3 Irradiancia medida en los puntos de operación y resultados estadísticos

Las Figura 16 se muestra el histograma, la curva de Gauss y el boxplots de la medición del parámetro definido RAD tomado durante el tiempo de estudio del punto de operación 1, este parámetro señala la irradiancia captada por el sensor de flujo GG01-250. Los gráficos correspondientes a los demás puntos de operación se pueden ver en el [Anexo H](#).

El histograma se puede observar un pico indicando una mayor frecuencia en la medición. Estos picos se encuentran entre los 514 y 516 $\frac{W}{m^2}$, sugiriendo que las mediciones están concentradas en la zona central de la muestra.

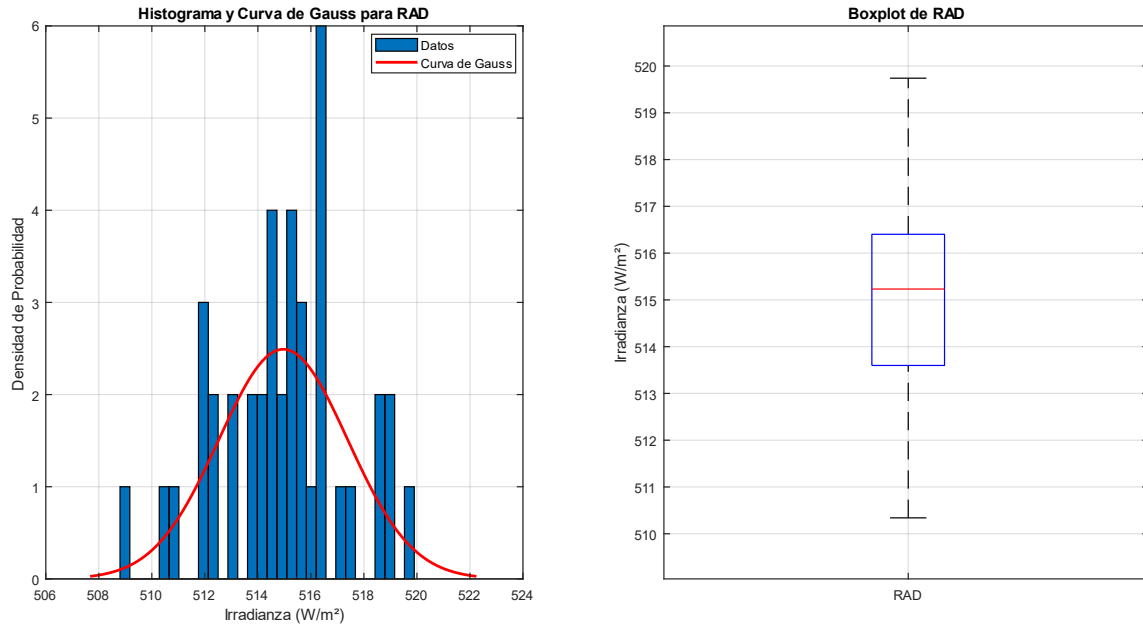


Figura 16: Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 1 (Fuente: elaboración propia)

La Tabla 10 muestra un resumen de los resultados estadísticos de la medición de la irradiancia ($\frac{W}{m^2}$) de RAD en función del radio de equivalencia (ϕ) de los puntos de operación. Los parámetros incluidos son la media, desviación estándar, mediana, cuartiles Q1, Q2 (mediana) y Q3.

Tabla 10: Resultados estadísticos de la medición de la irradiancia medida con radio de equivalencia (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	1	2	3	4	5	6
ϕ	0.74	0.44	0.32	0.25	0.2	0.17
λ	35	126	212	300	400	488
Media	515	518	519	520	512	516
Desviación Estándar	2.43	2.85	2.37	2.26	2.08	1.68
Mediana	515	517	519	519	511	515
Cuartil Q1	513	515	518	518	510	514
Cuartil Q2 (Mediana)	515	517	519	519	511	515
Cuartil Q3	516	519	521	522	513	516

La variación de la irradiancia desde el punto de operación 1 al 4 aumenta, luego disminuye. Esto sugiere que el aumento del exceso de aire mejora la combustión hasta el punto de operación 4, en los siguientes puntos reduce la eficiencia.

Se puede apreciar que la desviación estándar indica una distribución estrecha indicando la estabilidad en las condiciones de medición.

5.4 Espectros de radiación en puntos de operación

Las Figuras 17, 18 y 19 presentan gráficos tridimensionales que muestran la intensidad promedio de la radiación en los diferentes puntos de operación, medidos a distancias de 10 mm, 18 mm y 30 mm, respectivamente, desde la boquilla del quemador con un tiempo de integración de 100 ms. Estos gráficos permiten visualizar las variaciones en la intensidad de la radiación emitida por la llama en los puntos de operación. La longitud de onda en el eje horizontal y los puntos de operación en el eje de profundidad proporcionan una visión completa del comportamiento espectral de la llama a la altura especificada.

De la Figura 17 se desprende que a 10 mm se presentan picos en la intensidad de emisión a los 311 nm, 515 nm y 431 nm, asociados a los radicales libres OH , CH , y C_2 , respectivamente. Además, se presenta una tendencia donde decaen las intensidades a medida que aumenta el exceso de aire en los puntos de operación.

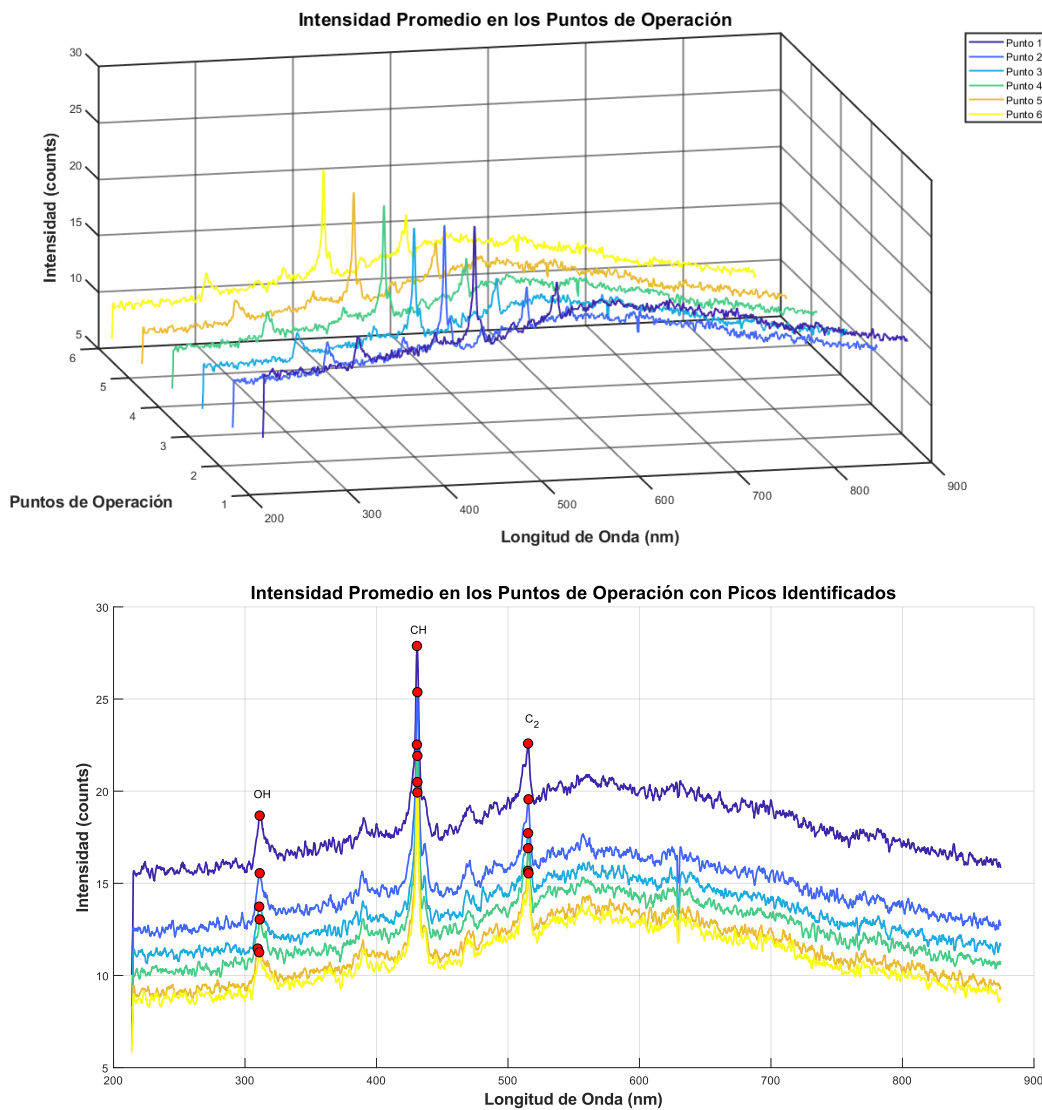


Figura 17: Intensidad promedio en los puntos de operación a 10 mm (Fuente: elaboración propia)

En la Figura 18 se puede apreciar un incremento en la intensidad a 18 mm en comparación a la intensidad medida a los 10 mm, esto puede estar relacionado con el hecho de que a mayor altura el combustible tiene más tiempo para mezclarse y reaccionar con el aire. Se pueden ver picos más moderados en comparación con la medición anterior pero la distribución espectral es similar, esto indica que las mismas especies químicas dominan la emisión en ambas alturas, aunque con diferente intensidad. También se puede apreciar un cruzamiento entre las curvas.

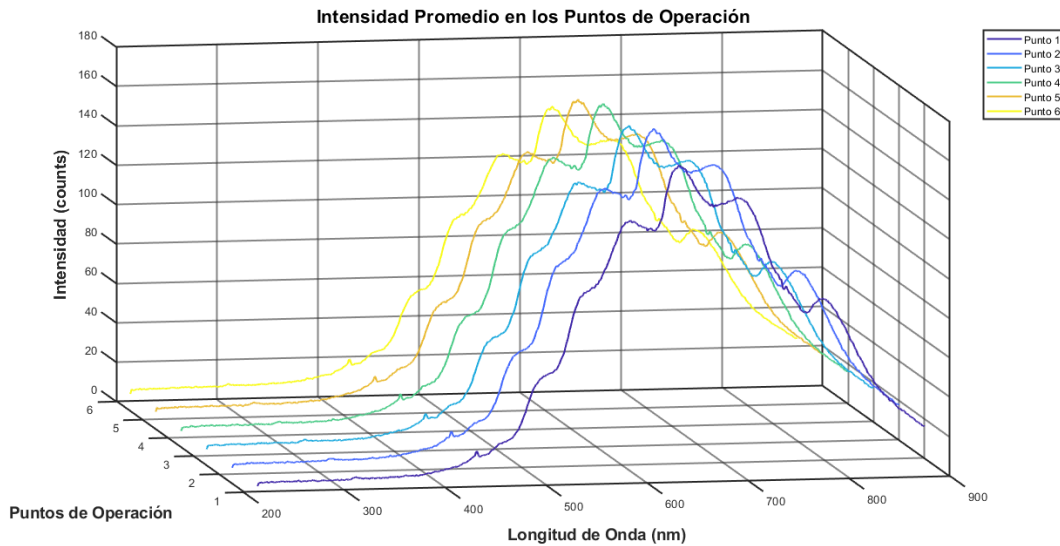


Figura 18: Intensidad promedio en los puntos de operación a 18 mm (Fuente: elaboración propia)

En comparación a las otras alturas en la Figura 19 se presenta un notablemente aumento en la intensidad y un espectro continuo, indicando que la combustión es más completa a una mayor altura, donde las condiciones de temperatura y mezcla son más favorables. Se puede apreciar que la tendencia se invierte en los puntos de operación donde la intensidad aumenta a medida que aumenta el exceso de aire.

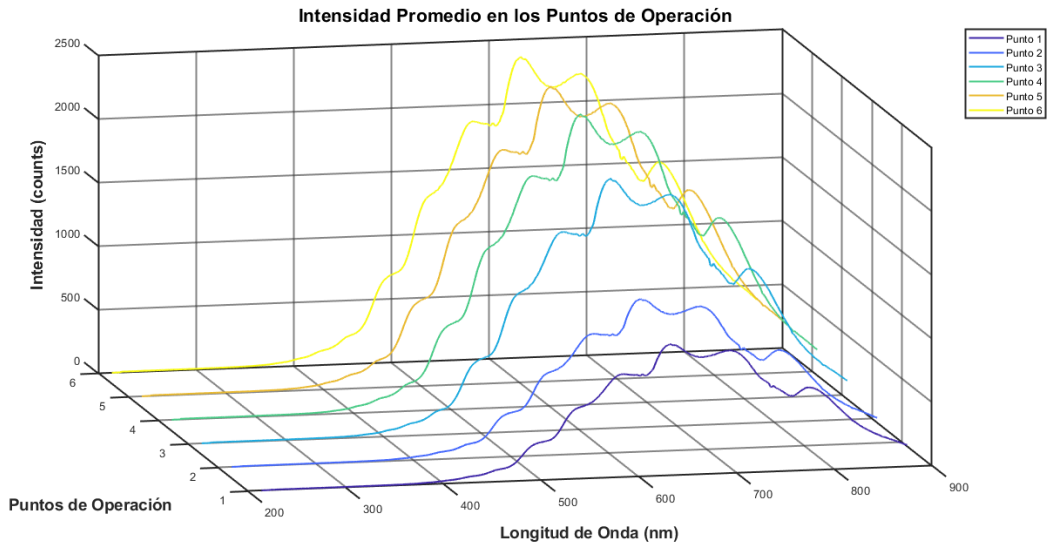


Figura 19: Intensidad promedio en los puntos de operación a 30 mm (Fuente: elaboración propia)

CAPÍTULO 6: Discusión y propuesta de ensayo

6.1 Interpretación de resultados

6.1.1 Radicales

Las Figura 20 se presentan gráficos que muestran la variación de la intensidad promedio de los radicales CH , OH y C_2 en los diferentes puntos de operación. Los gráficos corresponden a las mediciones realizadas a 10 mm (a) y 18 mm (b) desde la zona central de la llama. Estos gráficos permiten visualizar cómo varía la intensidad de los radicales en función de las diferentes condiciones operativas.

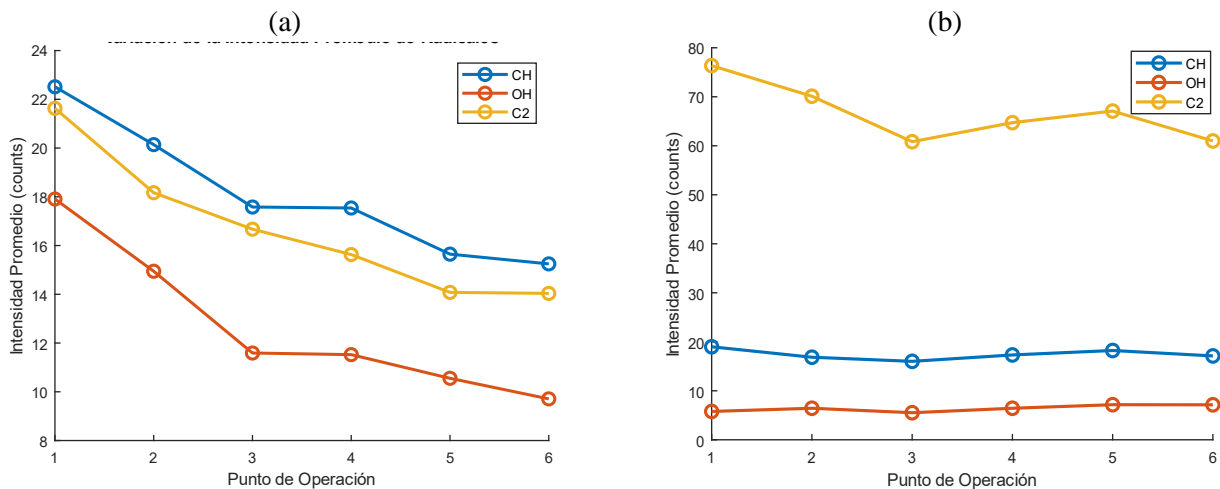


Figura 20: Variación de la intensidad promedio de los radicales a 10 mm y 18 mm (Fuente: elaboración propia)

La Tabla 10 indica un resumen de las mediciones para facilitar la comprensión de las mediciones, cabe señalar que por cada punto de operación se realizaron 3 experimentos en los que se obtuvieron entre 16 y 17 señales. Por lo tanto, los resultados presentados son el promedio de 50 señales por punto de medición.

Tabla 10: Variación de intensidad promedio medida (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	10mm			18 mm		
	CH	OH	C_2	CH	OH	C_2
1	22.5	17.9	21.6	18.9	5.8	76.4
2	20.1	14.9	18.2	16.9	6.4	70.1
3	17.6	11.6	16.7	16	5.5	60.8
4	17.5	11.5	15.6	17.3	6.4	64.7
5	15.7	10.6	14.1	18.2	7.2	67.1
6	15.3	9.7	14	17.1	7.1	60.9

En ambos gráficos se presenta el desfase entre los radicales CH y C_2 , y una tendencia similar en función de los puntos de operación.

Mediciones a 10 mm

La intensidad del radical CH a los 10 mm es mayor que los radicales OH y C_2 , esto se puede relacionar que al estar en una zona inicial donde la reacción de fragmentación del gas natural genera una abundancia del radical que aún no ha sido completamente oxidado.

El radical OH es el que tiene una menor intensidad en comparación a los demás radicales. La intensidad del radical C_2 es relativamente alta, pero inferior a CH indicando una combustión incompleta.

La tendencia a disminuir en función del aumento del exceso de aire señala la mejora en la combustión, también se relaciona a la disminución de la altura de la llama.

Mediciones a 18 mm

La intensidad del radical CH a 18 mm se ve más estable entre los puntos de operación, indicando que la mayoría del radical fue oxidado o transformado en otros productos intermedios.

El radical OH también presenta una estabilidad y en niveles mas bajos que a 10 mm. Esto puede producirse dado que, a esa altura la temperatura es suficiente para estabilizar la concentración del radical.

Sobre el radical C_2 se puede visualizar un aumento significativo, indicando una zona alta en reactividad, donde la formación de este producto es favorable.

6.1.2 Temperaturas

En la Figura 21 se presentan las medianas de las temperaturas medidas por las termocupas, se procede a analizar con las medianas para no considerar los valores atípicos de la mediciones asegurando una interpretación mas precisa de las condiciones térmicas.

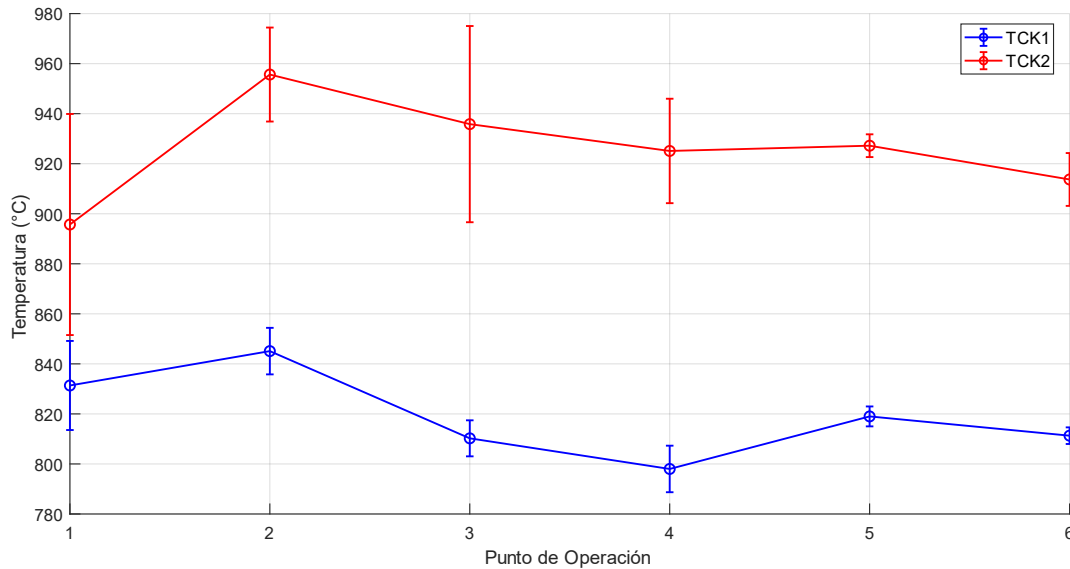


Figura 21: Mediana de las temperaturas en los puntos de operación (Fuente: elaboración propia)

En la Tabla 11 se puede ver la relación entre las medianas de las temperaturas medidas y el exceso de aire para los distintos puntos de operación. Los resultados muestran un aumento de la temperatura de entre los puntos 1 y 2, y un decrecimiento progresivo hasta el punto 4, luego un nuevo aumento en el punto 5 y, finalmente, un decrecimiento en el punto 6. Es de esperar un decrecimiento cuando el exceso de aire crítico es superado, puesto que el exceso de aire enfría la llama al absorber parte del calor generado.

El incremento en el punto de operación 5 se puede asociar a una recuperación parcial de la eficiencia térmica dado a las condiciones del ambiente, pero en el punto de operación 6 vuelve a predominar el enfriamiento por el exceso de aire.

Tabla 11: Mediana de los datos medidos (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	Exceso de Aire (%)	Mediana TCK1 (C°)	Mediana TCK2 (C°)
1	35	831	895
2	126	845	955
3	212	810	935
4	300	798	925
5	400	819	927
6	488	811	913

6.1.3 Irradiancia

La Figura 22 presenta la variación de la irradiancia medida en función de diferentes puntos de operación, utilizando el valor de la mediana para cada punto.

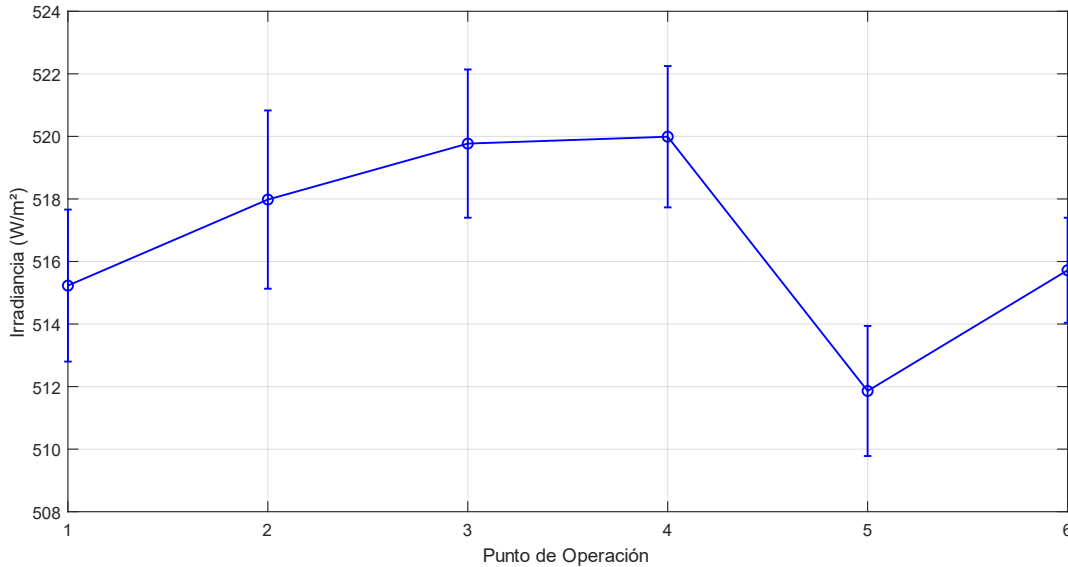


Figura 22: Mediana de la irradiancia en los puntos de operación (Fuente: elaboración propia)

La tendencia de aumentar en los puntos de operación 2, 3 y 4, y de disminuir en los puntos 5 y 6 nos entrega información de la influencia del exceso de aire donde la irradiancia se ve afectada cuando es superado el límite óptimo para la combustión. Pese a esto establecer una relación directa de la irradiancia al exceso de aire no es concluyente dado a que esta puede ser variable por varios factores.

Los valores medidos no son los esperados, por ello se hizo una revisión sobre el sensor de flujo de calor encontrando la investigación “Gardon gauge measurements of fast heat flux transients” [56], donde se indica que los medidores Gardon se utilizan ampliamente para medir flujos de calor en entornos hostiles debido a su confiabilidad y diseño de agua de enfriamiento. Sin embargo, los medidores Gardon generalmente se consideran sensores de estado cuasi estable con una respuesta de frecuencia limitada y no se utilizan a menudo para mediciones transitorias. Dado a esto se puede establecer que la llama al estar en un ambiente no confinado con fluctuaciones podría definirse en un estado transitorio explicando los valores obtenidos.

También se indica que, al no tener una fuente de radiación conocida efectuar una correcta calibración del equipo no fue posible. Por tanto, las mediciones obtenidas permiten observar una tendencia entre los puntos de operaciones.

6.1.3 Razón C_2/CH

En la Figura 23 y la Tabla 12 se presentan las razones C_2/CH medidas a las alturas de 10 mm y 18 mm desde la base de la llama en función del exceso de aire. Se puede observar que para las tendencias el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.6507 para la medición más cercana a la boquilla del quemador y 0.9859 para la más alejada, ambas curvas de ajuste corresponden a polinomios de grado 2.

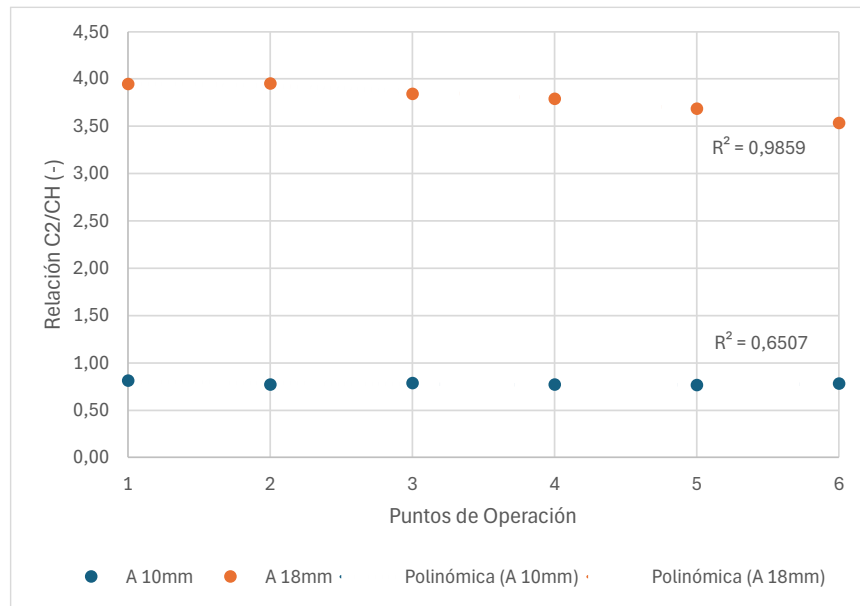


Figura 23: Razón C_2/CH (Fuente: elaboración propia)

Tabla 12: Razón C_2/CH en función del exceso de aire (Fuente: elaboración propia)

Punto de Operación	Exceso de Aire (%)	Relación C_2/CH a 10 mm	Relación C_2/CH a 18 mm
1	35	0.81	3.95
2	126	0.77	3.95
3	212	0.79	3.84
4	300	0.77	3.79
5	400	0.76	3.69
6	488	0.78	3.53

Pese a que el coeficiente de determinación en la medición a 10 mm no fue tan preciso, la tendencia se puede validar por su similitud en las observaciones de Farias y Gaydon [7,53,54]. Donde a medida que aumenta el exceso de aire, la razón C_2/CH tiende a disminuir, lo que refleja cambios en la estructura química de la llama y en la eficiencia de los procesos de combustión.

6.2 Limitaciones

En las limitaciones de este ensayo se presentan:

Medidor de flujo

La precisión en los datos de estos estudios es de vital importancia, por eso la propagación de error de los instrumentos de medición pueden ser significativos. Dado a que el lector de flujo del gas natural ARG01 está diseñado para aire, puede tener ciertas repercusiones en los datos medidos.

Monitoreo continuo

Cabe señalar que las mediciones de las temperaturas, las imágenes y los espectros no fueron captados en el mismo instante, si no que fueron recopiladas de forma separada pese a que se replicó el punto de operación señalado las perturbaciones en los instantes de medición no son similares.

Perturbaciones del ambiente

Al ser una llama expuesta y no confinada, se presentan perturbaciones del ambiente las cuales pueden ser minimizadas, pero no eliminadas.

Aire compresor

Dado a la condición húmeda del ambiente tener una fuente de aire seco permite obtener mediciones más precisas en los flujómetros y eliminar perturbaciones por condensación del agua en el quemador o la red.

6.3 Propuesta de ensayo de mezclas de gas natural e hidrógeno

Una vez implementado la bombona de hidrógeno con sus conexiones pertinentes, se indican puntos referenciales para el ensayo.

1. Definir objetivo

- Evaluar las características radiativas de la llama resultante de la combustión de mezclas de gas natural con diferentes proporciones de hidrógeno.

2. Condiciones de operación

- Definir los puntos de operación con la variación de los flujos de aire y combustible junto a las proporciones de hidrógeno en la mezcla (0%, 5%, 10%, 15% y 20% de hidrogeno por volumen). Teniendo cuidado del fenómeno de retroceso de llama.

3. Configuración del banco

- Asegurar una alimentación controlada y precisa del aire y el combustible mediante reguladores de flujo adecuados.
- La mezcla puede ser realizada conectando el hidrógeno mediante un bypass en la línea de gas natural que va al quemador. Si es posible incorporar válvula anti-retroceso de llama.
- Confinar la llama incorporando una cámara de combustión para mejores mediciones.

4. Selección de equipos de medición

- Se recomienda utilizar cámara CCD, espectrómetro y termocuplas, como los indicados en esta memoria.
- Utilizar datalogger permitiendo la captura sincronizada de los datos de las variables medidas.

5. Montaje Experimental

- Instalar los instrumentos optoelectrónicos a distancias seguras pero efectivas para capturar datos de emisión y temperatura.
- La instrumentación debe estar calibrada y operativa antes de iniciar los ensayos.

6. Procedimiento de medición

- Registrar el espectro de emisión, temperatura y captura de imagen de la llama para cada mezcla de combustible en diferentes puntos de la llama.

7. Análisis de Datos

- Analizar los espectros obtenidos para detectar cambios en los picos de emisión con la variación de hidrógeno.
- Utilizar software (MATLAB, PHYTON) para procesar los datos capturados.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y Trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo, se logró realizar el montaje de los equipos para generar los ensayos. Se comprobó que las mediciones de los espectros concuerdan con la literatura y registros de estudios similares, también se pudo establecer una adecuada diferenciación entre el ruido ambiente y los puntos de operación medidos, garantizando un resultado confiable en los espectros obtenidos.

En cuanto a las mediciones de temperatura mediante las termocuplas, se observó una tendencia congruente con la literatura en las zonas evaluadas. Respecto al sensor de flujo de calor se obtuvo la misma tendencia al replicar las mediciones, sin embargo, no se pudo validar los valores obtenidos. Por ende, se requiere establecer un método de validación más robusto y un análisis si el sensor es adecuado para el estudio.

Con los puntos de operación establecidos se llevó a cabo el análisis radiativo, en donde se pudo asociar la razón C_2/CH con la irradiancia emitida, la temperatura y la visualización de la llama permitiendo establecer que el punto de operación 2 fue donde la combustión generada por el quemador Gülder es óptima, sin embargo, complementar con más parámetros asociados a la combustión nos daría una visual más amplia para el control de esta.

La determinación de los límites de estabilidad se vio afectada por las condiciones del laboratorio, al estar en un ambiente no confinado hubo perturbaciones que dificultaron establecer si la desestabilización de la llama fue por corrientes de aires o por la mezcla aire/combustible, aun así, se pudo visualizar una llama más acotada y estable en función del aumento del exceso de aire.

Se deja una guía para la propuesta del ensayo de gas natural con hidrógeno, donde se establece una metodología para el análisis optoelectrónico y puntos a considerar para perfeccionar los estudios posteriores.

En resumen, los resultados obtenidos con los instrumentos utilizados y los parámetros medidos permitieron realizar una evaluación preliminar del estado de la combustión. A pesar de las limitaciones y variabilidades observadas, estos datos proporcionan una base sólida para entender cómo factores como el exceso de aire en la eficiencia de la combustión. Este análisis inicial subraya la necesidad de continuar mejorando las técnicas de medición y control para lograr una combustión más eficiente y precisa en futuras aplicaciones.

7.2 Trabajo futuro

En vista al futuro, el set-up implementado en esta memoria tiene como fin generar un ensayo de mezcla de gas natural con hidrógeno. La finalidad del ensayo es caracterizar la llama generada en función de la adición de hidrógeno, permitiendo señalar indicadores claves del rendimiento de la combustión utilizando los equipos optoelectrónicos. También sería interesante incorporar una modificación al set-up para instalar un analizador de gases, con el fin de poder medir las emisiones generadas por la combustión permitiendo correlacionar este parámetro junto a los demás. En el [Anexo Y](#) se presenta consideraciones para el ensayo.

Referencias

- [1] Verne, J. (1980). *La isla misteriosa*. Barcelona: Ramón Sopena.
- [2] Vásquez, R., & Salinas, F. (s.f.). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- [3] Lo Basso, G., Nastasi, B., Astiaso Garcia, D., & Cumo, F. (2017). How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers. *Energy*, *123*, 527-536.
- [4] Hanson, R. K. (1988). Combustion diagnostics: Planar imaging techniques. *Symposium (International) on Combustion*, *21*(1), 1677-1680, 1681-1691, IN5-IN8. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(88\)80401-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(88)80401-6).
- [5] Steinberg, A. M., Hamlington, P. E., & Zhao, X. (2021). Structure and dynamics of highly turbulent premixed combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, *85*. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100900>
- [6] Xiaoshu, Z., Cheng, Z., & Wang, S. (2007). Flame measurement and combustion diagnoses with spectrum analysis. *AIP Conference Proceedings*.
- [7] Farias, O., & Arias, L. (2007, October 25). Diagnóstico de la combustión de gas y petróleo mediante el análisis del espectro visible de la llama. En *8° Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*.
- [8] Chen, D., Li, J., Li, X., Guo, Y., Huang, H., & Kobayashi, N. (2024). Experimental studies on the OH* chemiluminescence and structure characteristics in NH₃/H₂ and NH₃/cracked gas swirl flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*(B), 1370-1379. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.185>
- [9] Wu, R., Song, X., Wei, J., Bai, Y., Wang, J., Lv, P., He, T., Ashak, M., & Parvez, G. (2024). Hydrogen addition in methane-oxygen laminar inverse diffusion flames: A study focused on free radical chemiluminescence and soot formation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *54*.
- [10] I. Glassman, R. A. Yetter, and N. G. Glumac. (2014). *Combustion*. Academic press
- [11] Kuo, K. K. (2005). *Principles of Combustion*. Wiley
- [12] Mengxiao Sun & Xiaomei Huang & Yelong Hu & Shan Lyu, (2021). Effects on the performance of domestic gas appliances operated on natural gas mixed with hydrogen, *Energy*, Vol. 244, A, 122557.
- [13] Spiro, Thomas G., y Stigliani, William M. (2003). *Chemistry of the Environment*. Prentice Hall.
- [14] Smith, J. (2010). *Fundamentos de Combustión*. Wiley.
- [15] Martínez, I. (1992). *Termodinámica básica y aplicada*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [16] Kuo, K. K. (2005). *Principles of Combustion* (p. 98). Wiley.
- [17] ReVelle, J. B. (2008). *Introduction to Fire Dynamics* (p. 132). Wiley.
- [18] Drysdale, D. L. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley.

- [19] Probst, R. F. (2009). *Physicochemical Hydrodynamics: An Introduction* (Clasificación empírica de la llama según Reynolds, Tesis de grado). Universidad de Cambridge, Cambridge, Reino Unido.
- [20] F. Yunge. (2016). "Modulación acústica de una llama de difusión laminar axisimétrica," Memoria de Título, Ingeniero Civil Industrial, Universidad Técnico Federico Santa María.
- [21] Glassman, I. (1996). *Combustion* (3rd ed., pp. 119-218). Academic Press.
- [22] Law, C. K. (2006). *Combustion Physics* (pp. 346-362). Cambridge University Press.
- [23] Amell, A. (2004). Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 32, 72-81.
- [24] Gonzales, C. A. D. (2008). Estudio experimental de la estabilidad de llama de biogás en un sistema de premezcla. *Energética*, 39, 35-42.
- [25] *Gülder burner*. (n.d.). Retrieved from <https://www.liiscience.org/meeting/past-meetings/2005-liiworkshop/m2005s8>
- [26] *McKenna burner*. (n.d.). Retrieved from <https://www.liiscience.org/meeting/past-meetings/2005-liiworkshop/m2005s7>
- [27] Zizak, G. (2000). Technical report Instituto per la Tecnologia dei Materiali e dei Processi Energetici. ICS Training Course on Laser Diagnostics of Combustion Processes, Niles, University of Cairo, Egypt.
- [28] Lin, J., Zhang, X., Liu, K., & Zhang, W. (2019). Emissivity characteristics of hydrocarbon flame and temperature measurement by color image processing. *Energies*, 12(11). Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2185>
- [29] Mekhregin, M., Miroshnichenko, G., Chistiakov, A., Bolotov, D., Ashirov, A., Zubko, A., & Meshkovskiy, I. (2020). Combination of soot pyrometry and C₂ emission spectroscopy for temperature measurement during combustion of hydrocarbons. *Measurement*, 166, 108242. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120307818>
- [30] Muller, R. A., & Faust, J. S. (2017). *Física Moderna*. Editorial Científica.
- [31] Miller, J. C. (2019). *Química Lumínica*. Editorial Lumière, 2019. ISBN: 978-1-234567-89-0.
- [32] Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill.
- [33] Arias, L., Torres, S., Sbarbaro, D., & Ngendakumana, P. (2011). On the spectral bands measurements for combustion monitoring. *Combustion and Flame*, 158(3), 423-433. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.018>
- [34] Yang, J., Gong, Y., Wei, J., Guo, Q., Wang, F., & Yu, G. (2022). Chemiluminescence diagnosis of oxygen/fuel ratio in fuel-rich jet diffusion flames. *Fuel Processing Technology*, 232, 107284. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382022001242>
- [35] Hidegh, G., & Jzsa, V. (2020). Correlation analysis of chemiluminescent and pollutant emissions of a liquid-fueled turbulent swirl burner. *Journal of the Energy Institute*.
- [36] Garces, H. O., Arias, L., Rojas, A. J., Carrasco, C., Fuentes, A., & Farias, O. (2016). Radiation measurement based on spectral emissions in industrial flames. *Measurement*, 87, 62-73.
- [37] Garces, H. O., Arias, L. E., Rojas, A. J., Cuevas, J., & Fuentes, A. (2017). Combustion diagnostics by calibrated radiation sensing and spectral estimation. *IEEE Sensors Journal*,

- 17(18), 5871-5879.
- [38] Arias, L., Torres, S., Sbarbaro, D., & Ngendakumana, P. (2011). On the spectral bands measurements for combustion monitoring. *Combustion and Flame*, 158(3), 423–433. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.018>
- [39] Smith, J., & Doe, A. (2020). *Advanced CCD Camera Technologies*. Academic Press.
- [40] Huang, J., & Zhao, M. (2020). Non-contact temperature measurement using bolometric sensors. *Measurement Science and Technology*, 31(4), 045101-045112.
- [41] Martinez, D. (2018). Applications of pyroelectric detectors in flame detection systems. *Fire Safety Journal*, 52, 45-55.
- [42] Hukseflux. (2020). *Sensores térmicos: Manual de usuario GG01: Sensor de alto flujo de calor refrigerado por agua calibre Gardon*. Delft, Países Bajos: Hukseflux.
- [43] Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. CRC Press.
- [44] Hargis, L. G. (1988). *Analytical Chemistry: Principles and Techniques*. Prentice Hall.
- [45] IAOQI. (n.d.). *HR4000 high-Resolution Spectrometer-Ocean Optics*. Retrieved June 22, 2024, from <http://www.gzbiaoqi.com/ProductShowen.asp?ArticleID=3>
- [46] Ortíz, J. M. (n.d.). *Fundamentos de la intercambiabilidad del Gas Natural*.
- [47] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8a ed.). McGraw-Hill Mexico.
- [48] Weber, E. J. (1965). *Gas Engineering Handbook, Fuel Gas Engineering Practice, Chapter 14. Interchangeability of Fuel Gases* (1st ed.). Industrial Press.
- [49] Hukseflux. (2004). *Manual de usuario GG01: Sensor de alto flujo de calor refrigerado por agua calibre Gardon*. Delft, Países Bajos: Hukseflux.
- [50] Rabello de Castro, R., & Figueira da Silva, L. F. (2019). Soot volume fraction and temperature of laminar non-premixed ethylene-air flame. *Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering*.
- [51] Smith, J. (2020). *Industrial Burner Design and Operation*. New York, NY: Industrial Press.
- [52] Johnson, R. (2018). *Advanced Combustion Techniques*. Boston, MA: Engineering Publications.
- [53] Farías, O. (1997). *Towards the Development of an Optimal Combustion Control in Fuel-Oil Boilers from the Flame Emission Spectrum* (Doctoral dissertation). Universite de Liege, Belgique.
- [54] Gaydon, A. G., & Wolfhard, H. G. (1970). *Flames: Their Structure, Radiation and Temperature*. Chapman and Hall Ltd.
- [55] República de Chile, Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. (2004). *Aprueba reglamento de servicio de gas de red (Decreto N° 67)*. Santiago, Chile.
- [56] Fu, T., Zong, A., Tian, J., & Xin, C. (2016). Gardon gauge measurements of fast heat flux transients. *Applied Thermal Engineering*, 100, 501-507. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.043>

Anexo A: Código para compilar imagen promedio

```

%% Compilar imagenes de c/PO
% La carpeta con las imágenes TIFF
imageDir = uigetdir('', 'Seleccione la carpeta con las imágenes TIFF');

% Obtener lista de archivos TIFF en el directorio
imageFiles = dir(fullfile(imageDir, '*.tiff'));

% Número de imágenes
numImages = length(imageFiles);

% Leer la primera imagen para obtener el tamaño
firstImage = imread(fullfile(imageDir, imageFiles(1).name));
[imageHeight, imageWidth, numChannels] = size(firstImage);

% Inicializar una matriz para acumular las imágenes
sumImage = zeros(imageHeight, imageWidth, numChannels, 'double');

% Sumar todas las imágenes
for i = 1:numImages
    % Leer la imagen
    currentImage = imread(fullfile(imageDir, imageFiles(i).name));
    % Convertir a tipo double para evitar saturación en la suma
    currentImage = double(currentImage);
    % Acumular la imagen
    sumImage = sumImage + currentImage;
end

% Calcular la imagen promedio
averageImage = sumImage / numImages;

% Convertir de nuevo a uint8 si las imágenes originales eran de este tipo
averageImage = uint8(averageImage);

% Guardar la imagen promedio
imwrite(averageImage, fullfile(imageDir, 'average_image.tiff'));

% Mostrar la imagen promedio
imshow(averageImage);
title('Imagen Promedio');

```

Anexo B: Código para establecer la escala píxel/centímetro

```

%% Escalar imagen
I=imread("Image__2024-08-06__16-27-07.tiff");
% Mostrar la imagen cargada
figure, imshow(I);
title('Imagen de la Llama con Referencia');

% Selección de la referencia de Tamaño
disp('Seleccione dos puntos a lo largo de la referencia conocida en la
imagen.');
```

$$[xRef, yRef] = ginput(2);$$

```

% Distancia en píxeles entre los puntos seleccionados
distancePixels = sqrt((xRef(2) - xRef(1))^2 + (yRef(2) - yRef(1))^2);

% Longitud real de la referencia
referenceLength = input('Ingrese la longitud real de la referencia en cm: ');

% Calcular la escala en cm/píxel
scale = referenceLength / distancePixels;
fprintf('La escala es: %.4f cm/píxel\n', scale);

% Medir la Llama en la Imagen
disp('Seleccione dos puntos para medir la altura de la llama.');
```

$$[xHeight, yHeight] = ginput(2);$$

```

% Calcular la altura en píxeles
heightPixels = sqrt((xHeight(2) - xHeight(1))^2 + (yHeight(2) - yHeight(1))^2);

% Convertir la altura a cm
heightCm = heightPixels * scale;
fprintf('La altura de la llama es: %.2f cm\n', heightCm);

% Medir el ancho de la llama
disp('Seleccione dos puntos para medir el ancho máximo de la llama.');
```

$$[xWidth, yWidth] = ginput(2);$$

```

% Calcular el ancho en píxeles
widthPixels = sqrt((xWidth(2) - xWidth(1))^2 + (yWidth(2) - yWidth(1))^2);

% Convertir el ancho a cm
widthCm = widthPixels * scale;
fprintf('El ancho máximo de la llama es: %.2f cm\n', widthCm);

% Mostrar resultados en la imagen
hold on;
plot(xRef, yRef, 'r', 'LineWidth', 2); % Línea de referencia
plot(xHeight, yHeight, 'g', 'LineWidth', 2); % Línea de altura
plot(xWidth, yWidth, 'b', 'LineWidth', 2); % Línea de ancho
legend({'Referencia', 'Altura de la Llama', 'Ancho de la Llama'}, 'Location',
'Best');
```

$$\text{title('Mediciones de la Llama')}$$

Anexo C: Código para determinar la altura de la llama

```

%% Altura
% Selección de la carpeta que contiene las imágenes
folder = uigetdir('Seleccione la carpeta que contiene las imágenes TIFF');

% Obtener una lista de archivos TIFF en la carpeta seleccionada
filePattern = fullfile(folder, '*.tiff');
tiffFiles = dir(filePattern);

% Verificar si se encontraron suficientes archivos
if length(tiffFiles) < 6
    error('No se encontraron suficientes archivos TIFF en la carpeta
seleccionada.');
```

```

end

% Selección de 6 archivos de la lista
[selectedFiles, path] = uigetfile(fullfile(folder, '*.tiff'), ...
    'Seleccione 6 imágenes TIFF', ...
    'MultiSelect', 'on');
```

```

for k = 1:6
    % Leer la imagen
    imagenPath = fullfile(path, selectedFiles{k});
    imagen = imread(imagenPath);

    % Imagen en escala de grises
    imagenGris = rgb2gray(imagen);

    % Filtro Gaussiano para suavizar la imagen y reducir el ruido
    imagenSuavizada = imgaussfilt(imagenGris, 3);

    % Contraste de la imagen
    imagenAjustada = imadjust(imagenSuavizada);

    % Imagen original, suavizada y ajustada
    figure;
    subplot(1, 3, 1);
    imshow(imagen);
    title('Imagen Original');
```

```

    subplot(1, 3, 2);
    imshow(imagenSuavizada);
    title('Imagen Suavizada');
```

```

    subplot(1, 3, 3);
    imshow(imagenAjustada);
    title('Imagen Ajustada');
```

```

    % Umbralizar la imagen ajustada para obtener una imagen binaria
    umbral = 2; % Ajusta este valor según sea necesario
    imagenBinaria = imagenAjustada > umbral;

    % Operaciones morfológicas para refinar la imagen binaria
    imagenBinaria = imclose(imagenBinaria, strel('disk', 5)); % Cierre
    imagenBinaria = imopen(imagenBinaria, strel('disk', 5)); % Apertura

```

```

    imagenBinaria = bwareaopen(imagenBinaria, 50); % Eliminar componentes
    pequeños

    figure;
    imshow(imagenBinaria);
    title('Seleccione las zonas de ruido y presione "Aceptar" cuando haya
    terminado');

    rectangles = [];
    while true
        try
            rect = getrect; % Obtener el rectángulo seleccionado
            rectangles = [rectangles; rect];
            rectangle('Position', rect, 'EdgeColor', 'r', 'LineWidth', 2);
        catch
            break; % Salir del bucle si se interrumpe la selección
        end

        % Preguntar si las correcciones están listas
        respuesta = questdlg('¿Desea seleccionar otra zona de ruido?',
        'Confirmar Correcciones', 'Sí', 'No', 'No');

        if strcmp(respuesta, 'No')
            break; % Salir del bucle si el usuario no desea seleccionar más
            zonas
        end
    end

    % Confirmar que las correcciones están listas
    if ~isempty(rectangles)
        respuesta = questdlg('¿Las correcciones están listas?', 'Confirmar
        Correcciones', 'Sí', 'No', 'Sí');
        if strcmp(respuesta, 'Sí')
            % Convertir rectángulos a regiones binarias para eliminarlas de la
            imagen
            for i = 1:size(rectangles, 1)
                rect = round(rectangles(i, :));
                imagenBinaria(rect(2):rect(2)+rect(4), rect(1):rect(1)+rect(3))
            = 0;
            end

            % Imagen binaria con las zonas eliminadas
            figure;
            imshow(imagenBinaria);
            title('Imagen Binaria con Zonas Eliminadas');

            % Altura de la llama en la imagen binaria refinada
            [y, x] = find(imagenBinaria); % Encuentra las coordenadas de los
            píxeles blancos

            % Altura de la llama en píxeles
            alturaLlamaPíxeles = max(y) - min(y); % Calcula la diferencia en las
            coordenadas y

            % Conversión de píxeles a milímetros
            referencia_mm = 0.167; % Tamaño de referencia en milímetros

```

```

referencia_pixeles = 1; % Tamaño de referencia en píxeles
factor_conversion = referencia_mm / referencia_pixeles;

% Altura de la llama en milímetros
alturaLlamaMM = alturaLlamaPixeles * factor_conversion;

% Altura de la llama y la escala graduada en la imagen original
figure;
imshow(imagen);
hold on;
line([min(x) max(x)], [min(y) min(y)], 'Color', 'w', 'LineWidth',
2); % Línea blanca en la base
line([min(x) max(x)], [max(y) max(y)], 'Color', 'w', 'LineWidth',
2); % Línea blanca en la punta

% Dibujar la escala graduada
numGraduaciones = 6; % Número de graduaciones en la escala
intervalo_mm = alturaLlamaMM / numGraduaciones; % Intervalo en
milímetros entre graduaciones
intervalo_pixeles = alturaLlamaPixeles / numGraduaciones; %
Intervalo en píxeles entre graduaciones

for i = 0:numGraduaciones
    y_pos = max(y) - i * intervalo_pixeles;
    line([max(x) + 10, max(x) + 20], [y_pos, y_pos], 'Color', 'w',
'LineWidth', 2); % Línea blanca para la graduación
    text(max(x) + 25, y_pos, sprintf('%.1f mm', i * intervalo_mm),
'Color', 'w', 'FontSize', 9); % Texto de la graduación
end

hold off;

fprintf('La altura de la llama es: %d píxeles\n',
alturaLlamaPixeles);
fprintf('La altura de la llama es: %.2f milímetros\n',
alturaLlamaMM);
else
    msgbox('Realice las correcciones necesarias y presione "Aceptar"
cuando haya terminado.');
```

```

end
else
    msgbox('No se seleccionó ninguna zona. Por favor, seleccione al menos
una zona para eliminar el ruido.');
```

```

end
end

```

Anexo D: Código para determinar estadísticas de las temperaturas

```

%% Procesamiento estadístico temperatura
% Seleccionar el archivo Excel
[nombreArchivo, rutaArchivo] = uigetfile('*.xlsx', 'Seleccione el archivo
Excel');
if isequal(nombreArchivo, 0)
    disp('No se seleccionó ningún archivo. Saliendo del programa.');
```

```

    return;
else
    % Ruta completa del archivo seleccionado
    archivoCompleto = fullfile(rutaArchivo, nombreArchivo);
    disp(['Archivo seleccionado: ', archivoCompleto]);
end

% Contenido del archivo Excel (todas las hojas)
datos = readtable(archivoCompleto);

% Mostrar nombres de las columnas para seleccionar
nombresColumnas = datos.Properties.VariableNames;
disp('Columnas disponibles en el archivo:');
disp(nombresColumnas);

% Solicitar seleccionar dos columnas
columnasSeleccionadas = cell(1, 2);
for i = 1:2
    columnaSeleccionada = input(['Ingrese el nombre de la columna ', num2str(i),
' a analizar: '], 's');
    if ismember(columnaSeleccionada, nombresColumnas)
        columnasSeleccionadas{i} = columnaSeleccionada;
    else
        disp(['La columna ', columnaSeleccionada, ' no existe en el archivo.']);
        return;
    end
end

% Datos de las columnas seleccionadas
datosColumna1 = datos.(columnasSeleccionadas{1});
datosColumna2 = datos.(columnasSeleccionadas{2});

% Calcular estadísticas
medial = mean(datosColumna1);
desviacion1 = std(datosColumna1);
mediana1 = median(datosColumna1);
cuartiles1 = quantile(datosColumna1, [0.25, 0.5, 0.75]);

media2 = mean(datosColumna2);
desviacion2 = std(datosColumna2);
mediana2 = median(datosColumna2);
cuartiles2 = quantile(datosColumna2, [0.25, 0.5, 0.75]);

% Mostrar estadísticas calculadas
disp('Estadísticas para las columnas seleccionadas:');
disp(['Columna ', columnasSeleccionadas{1}]);
fprintf('Media: %.2f °C\n', medial);
fprintf('Desviación Estándar: %.2f °C\n', desviacion1);
fprintf('Mediana: %.2f °C\n', mediana1);

```

```

fprintf('Cuartil Q1: %.2f °C\n', cuartiles1(1));
fprintf('Cuartil Q2 (Mediana): %.2f °C\n', cuartiles1(2));
fprintf('Cuartil Q3: %.2f °C\n', cuartiles1(3));
disp(' ');

disp(['Columna ', columnasSeleccionadas{2}]);
fprintf('Media: %.2f °C\n', media2);
fprintf('Desviación Estándar: %.2f °C\n', desviacion2);
fprintf('Mediana: %.2f °C\n', mediana2);
fprintf('Cuartil Q1: %.2f °C\n', cuartiles2(1));
fprintf('Cuartil Q2 (Mediana): %.2f °C\n', cuartiles2(2));
fprintf('Cuartil Q3: %.2f °C\n', cuartiles2(3));
disp(' ');

% Gráficos (histograma y boxplot) para cada columna
figure;

% Columna 1
subplot(2, 2, 1);
histogram(datosColumna1, 'Normalization', 'pdf');
hold on;
x1 = linspace(min(datosColumna1), max(datosColumna1), 100);
gauss1 = (1/(desviacion1 * sqrt(2 * pi))) * exp(-0.5 * ((x1 - media1) /
desviacion1).^2);
plot(x1, gauss1, 'r', 'LineWidth', 2);
title(['Histograma y Curva de Gauss para ', columnasSeleccionadas{1}],
'FontSize', 12);
xlabel([columnasSeleccionadas{1}, ' (°C)'], 'FontSize', 10);
ylabel('Densidad de Probabilidad', 'FontSize', 10);
legend('Datos', 'Curva de Gauss', 'Location', 'best');

subplot(2, 2, 2);
boxplot(datosColumna1);
title(['Boxplot de ', columnasSeleccionadas{1}], 'FontSize', 12);
ylabel([columnasSeleccionadas{1}, ' (°C)'], 'FontSize', 10);

% Columna 2
subplot(2, 2, 3);
histogram(datosColumna2, 'Normalization', 'pdf');
hold on;
x2 = linspace(min(datosColumna2), max(datosColumna2), 100);
gauss2 = (1/(desviacion2 * sqrt(2 * pi))) * exp(-0.5 * ((x2 - media2) /
desviacion2).^2);
plot(x2, gauss2, 'r', 'LineWidth', 2);
title(['Histograma y Curva de Gauss para ', columnasSeleccionadas{2}],
'FontSize', 12);
xlabel([columnasSeleccionadas{2}, ' (°C)'], 'FontSize', 10);
ylabel('Densidad de Probabilidad', 'FontSize', 10);
legend('Datos', 'Curva de Gauss', 'Location', 'best');

subplot(2, 2, 4);
boxplot(datosColumna2);
title(['Boxplot de ', columnasSeleccionadas{2}], 'FontSize', 12);
ylabel([columnasSeleccionadas{2}, ' (°C)'], 'FontSize', 10);

% Estadísticas en un archivo de texto
nombreArchivoDatos = fullfile(rutaArchivo, 'estadisticas_columnas.txt');

```

```
fid = fopen(nombreArchivoDatos, 'w');
if fid == -1
    error(['No se pudo crear el archivo: ', nombreArchivoDatos]);
end

fprintf(fid, 'Estadísticas para las columnas seleccionadas:\n\n');
fprintf(fid, 'Columna %s\n', columnasSeleccionadas{1});
fprintf(fid, 'Media: %.2f °C\n', medial);
fprintf(fid, 'Desviación Estándar: %.2f °C\n', desviacion1);
fprintf(fid, 'Mediana: %.2f °C\n', mediana1);
fprintf(fid, 'Cuartil Q1: %.2f °C\n', cuartiles1(1));
fprintf(fid, 'Cuartil Q2 (Mediana): %.2f °C\n', cuartiles1(2));
fprintf(fid, 'Cuartil Q3: %.2f °C\n\n', cuartiles1(3));

fprintf(fid, 'Columna %s\n', columnasSeleccionadas{2});
fprintf(fid, 'Media: %.2f °C\n', media2);
fprintf(fid, 'Desviación Estándar: %.2f °C\n', desviacion2);
fprintf(fid, 'Mediana: %.2f °C\n', mediana2);
fprintf(fid, 'Cuartil Q1: %.2f °C\n', cuartiles2(1));
fprintf(fid, 'Cuartil Q2 (Mediana): %.2f °C\n', cuartiles2(2));
fprintf(fid, 'Cuartil Q3: %.2f °C\n\n', cuartiles2(3));

disp(['Se han guardado las estadísticas en el archivo: ', nombreArchivoDatos]);
```

Anexo E: Código para determinar estadísticas de la irradiancia

```

%% Procesamiento estadístico radiometro
% Selección archivo Excel
[file, path] = uigetfile({'*.xls;*.xlsx', 'Excel Files'}, 'Seleccione el archivo
Excel con los datos del sensor');
if isequal(file, 0)
    disp('Archivo no seleccionado');
    return;
else
    fullPath = fullfile(path, file);
    disp(['Archivo seleccionado: ', fullPath]);
end

% Cargar los datos desde el archivo Excel utilizando readmatrix
data = readmatrix(fullPath);
txt = readcell(fullPath, 'Range', '1:1'); % Leer solo la primera fila para los
nombres de las columnas
colNames = txt(1, :); % Nombres de columnas en la primera fila

% Selección de la columna a analizar
[indx, tf] = listdlg('PromptString', 'Seleccione una columna para analizar:',
'SelectionMode', 'single', 'ListString', colNames);
if tf == 0
    disp('No se seleccionó ninguna columna.');
```

```

    return;
end

% Extraer la columna seleccionada
selectedData = data(:, indx);

% Calcular estadísticas
meanVal = mean(selectedData);
medianVal = median(selectedData);
stdDev = std(selectedData);
quartiles = quantile(selectedData, [0.25 0.50 0.75]);

% Gráficos
figure;
% Subplot 1: Histograma con ajuste de curva Gauss
subplot(1, 2, 1);
h = histfit(selectedData, 30, 'normal');
title(['Histograma y Curva de Gauss para ', colNames{indx}]);
xlabel(['Irradianza (W/m²)']);
ylabel('Densidad de Probabilidad');
grid on;
legend('Datos', 'Curva de Gauss', 'Location', 'best');
```

```

% Subplot 2: Boxplot
subplot(1, 2, 2);
boxplot(selectedData, 'Labels', {colNames{indx}});
title(['Boxplot de ', colNames{indx}]);
ylabel(['Irradianza (W/m²)']);
grid on;

% Estadísticas en un archivo de texto
outputStatsFile = fullfile(path, 'Estadisticas_Descriptivas.txt');
```

```
fid = fopen(outputStatsFile, 'wt');
fprintf(fid, 'Estadísticas para %s\n', colNames{indx});
fprintf(fid, 'Media: %.2f\n', meanVal);
fprintf(fid, 'Mediana: %.2f\n', medianVal);
fprintf(fid, 'Desviación Estándar: %.2f\n', stdDev);
fprintf(fid, 'Cuartiles:\n   25%%: %.2f\n   50%% (Mediana): %.2f\n   75%%:
%.2f\n', quartiles(1), quartiles(2), quartiles(3));
fclose(fid);
disp(['Estadísticas guardadas en: ', outputStatsFile]);
```

Anexo F: Código para el análisis de los espectros

```

%% Análisis de espectro
% Número de puntos de operación
numPoints = 6;

% Rangos de longitud de onda para los radicales típicos
ranges = struct();
ranges.CH = [430, 435]; % nm
ranges.OH = [305, 315]; % nm
ranges.C2 = [510, 520]; % nm

% Resultados compilados de todos los puntos
compiledData = struct();
fields = fieldnames(ranges);
for i = 1:numel(fields)
    compiledData.(fields{i}) = [];
end

% Archivos de ruido ambiental
[filesNoise, pathNoise] = uigetfile('*.txt', 'Seleccione los archivos del ruido
ambiental', 'MultiSelect', 'on');
if ischar(filesNoise)
    filesNoise = {filesNoise};
end

noiseData = [];
for k = 1:length(filesNoise)
    fullFileNameNoise = fullfile(pathNoise, filesNoise{k});

    % Leer los datos usando textscan
    fileID = fopen(fullFileNameNoise, 'r');
    tempData = textscan(fileID, '%f%f', 'Delimiter', '\t', 'CollectOutput',
true);
    fclose(fileID);

    % Acumular los datos
    noiseData = [noiseData; tempData{1}];
end

% Procesar los datos de ruido
wavelengthNoise = unique(noiseData(:, 1));
averageNoise = accumarray(findgroups(noiseData(:, 1)), noiseData(:, 2), [],
@mean);
colors = parula(numPoints);

% Gráfico 3D
figure('Color', 'white', 'Position', [100, 100, 800, 600]);
hold on;

% Procesar cada punto de operación
for point = 1:numPoints
    [filesSignal, pathSignal] = uigetfile('*.txt', sprintf('Seleccione los
archivos de la señal medida para el punto %d', point), 'MultiSelect', 'on');
    if ischar(filesSignal)
        filesSignal = {filesSignal};
    end
end

```

```

end

pointData = [];
for k = 1:length(filesSignal)
    fullFileNameSignal = fullfile(pathSignal, filesSignal{k});

    % Leer los datos de la señal usando textscan
    fileID = fopen(fullFileNameSignal, 'r');
    signalData = textscan(fileID, '%f%f', 'Delimiter', '\t',
'CollectOutput', true);
    fclose(fileID);

    % Restar el ruido interpolado
    cleanedIntensity = signalData{1}(:, 2) - interp1(wavelengthNoise,
averageNoise, signalData{1}(:, 1), 'linear', 'extrap');
    smoothedIntensity = smoothdata(cleanedIntensity, 'movmean', 5);

    % Acumular los datos para este punto de operación
    pointData = [pointData; [signalData{1}(:, 1), smoothedIntensity]];
end

% Promedio global de intensidad para cada longitud de onda para este punto
uniqueWavelengths = unique(pointData(:, 1));
globalAverageIntensity = arrayfun(@(w) mean(pointData(pointData(:, 1) == w,
2)), uniqueWavelengths);

% Graficar en 3D
plot3(uniqueWavelengths, point * ones(size(uniqueWavelengths)),
globalAverageIntensity, '-', 'Color', colors(point, :), 'LineWidth', 1.5,
'DisplayName', ['Punto ' num2str(point)]);
end
title('Intensidad Promedio en los Puntos de Operación', 'FontSize', 16,
'FontWeight', 'bold');
xlabel('Longitud de Onda (nm)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Puntos de Operación', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
zlabel('Intensidad (counts)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
view(-45, 20);
legend('show', 'Location', 'northeastoutside');
lighting gouraud;
camlight headlight;
shading interp;
ax = gca;
ax.Box = 'on';
ax.LineWidth = 1.5;
ax.GridColor = [0.2 0.2 0.2];
ax.GridAlpha = 0.6;

hold off;

%% Análisis de Espectro Intensidad Promedio
% Número de puntos de operación
numPoints = 6;

% Rangos de longitud de onda para los radicales
ranges = struct();

```

```

ranges.CH = [430, 435]; % nm
ranges.OH = [305, 315]; % nm
ranges.C2 = [510, 520]; % nm

% Resultados compilados de todos los puntos y sus promedios
compiledData = struct();
averageIntensity = struct();
fields = fieldnames(ranges);
for i = 1:numel(fields)
    compiledData.(fields{i}) = [];
    averageIntensity.(fields{i}) = zeros(numPoints, 1);
end

% Datos de ruido ambiental
[filesNoise, pathNoise] = uigetfile('*.txt', 'Seleccione los archivos del ruido
ambiental', 'MultiSelect', 'on');
if ischar(filesNoise) % Convertir a cell array si es necesario
    filesNoise = {filesNoise};
end

noiseData = [];
for k = 1:length(filesNoise)
    fullFileNameNoise = fullfile(pathNoise, filesNoise{k});
    % Usar textscan para leer los archivos de ruido limpiados
    fileID = fopen(fullFileNameNoise, 'r');
    tempData = textscan(fileID, '%f%f', 'Delimiter', '\t', 'CollectOutput',
true);
    fclose(fileID);
end

% Longitud de onda única y el promedio del ruido
wavelengthNoise = unique(noiseData(:, 1));
averageNoise = accumarray(findgroups(noiseData(:, 1)), noiseData(:, 2), [],
@mean);

% Procesar cada punto de operación
for point = 1:numPoints
    [filesSignal, pathSignal] = uigetfile('*.txt', sprintf('Seleccione los
archivos de la señal medida para el punto %d', point), 'MultiSelect', 'on');
    if ischar(filesSignal)
        filesSignal = {filesSignal};
    end

    for k = 1:length(filesSignal)
        fullFileNameSignal = fullfile(pathSignal, filesSignal{k});
        % Leer los archivos
        fileID = fopen(fullFileNameSignal, 'r');
        signalData = textscan(fileID, '%f%f', 'Delimiter', '\t',
'CollectOutput', true);
        fclose(fileID);
        signalData = signalData{1};

        % Restar el ruido interpolado
        cleanedIntensity = signalData(:, 2) - interp1(wavelengthNoise,
averageNoise, signalData(:, 1), 'linear', 'extrap');
        smoothedIntensity = smoothdata(cleanedIntensity, 'movmean', 5);
    end
end

```

```

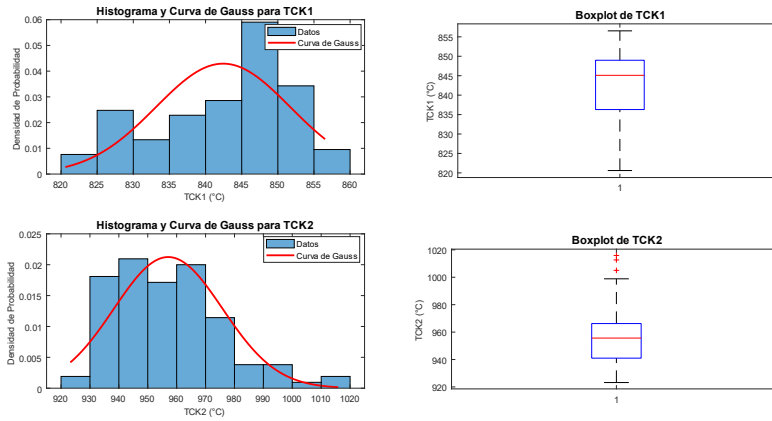
    % Intensidad promedio para cada radical
    for i = 1:numel(fields)
        fieldName = fields{i};
        range = ranges.(fieldName);
        indices = signalData(:, 1) >= range(1) & signalData(:, 1) <=
range(2);
        if any(indices)
            averageIntensity.(fieldName)(point) =
mean(smoothedIntensity(indices));
        end
    end
end
end

% Gráficos para mostrar la variación de la intensidad promedio
figure;
hold on;
colors = lines(numPoints);
markers = {'o', 'o', 'o'};
for i = 1:numel(fields)
    fieldName = fields{i};
    plot(1:numPoints, averageIntensity.(fieldName), ...
        ['- ' markers{i}], 'Color', colors(i,:), 'DisplayName', fieldName,
'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 8);
end
xticks(1:numPoints);
hold off;
title('Variación de la Intensidad Promedio de Radicales');
xlabel('Punto de Operación');
ylabel('Intensidad Promedio (counts)');
legend('show');

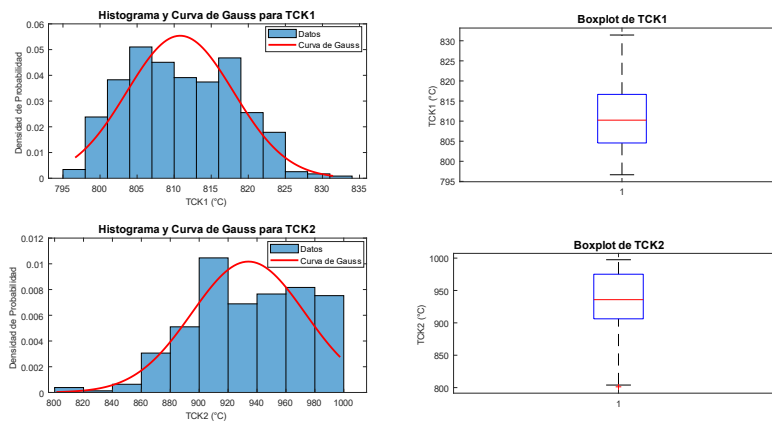
% Variación de intensidad promedio en un archivo texto
outputFileName = fullfile(pathSignal, 'Average_Intensity_Comparison.txt');
fileID = fopen(outputFileName, 'w');
fprintf(fileID, 'Punto de Operación\tCH\tOH\tC2\n');
for point = 1:numPoints
    fprintf(fileID, '%d\t%.2f\t%.2f\t%.2f\n', point, ...
        averageIntensity.CH(point), ...
        averageIntensity.OH(point), ...
        averageIntensity.C2(point));
end
fclose(fileID);
disp(['Variación de intensidad promedio guardada en: ', outputFileName]);

```

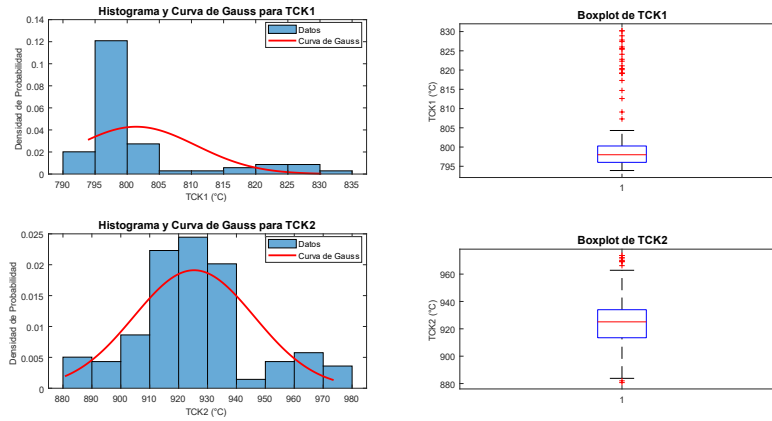
Anexo G: Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en los puntos de operación.



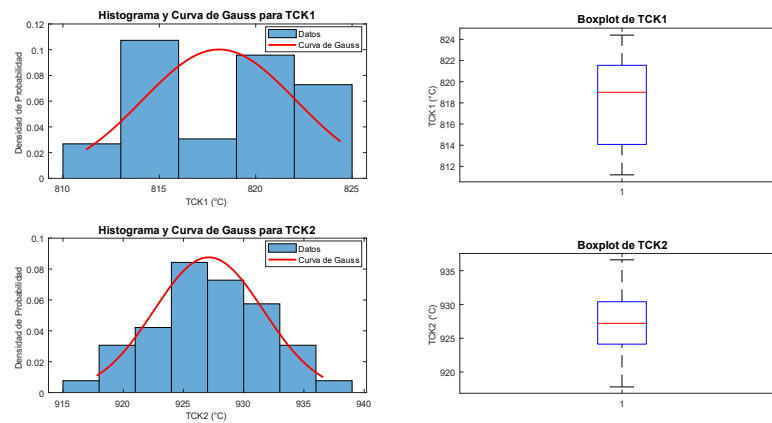
Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 2 (Fuente: elaboración propia)



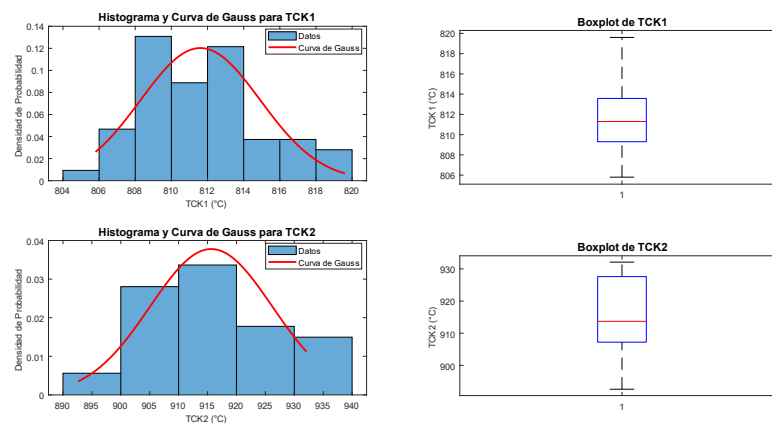
Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 3 (Fuente: elaboración propia)



Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 4 (Fuente: elaboración propia)

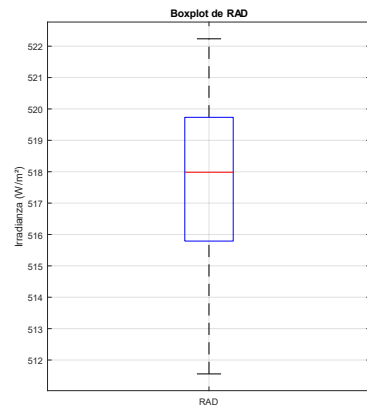
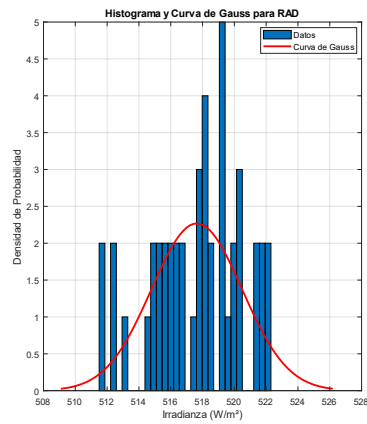


Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 5 (Fuente: elaboración propia)

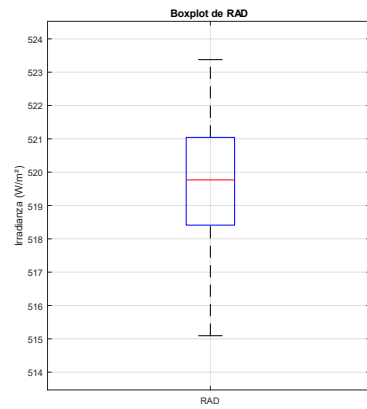
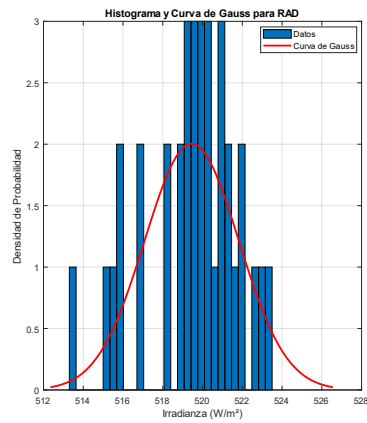


Histograma, curva de gauss y boxplot de temperatura medida en el punto de operación 6 (Fuente: elaboración propia)

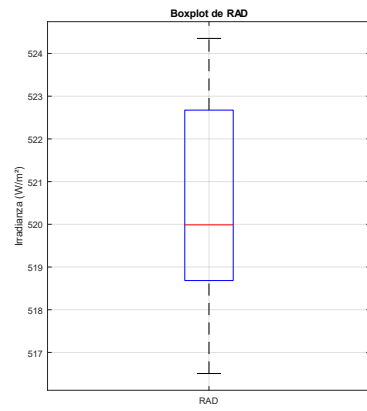
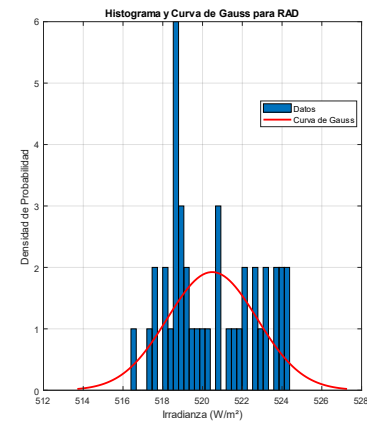
Anexo H: Histograma, curva de gauss y boxplot de irradiancia medida en los puntos de operación.



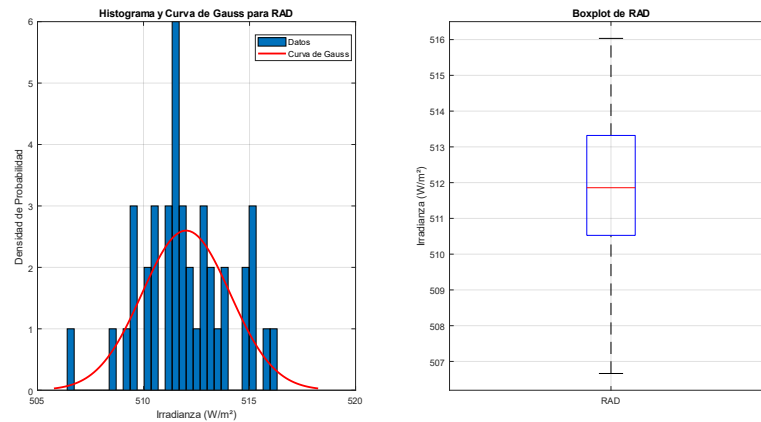
Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 2 (Fuente: elaboración propia)



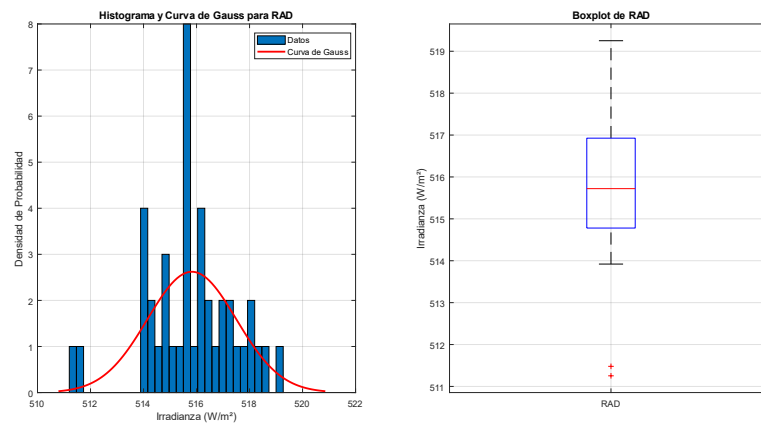
Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 3 (Fuente: elaboración propia)



Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 4 (Fuente: elaboración propia)



Histograma, Curva de gauss y Bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 5 (Fuente: elaboración propia)



Histograma, Curva de gauss y bloxpot para irradiancia medida para RAD en el punto de operación 6 (Fuente: elaboración propia)

Anexo Y: Consideraciones para ensayo de mezcla de gas natural con hidrógeno

Instalación del quemador

- Verificar que no se presenten fugas.
- Una correcta alineación a la mesa de fijación.
- Verificar el ajuste de presión de los gases a mezclar.

Sistema de control

- Instalar un sistema que permita regular las proporciones de hidrógeno y gas natural, al igual de medidores de flujo y presión.

Medición con el espectrómetro

- Instalar el espectrómetro en una posición fija y que cubra el rango de interés para el estudio.
- Establecer puntos de mediciones.

Captación de imágenes

- Instalar la cámara en una posición fija.
- Ajustar la configuración para no saturar la imagen captada, utilizando el obturador.
- Configurar el registro de imágenes en el software.

Medición de temperatura con termocuplas

- Utilizar termocuplas tipo K o S dado a que son las ideales para temperaturas altas.
- Fijar y alinear las termocuplas en las zonas de interés.

Monitoreo y registro de las mediciones

- Configurar el data logger para la obtención continua de todas las mediciones, usando el software de adquisición.

Verificación de mediciones

- Comparar con la literatura, las mediciones para verificar su validez.