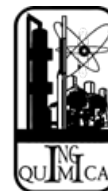




**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
PUEBLA**

**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE  
POSGRADO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**TEMA**

**“Morfología y Análisis Térmico de la Flama en un Quemador Prototipo de H<sub>2</sub> Ante Oscilaciones  
Sostenidas en Flujo de Descarga del Gas H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>”**

**TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**Maestría En Ingeniería Química**

**PRESENTA:**

**I.Q. Isaac Haro Zamora**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**Dra. Mayra Ruiz Reyes**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:**

**Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre**

**Diciembre, 2025.**



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre del (de la) estudiante: **ISAAC HARO ZAMORA**

Matrícula: **223470622**

Nombre del director: **DRA. MAYRA RUIZ REYES**

Nombre del codirector: **DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE**

**Título de la Tesis:**

**“MORFOLOGÍA Y ANÁLISIS TÉRMICO DE LA FLAMA EN UN QUEMADOR PROTOTIPO DE H<sub>2</sub>**  
**ANTE OSCILACIONES SOSTENIDAS EN EL FLUJO DE DESCARGA DEL GAS H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>”**

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de maestría que presenta el (la) estudiante arriba indicado, por lo que **estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que el (la) estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.**

Fecha de examen: **01 de diciembre de 2025**

Hora: **11:00**

Día de la semana: **Lunes**

Lugar: **FIQ7/301**

**Comisión Revisora:**

Presidente: **Dr. Irving Israel Ruiz López**

Firma: \_\_\_\_\_

Secretario(a): **Dr. Gamaliel Che Galicia**

Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (1): **Dra. Mayra Ruiz Reyes**

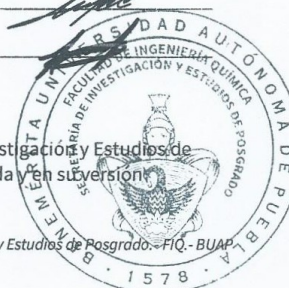
Firma: \_\_\_\_\_

Vocal (2): **Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre**

Firma: \_\_\_\_\_

Indicaciones: Entregar original para su revisión y autorización en la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado (SIEP). La copia de este documento deberá ser incluida en la tesis empastada y en su versión electrónica.

Revisa y Autoriza: Sello de la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado - FIQ - BUAP





Oficio: FIQ/SIEP/048/2025

**Mtro. Juan Manuel Rosas Tapia**  
**Director de la Dirección de Administración Escolar**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**PRESENTE**

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Química sustentará el:

**I. Q. Isaac Haro Zamora**

pertenciente a la generación 2023 con número de matrícula 223470622 y cuyo tema de tesis es: "MORFOLOGÍA Y ANÁLISIS TÉRMICO DE LA FLAMA EN UN QUEMADOR PROTOTIPO DE H<sub>2</sub> ANTE OSCILACIONES SOSTENIDAS EN EL FLUJO DE DESCARGA DEL GAS H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>".

Dicho jurado está integrado por:

**JURADO**

Presidente	Dr. Irving Israel Ruiz López
Secretario	Dr. Gamaliel Che Galicia
Vocal	Dra. Mayra Ruiz Reyes
Vocal	Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Asimismo, comunico a usted que el alumno cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado, y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 01 de diciembre de 2025  
HORA: 11:00 horas  
LUGAR: Edificio FIQ7/301  
DÍA: Lunes

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente,  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 19 de noviembre de 2025

**Dra. Esmeralda Vidal Robles**  
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrado



c.c.p. Archivo  
E-mail: esmeralda.vidal@correo.buap.mx

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C. P. 72590  
(222) 229 55 00  
Exts. 7250 y 7251

---

# Agradecimientos

---

*Deseo expresar mi sincera gratitud a todas las personas que me acompañaron y apoyaron durante el desarrollo de este trabajo y esta etapa.*

*A mis padres, Teresa y Martín, por su amor incondicional y por ser siempre mi mayor respaldo. Gracias por enseñarme, con su ejemplo, que la constancia y la dignidad abren caminos incluso cuando todo parece incierto. Sus sacrificios y su fortaleza han sido el cimiento que me sostuvo en cada paso. Todo lo que he logrado nace, en gran parte, del hogar que construyeron para mí.*

*A mis hermanos, Paola e Israel, por su compañía y por recordarme lo valioso que es tener a quienes te conocen desde el inicio de tu historia. Gracias por reír conmigo, escucharme cuando el camino se complicaba, celebrar mis avances y motivarme cuando dudaba de mí mismo. Su cariño ha sido un refugio y una fuerza constante para seguir creciendo.*

*A mi familia no sanguínea —P.A.U.M. Abigail, Dr. Juan José, I.Q. Rosa María, I.Q. Edgar y M.C. Elizabeth— por abrirme las puertas de su vida y brindarme un hogar más allá de los lazos de sangre. Su compañía y apoyo hicieron más llevadera esta etapa y me recordaron que la familia también se construye.*

*A mis amigos de generación, Fausto, Gabriel, Henry, Karen y Socorro, por compartir conmigo una etapa llena de retos, aprendizajes y grandes convivencias. Gracias por permitirme ser quien soy desde el primer día.*

*A mis amigos y compañero de laboratorio, Mónica, Marco, Dafne, Manuel, Areli, Dea, Emilio, Alejandra, Dra. Georgette y Dra. Laura Sol, por su apoyo cotidiano, las horas de trabajo compartidas y por el ambiente de colaboración que hizo más ligero el camino.*

*A mis alumnos, Carlos Sosa, María José, Daniel, Erik, José Manuel, Abigail y Octavio, cuyo entusiasmo y dedicación me impulsaron a esforzarme por ser un mejor guía.*

*Al Dr. Irving Israel Ruiz López por su colaboración y por ser una inspiración desde el momento en que comencé esta etapa.*

*Al Dr. Gamaliel Che Galicia por su tiempo y sus valiosas aportaciones para la realización de este trabajo.*

---

*Al Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre, por su amistad, guía y su invaluable enseñanza durante esta etapa. Espero que podamos continuar colaborando en tiempos próximos, fortaleciendo el trabajo que hemos iniciado y consolidando nuevas oportunidades de aprendizaje y desarrollo.*

*A la Dra. Mayra Ruiz Reyes, por su guía, paciencia y dedicación inquebrantable. Su orientación académica y su confianza constante en mí han sido pilares esenciales para llegar hasta aquí. Desde la licenciatura me ha brindado no solo conocimiento, sino también un ejemplo profundo de compromiso, ética y pasión por la ciencia y la academia. Gracias a su apoyo, a su amistad y a su fe en mis capacidades, he podido formarme y crecer hasta convertirme en alguien dentro del ámbito académico. Gracias por acompañarme, por impulsarme y, sobre todo, por soportarme incluso en mis peores momentos. Este logro también es suyo.*

*Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado durante el periodo 2023–2025 para llevar a cabo mis estudios de posgrado y hacer posible esta investigación.*

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Índice</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b>	<b>X</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XI</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema . . . . .	4
1.2 Justificación . . . . .	5
1.3 Hipótesis . . . . .	6
1.4 Objetivo General y Específicos . . . . .	6
1.4.1 Objetivo General . . . . .	6
1.4.2 Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>2 Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1 Hidrógeno . . . . .	8
2.1.1 Electrólisis del Agua . . . . .	11
2.2 Combustión . . . . .	16
2.2.1 Clasificación de Llamas . . . . .	18
2.2.2 Estructura de Llama . . . . .	22
2.2.3 Características de Llama . . . . .	23
2.2.4 Estabilidad de Combustión . . . . .	29
2.3 Parámetros de Desempeño . . . . .	33
2.3.1 Eficiencia Térmica . . . . .	33

---

2.3.2	Sostenimiento del Gradiente Térmico . . . . .	34
2.4	Análisis de Imágenes . . . . .	36
2.4.1	Espacios de Color . . . . .	36
2.4.2	Cuantificación de Color . . . . .	39
2.5	Índice de Estabilidad de Combustión . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>46</b>
3.1	Sistema Experimental . . . . .	47
3.1.1	Pruebas Experimentales Preliminares . . . . .	50
3.1.2	Sistema de Monitoreo . . . . .	52
3.2	Análisis Térmico de la Llama . . . . .	57
3.3	Parámetros de Desempeño . . . . .	60
3.4	Caracterización Morfológica Ante Oscilaciones de Flujo . . . . .	62
3.4.1	Cuantificación de Color . . . . .	63
3.4.2	Transformación del Espacio de Color . . . . .	65
3.5	Índice de Estabilidad de Combustión . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>68</b>
4.1	Sistema de Monitoreo . . . . .	69
4.1.1	Pruebas Experimentales Preliminares . . . . .	69
4.2	Análisis Térmico de la Llama . . . . .	73
4.3	Sostenimiento del Gradiente Térmico . . . . .	87
4.4	Eficiencia Térmica . . . . .	90
4.5	Caracterización Morfológica Ante Oscilaciones de Flujo . . . . .	92
4.5.1	Análisis de Imágenes de Llama . . . . .	95
4.5.2	Dimensiones de Llama . . . . .	96
4.5.3	Cuantificación de Color . . . . .	98
4.5.4	Espacio de Color HSI . . . . .	101
4.6	Índice de Estabilidad de Combustión . . . . .	102
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>107</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Parámetros Estadísticos (HSI)</b>	<b>126</b>

---

# Índice de Figuras

2.1	Altura de Llama ( $h_f$ ) vs Número de Reynolds ( $Re$ ) en Llamas de Difusión. . . . .	19
2.2	Representación 3D del espacio de color RGB. . . . .	37
2.3	Espacio de Color HSI. . . . .	38
3.1	Sistema de Reacción Prototipo. . . . .	47
3.2	Diagrama Esquemático de la Boquilla. . . . .	48
3.3	Procesos de Transferencia de Calor del Sistema Experimental. . . . .	48
3.4	Sistema Experimental Preliminar . . . . .	50
3.5	Geolocalización de la Estación <i>RAMM07 - BUAP CU San Manuel</i> ” . . . . .	51
3.6	Diagrama del Sistema de Monitoreo y el Procesamiento de Señales. . . . .	54
3.7	Secuencia de cálculo para el Sensor de Presión . . . . .	55
3.8	Curva de Ajuste del Sensor de Presión . . . . .	56
3.9	Metodología Experimental para el Análisis Térmico de la Llama . . . . .	57
3.10	Algoritmo de Cuantificación de Color . . . . .	64
3.11	Diagrama de Bloques del Método de Evaluación de Estabilidad de Llama. . . . .	66
4.1	Consistencia Experimental Entre Pruebas . . . . .	70
4.2	Pruebas Experimentales Preliminares (parte 1) . . . . .	71
4.2	Pruebas Experimentales Preliminares (continuación) . . . . .	72
4.3	Presión vs Flujo (Área de Succión de Aire al 100 %). . . . .	74
4.4	Presión vs Flujo (Área de Succión de Aire al 50 %). . . . .	76
4.5	Dispersión del Perfil Térmico Promedio del Primer Sensor de Temperatura (Área de Succión de Aire a 100 %) . . . . .	78
4.6	Dispersión del Perfil Térmico Promedio del Primer Sensor de Temperatura (Área de Succión de Aire a 50 %) . . . . .	79
4.7	Temperatura Máxima Promedio vs Apertura de Válvula Para Ambas Área de Succión. . . . .	80
4.8	Número de Reynolds vs Velocidad del Gas para Ambas Áreas de Succión de Aire . . . . .	82
4.9	Perfiles de Temperatura Experimental en la Cámara de Combustión . . . . .	83
4.10	Ajuste Modelo para los Perfiles Térmicos con Área de Succión al 100 %. . . . .	86

4.11 Ajuste Modelo para los Perfiles Térmicos con Área de Succión al 50 %.	86
4.12 Gradiente de Temperatura con Respecto a la Posición.	87
4.13 Sostenimiento del Gradiente Térmico	88
4.14 Eficiencia Térmica	90
4.15 Presión Manométrica vs Flujo Volumétrico (Oscilaciones)	92
4.16 Perfiles de Temperatura en la Cámara de Combustión ante Oscilaciones de Presión.	93
4.17 Perfil de Temperatura Promedio para Tres Ciclos de Producción-Combustión.	94
4.18 Binarización para Tres Ciclos de Producción-Combustión	95
4.19 Segmentación de RGB para Tres Ciclos de Producción-Combustión.	96
4.20 Segmentación RGB de la Cuantificación de Colores para Tres Ciclos de Producción-Combustión.	98
4.21 Segmentación HSI para Tres Ciclos de Producción-Combustión.	101
4.22 Índice de Estabilidad de Combustión vs Altura de Llama ( $H_f$ )	102
4.23 Índice de Estabilidad de Combustión vs Ancho de Llama ( $W_f$ )	103
4.24 índice de Estabilidad de Combustión vs Área de Frente de Llama ( $A_f$ )	104
4.25 Índice de Estabilidad de Combustión vs Presión Manométrica	105
4.26 Índice de Estabilidad de Combustión vs Sostenimiento Térmico	106

# Índice de Ecuaciones

2.1	Electrólisis del Agua (Reacción Completa)	11
2.2	Electrólisis del Agua (Reacción en el Ánodo)	11
2.3	Electrólisis del Agua (Reacción en el Cátodo)	11
2.4	Reacción General de un Proceso de Combustión	16
2.5	Reacción del Proceso de Combustión del Hidrógeno	16
2.6	Número de Reynolds	20
2.7	Número de Reynolds Correlación de Chakraborty Cant	20
2.8	Número de Reynolds Correlación de Sunderland	21
2.9	Número de Reynolds Correlación de Shi	21
2.10	Eficiencia Térmica.	34
2.11	Eficiencia Térmica: Correlación de Ahmandi.	34
2.12	Calor del Sistema: Correlación de Ahmandi.	34
2.13	Calor del Combustible: Correlación de Ahmandi.	34
2.14	Sostenimiento Térmico	35
2.15	Error Cuadrático Medio	41
2.16	Relación Señal-Ruido Máxima	42
2.17	Índice de Similitud Estructural	42
2.18	Similitud Estructural Ponderada de Cuatro Componentes	42
2.19	Raíz del Error Cuadrático Medio	43
3.1	Curva de Ajuste del Sensor de Presión	56
3.2	Función Temperatura Adimensional	58
3.3	Balance General de Energía	58
3.4	Balance de Energía de la Cámara de Combustión	59
3.5	Condiciones de Frontera del Balance de Energía	59
3.6	Temperatura Adimensional	59
3.7	Distancia Axial Adimensional	59
3.8	Balance de Energía Adimensional de la Cámara de Combustión	59
3.9	Coefficiente Adimensional de Conducción	59
3.10	Coefficiente Adimensional de Convección	59

3.11 Condiciones de Frontera Adimensionales . . . . .	59
3.12 Solución General del Balance de Energía Adimensional del Sistema . . . . .	60
3.13 Constante 1 del Balance General de Energía Adimensional del Sistema . . . . .	60
3.14 Constante 2 del Balance General de Energía Adimensional del Sistema . . . . .	60
3.15 Balance de Energía de Y.Zhang. . . . .	60
3.16 Eficiencia Térmica . . . . .	61
3.17 Calor Generado por el Sistema . . . . .	61
3.18 Calor Generado por el Combustible . . . . .	61
3.19 Transformación del Espacio de Color RGB a HSI: Intensidad . . . . .	65
3.20 Transformación del Espacio de Color RGB a HSI: Saturación . . . . .	65
3.21 Transformación del Espacio de Color RGB a HSI: Tono . . . . .	65
3.22 Índice de Estabilidad de Combustión . . . . .	67
4.1 Caudal como Función de la Presión Operativa del Reactor de Electrólisis . . . . .	73
4.2 Correlación Lineal entre el Número de Reynolds y Velocidad del Gas . . . . .	82
4.3 Solución Explícita del Balance de Energía Adimensional . . . . .	84

# Índice de Tablas

2.1	Comparación de Propiedades Para Diferentes Combustibles. . . . .	8
2.2	Clasificación de los Colores del Hidrógeno. . . . .	10
2.3	Características Técnicas de las Principales Tecnologías de Electrólisis. . . . .	12
2.4	Investigaciones Relevantes de Geometría de Llama y Distribución de Temperaturas. . . . .	24
2.5	Investigaciones Relevantes de Monitoreo de Llama. . . . .	29
3.1	Propiedades Térmicas y Mecánicas de Materiales de Construcción . . . . .	52
3.2	Rangos de Operación del Sistema Experimental . . . . .	52
3.3	Especificaciones Técnicas de los Sensores. . . . .	53
3.4	Posición de los Sensores. . . . .	54
3.5	Diseño de Experimentos . . . . .	57
3.6	Condiciones Experimentales Caracterización Morfológica . . . . .	62
4.1	Condiciones Ambientales de Pruebas Experimentales Preliminares. . . . .	69
4.2	Valores Estadísticos de las Pruebas Preliminares . . . . .	70
4.3	Condiciones Experimentales (Área de Succión de Aire al 100 %) . . . . .	73
4.4	Condiciones Experimentales (Área de Succión de Aire al 50 %) . . . . .	73
4.5	Condiciones de Experimentos Promedio. . . . .	80
4.6	Número de Reynolds Para Todos los Experimentos. . . . .	81
4.7	Comparación de los Valores $\alpha$ , $\beta$ , $\alpha_z$ y $\beta_z$ para un Área de Succión de Aire del 100 %. . . . .	85
4.8	Comparación de los Valores $\alpha$ , $\beta$ , $\alpha_z$ y $\beta_z$ para un Área de Succión de Aire del 50 %. . . . .	85
4.9	Dimensiones de Llama para Tres Ciclos de Producción-Combustión. . . . .	96
4.10	Cuantificación de Color para Tres Ciclos de Producción-Combustión . . . . .	98
4.11	Métricas de Evaluación de Calidad de Imágenes con Referencia. . . . .	99
4.12	Métricas de Evaluación de Calidad de Imágenes sin Referencia. . . . .	100
A.1	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (1° Llama) . . . . .	127
A.2	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (2° Llama) . . . . .	128
A.3	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (3° Llama) . . . . .	129

A.4	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (4° Llama)	130
A.5	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (5° Llama)	131
A.6	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (6° Llama)	132
A.7	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (7° Llama)	133
A.8	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (8° Llama)	134
A.9	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (9° Llama)	135
A.10	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (10° Llama)	136
A.11	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (11° Llama)	137
A.12	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (12° Llama)	138
A.13	Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (13° Llama)	139

# Capítulo 1

---

## Introducción

---

El uso de combustibles fósiles como principal fuente de energía ha contribuido significativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, provocando un daño ambiental considerable y cambio climático (Sikiru et al., 2024). Debido a esta amenaza, el acuerdo de París tiene como misión, a largo plazo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del sector energético, con la finalidad de limitar el calentamiento global a menos de 2 °C por encima de los niveles preindustriales (UNFCCC, 2015), sin embargo, actualmente la temperatura media mundial ya está alrededor de 1.2 °C por encima de los niveles preindustriales, por lo que reducir las emisiones no es la única razón clave (IEA, 2023b).

Esto ha propiciado que organizaciones e instituciones a nivel mundial desarrollen tecnologías avanzadas para la generación de energía, haciendo uso de fuentes renovables y combustibles verdes que sirvan como alternativa a los combustibles fósiles, con el objetivo de reducir las emisiones de carbono sin sacrificar la generación y demanda de energía (Dawood et al., 2020; Du et al., 2022), gestionando la intermitencia de los recursos renovables y que además sean de fácil acceso (Hassan et al., 2024; Rusman & Dahari, 2016).

Actualmente, en el sector productivo, los procesos de combustión son ampliamente utilizados para la generación de energía, principalmente a través de quemadores de fuego directo e indirecto, donde la distribución de temperatura se ve afectada por la geometría del equipo, las características del combustible, el flujo del fluido de trabajo, las condiciones de combustión, la estructura del quemador, entre otros factores (Y. Zhang et al., 2016). En sistemas de combustión convencionales, los quemadores han sido diseñados y optimizados para una mayor eficiencia haciendo uso de combustibles convencionales, donde la proporción combustible-oxidante se ajusta sin comprometer la estabilidad de la llama, la eficiencia del quemador y la morfología de la llama, por lo que el uso de combustibles alternativos introduce nuevas variables que actúan como perturbación del proceso, principalmente aquellas relacionadas con la naturaleza intermitente del uso de energías renovables, las cuales pueden favorecer la inestabilidad del proceso de combustión (D. Zhao et al., 2019).

En este contexto, el hidrógeno ha sido considerado un fuerte candidato como combustible alternativo debido a su alta liberación de calor y versatilidad en múltiples aplicaciones, además

de su alto potencial como fuente de energía para descarbonizar los sistemas energéticos (Ashari et al., 2024; S. Wang et al., 2024), sin embargo, su implementación en sistemas de combustión enfrenta desafíos técnicos que requieren un análisis detallado (Qi et al., 2024). Aunado a ello, ante las problemáticas que surgen relacionadas con la infraestructura de hidrógeno intersectorial, la descentralización de procesos integrados producción-combustión se presenta como una alternativa para lograr que el hidrógeno contribuya a la transición energética de manera sostenible, integrando energías renovables a los procesos de producción. Sin embargo, las variaciones en el suministro energético ocurren de manera fluctuante e intermitente, afectando la eficiencia del proceso de producción (Tello et al., 2025). Por lo que fuertes fluctuaciones en la corriente no solamente demandarán un mayor consumo de energía eléctrica, sino que provocará cambios en las condiciones internas del electrolizador, resultando en la degradación de los electrodos, afectando la calidad del hidrógeno producido (Kojima et al., 2023; Speckmann et al., 2019). De manera que cambios en la composición del gas producido provocará fluctuaciones en la liberación de calor, generando inestabilidad en la combustión, junto con oscilaciones de presión y flujo (Mu et al., 2022).

Retomando, la mayoría de los estudios de sistemas de combustión de hidrógeno consideran flujos constantes del gas combustible, limitando su aplicación a procesos abastecidos con energías renovables como fuente de energía primaria, por lo que el presente estudio busca analizar el impacto de las oscilaciones en el flujo de gas  $H_2/O_2$  sobre la estabilidad térmica y morfológica de la llama en un quemador prototipo de hidrógeno, aportando información relevante sin introducir simplificaciones en la producción de hidrógeno. Mediante un enfoque experimental, se desarrollará un sistema de monitoreo automatizado para la caracterización térmica de la combustión, permitiendo evaluar la eficiencia térmica del sistema y su respuesta ante condiciones operativas variables, analizando la distribución térmica de la llama y su morfología para establecer criterios para el diseño de tecnologías más robustas y eficientes, capaces de operar bajo condiciones de suministro variables debido a la naturaleza cambiante de la producción de hidrógeno verde.

## 1.1. Planteamiento del Problema

En los procesos de generación de calor, el hidrógeno presenta ventajas inherentes debido a sus propiedades únicas, sin embargo, el límite de inflamabilidad de las mezclas que contienen hidrógeno y oxidantes está determinado por varios factores como la energía de ignición, la presión, la temperatura, la presencia de diluyentes, así como las dimensiones y configuración de la instalación o equipo. Aunado a ello, ante las problemáticas que surgen relacionadas con la infraestructura de hidrógeno intersectorial, la descentralización de procesos integrados producción-combustión se ha presentado como una alternativa para lograr que el hidrógeno contribuya a la transición energética de manera sostenible, integrando energías renovables a los procesos de producción.

Por otra parte, en el uso de combustibles convencionales existen características que generalmente determinan el diseño de quemadores tales como el estado del combustible (Gas, Líquido o Sólido), la forma de la llama (Plana o Redonda), la estrategia de mezclado optimizando la proporción combustible-oxidante, la orientación del quemador con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso de combustión reduciendo relativamente las emisiones contaminantes. Sin embargo, el uso de gas  $H_2/O_2$  presenta grandes desafíos en términos de producción, almacenamiento y distribución previos a la combustión. Además, aumentar la eficiencia de su combustión sin superar los límites térmicos de los materiales de construcción resulta paradójico. Por esta razón, la mayoría de los estudios se enfocan en reducir las barreras de integración del hidrógeno, analizando sus efectos en el enriquecimiento del gas natural, el cual está ampliamente disponible en sistemas térmicos, con el objetivo de mejorar la estabilidad de la llama. Asimismo, debido a la naturaleza del gas  $H_2/O_2$  y al requerimiento de aire en el quemador para estabilizar el proceso de combustión, se requieren de estudios específicos sobre el diseño del quemador haciendo uso de combustibles alternativos.

Por otro lado, los estudios reportados en la literatura relacionan la eficiencia de la combustión con la estabilidad y temperatura de la llama a condiciones de flujo estable, sin embargo, esto puede limitar la comprensión del efecto que presentan las perturbaciones externas e internas en el desempeño del equipo cuando la disponibilidad de combustible-oxidante es variable, problema

que se presentaría en los procesos de producción-combustión de hidrógeno verde en sistemas descentralizados dependientes de energías renovables. En este sentido surge la necesidad de estudiar el impacto de las variaciones en suministro de gas  $H_2/O_2$  en el desempeño de sistemas producción-combustión.

## 1.2. Justificación

Los procesos de combustión son ampliamente empleados en el sector productivo mediante el uso de quemadores de fuego directo e indirecto, dentro de los cuales podemos destacar los hornos. Hablando del mecanismo de transferencia de calor, la distribución de la temperatura en el horno se ve afectada por la geometría del horno, las características del combustible, el flujo del fluido de trabajo, las condiciones de combustión, la estructura del quemador, entre otros factores. Aunado a esto, el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno verde introduce nuevas variables que actúan como perturbación al proceso, principalmente aquellas relacionadas con la naturaleza intermitente del uso de energía renovables, las cuales pueden favorecer la inestabilidad del proceso de combustión.

En quemadores atmosféricos, variables como el flujo y la presión de la mezcla de gases de descarga están relacionadas tanto con la eficiencia del quemador como con la morfología de la llama.

Por lo que el estudio experimental de los fenómenos ligados a la inestabilidad del proceso de combustión, como es el efecto de las variaciones en la disponibilidad de gas combustible ( $H_2/O_2$ ) en quemadores a baja presión con aire en sistemas de producción-combustión permitirá establecer una línea base para el diseño y mejora de tecnologías que este sujetos a fuentes de energía variable.

### 1.3. Hipótesis

La inestabilidad del proceso de combustión no solo se ve afectada por la composición química del combustible o la geometría de los quemadores, sino también por los cambios oscilantes de flujo debido a la naturaleza del uso de energías renovables o medidas de seguridad, por lo que es viable correlacionar las condiciones operativas del desempeño de un quemador prototipo mediante las características térmicas y morfológicas de la llama, ya que están directamente relacionadas con la fenomenología del proceso de combustión.

### 1.4. Objetivo General y Específicos

#### 1.4.1. Objetivo General

Analizar el desempeño térmico de la llama y su morfología en un quemador prototipo de  $H_2$  ante oscilaciones en flujo de descarga del gas  $H_2/O_2$ .

#### 1.4.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar un sistema de monitoreo automatizado para el seguimiento de las condiciones térmicas en el espacio de trabajo del quemador.
2. Realizar el análisis térmico de la llama mediante la distribución de temperaturas en el espacio de trabajo del quemador.
3. Determinar la eficiencia térmica ( $\eta$ ) y sostenimiento del gradiente térmico ( $\Delta T$ ) en la cámara de combustión a partir de datos teóricos-experimentales.
4. Caracterizar la morfología de la llama ante oscilaciones en el flujo del gas  $H_2/O_2$ .

# Capítulo 2

---

## Antecedentes

---

## 2.1. Hidrógeno

El hidrógeno ( $H_2$ ) es un gas inflamable, incoloro e inodoro en condiciones estándar de temperatura y presión. A pesar de ser el elemento más abundante en el universo nunca se encuentra de forma pura en la naturaleza. Al compararlo con otros combustibles convencionales, como se muestra en la Tabla 2.1, destacan varias ventajas: su alto poder energético, derivado de su elevada densidad de energética (cantidad de energía contenida en cierta cantidad de materia o volumen); su amplia velocidad de llama, favoreciendo una combustión rápida y completa; y un amplio rango de inflamabilidad (4 – 75 %), lo que permite su ignición en condiciones donde otros combustibles, como el metano (5 – 15 %), no lo harían. Además, su baja densidad y alta difusividad facilitan la dispersión en caso de fuga, reduciendo el riesgo de acumulación. Sin embargo, el hidrógeno también presenta desventajas cruciales, su baja densidad volumétrica obliga a recurrir al almacenamiento de alta presión o en forma líquida criogénica, dado que su punto de ebullición es de  $-253\text{ }^\circ\text{C}$ ; su alta velocidad de llama y amplio rango de inflamabilidad, beneficiosos en términos de eficiencia, incrementan el riesgo de retroceso de llama o explosiones si no se controlan adecuadamente, además, su alta difusividad favorece fugas difíciles de detectar, permitiendo al gas escapar por poros microscópicos (Ayub et al., 2024; Kumar & Lim, 2022).

Tabla 2.1: Comparación de Propiedades Para Diferentes Combustibles.

Propiedad	Hidrógeno	Gas de Brown	Metano	Propano	Butano	Biogás
Formula Química	$H_2$	$HHO$	$CH_4$	$C_3H_8$	$C_4H_{10}$	-
Densidad ( $kg \cdot m^{-3}$ )	0.1	0.5	0.7 (g)	0.5	2.5	0.7 - 0.9
Peso Molecular	2.0	12.0	16.0	44.1	58.1	16.6
Poder Calorífico Inferior ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )	119.9	13.2	47.1	45.6	45.3	23.0
Poder Calorífico Superior ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )	142.2	25.9	52.2	50.36	49.1	ND
Velocidad de Llama ( $cm \cdot s^{-1}$ )	265 – 325	265 – 325	42	46	87	20

*Continúa*

Tabla 2.1 (continuación)

Propiedad	Hidrógeno	Gas de Brown	Metano	Propano	Butano	Biogás
Difusividad en Aire ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ )	0.6	0.6	0.3	ND	ND	ND
Relación Estequiométrica Aire-Combustible (AF) en masa	34.3	ND	17.2	15.7	15.5	17
Número de Octanos	+130	ND	100	105	92	130
Temperatura de Autoignición ( $^{\circ}C$ )	585	ND	565	490	287	650
Temperatura Adiabática de Llama ( $^{\circ}C$ )	2254	$\approx 2930$	1963	1980	1970	ND
Punto de Inflamación ( $^{\circ}C$ )	-253	ND	-188	-104	-60	230
Punto de Ebullición ( $^{\circ}C$ )	-253	ND	-161.5	-42	-0.5	ND
Punto de Fusión ( $^{\circ}C$ )	-259	ND	-182	-188	-135	ND
Límites de Inflamabilidad (% de Volumen en aire)	4 – 75	4 – 95	5 – 15	2.1 – 10.1	ND	ND
ND - No Disponible						

Nota: Ali et al., 2024; Bayramoğlu et al., 2023; Chen et al., 2024; Paparao y Murugan, 2021

En el año 2022, la producción de hidrógeno se estimó en 95 millones de toneladas, pero solo el 2 % se produce mediante el uso de electrólisis (IEA, 2023a; Terlouw et al., 2022). Existen diferentes fuentes y tecnologías para la producción de hidrógeno, dependiendo de la ruta de producción se le asigna una categoría de “color”, aunque no existe un acuerdo universal sobre un código de colores, existe una necesidad de diferenciar la fuente y el proceso de producción (Incer-Valverde et al., 2023). Como puede observarse en Tabla 2.2, las principales fuentes para la producción de hidrógeno son los combustibles fósiles, la energía nuclear y las energías renovables.

Tabla 2.2: Clasificación de los Colores del Hidrógeno.

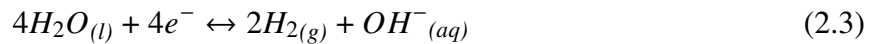
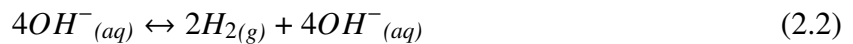
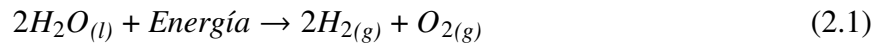
Fuente de Energía	Fuente de $H_2$	Tecnología/Proceso de Producción	Emisiones de $CO_2$	Clasificación (Color)
Electricidad obtenida por combustibles fósiles	Gas Natural	Reformado de Gas Natural	Altas	Hidrógeno Gris
		Pirólisis	Sin Emisiones Directas de $CO_2$	Hidrógeno Turquesa
	Gas Natural/Biomasa	Reformado / Gásificación	Bajas	Hidrógeno Azul
	Carbón de Lignito/Biomasa	Gasificación	Altas	Hidrógeno Café
Nuclear	Agua	Termólisis / Procesos Termoquímicos	Sin Emisiones Directas de $CO_2$	Hidrógeno Rojo
			Sin Emisiones Directas de $CO_2$	Hidrógeno Rosa
		Electrólisis	Depende de la Combinación Eléctrica	Hidrógeno Naranja
Mezcla de Red Eléctrica				
Energía Solar			Sin Emisiones Directas de $CO_2$	Hidrógeno Amarillo
Energía Renovable			Sin Emisiones Directas de $CO_2$	Hidrógeno Verde

Nota: Ajanovic et al., 2022; Incer-Valverde et al., 2023; Sikiru et al., 2024; Yu et al., 2021

Se proyecta que para el año 2050, el hidrógeno verde (o hidrógeno renovable) abastezca cerca del 24 % del requerimiento energético mundial (Woods et al., 2022). Actualmente es el método de producción más respetuoso con el medio ambiente, ya que mitiga los impactos ambientales generados por los productos petrolíferos. Esto ha despertado un gran interés, al permitir el desarrollo de sistemas energéticos y de transporte más sostenibles mediante electrólisis del agua impulsada por energías renovables (Ajanovic et al., 2022; dos Santos et al., 2017; Li et al., 2026).

### 2.1.1. Electrólisis del Agua

La electrólisis del agua es considerada la tecnología más madura e importante para la producción de hidrógeno alimentado por energías renovables (Sebbahi et al., 2024). El proceso de electrólisis consiste en provocar la división de la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno por medio del suministro de energía externa como es la corriente eléctrica, las reacciones involucradas en el proceso de electrólisis son las siguientes:



Aquellos dispositivos en donde se desarrollan los procesos de electrólisis son llamados electrolizadores, estos son constituidos por al menos una celda de electrólisis, donde son colocados dos electrodos fabricados comúnmente en materiales conductores, como níquel, separados por una solución electrolítica (Dahbi et al., 2024), estos dispositivos se dividen en al menos tres tecnologías principales:

- Electrólisis de agua alcalina (*AWE*).
- Electrólisis de membrana de electrolito polimérico (*PEM*).
- Celda electrolizadora de óxido sólido (*SOEC*).

La Tabla 2.3 muestra un resumen de las características técnicas de las tecnologías de electrólisis, observándose que los electrolizadores de agua alcalina es la tecnología más simple y madura disponible para la producción de hidrógeno, su principal ventaja radica en su bajo costo relativo

y su prolongada vida útil. Aunque actualmente son capaces de generar hidrógeno en volúmenes significativos, requieren un funcionamiento continuo para evitar daños en los equipos (Hage et al., 2020). No obstante, para satisfacer la creciente demanda de hidrógeno en una economía basada en este combustible, es esencial aumentar significativamente la capacidad de producción o desarrollar celdas de electrólisis alcalina con mayor eficiencia (Woods et al., 2022). Por otro lado, los electrolizadores de membrana de electrolito polimérico (*PEM*) ofrecen mayor eficiencia y pureza del hidrógeno, aunque esto conlleva costos más altos, además de pérdidas óhmicas debido al grosor de las membranas (Carmo et al., 2013; Fahr et al., 2024; Hemauer et al., 2023). Las celdas de electrólisis de óxido sólido (*SOEC*) operan a altas temperaturas y logran eficiencias sobresalientes, sin embargo, el costo de producción es muy alto, representando hasta un 40 % del costo total de producción con esta tecnología (Jang et al., 2022; Lahrichi et al., 2024; Q. Yang et al., 2024), por lo que la electrólisis alcalina (*AWE*) es la tecnología que sigue teniendo más relevancia en las líneas de investigación permitiendo el uso de catalizadores, separadores y capas de transporte porosas de menor costo resultando en ventajas en comparación con las otras tecnologías (Badgett et al., 2022), permitiendo la implementación de procesos sustentables de hidrógeno verde.

Tabla 2.3: Características Técnicas de las Principales Tecnologías de Electrólisis.

Característica	Agua Alcalina (AWE)	Membrana de Electrolito Polimérico (PEM)	de Óxido Sólido (SOEC)
Reacción Anódica	$2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$	$H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
Reacción Catódica	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
Reacción General	$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$	$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$
Electrolito	KOH/NaOH (5M)	Electrolito de Polimero Sólido (PFSA)	Zirconia Estabilizada con Itria (YSZ)
Separador	Asbestos / Zircón / Ni	Nafión®	Electrolito Sólido YSZ
Electrodo / Catalizador ( $H_2$ )	SS Perforado Recubierto de Ni	Óxido de Iridio	Ni / YSZ

Continúa

Tabla 2.3 (continuación)

Característica	Agua Alcalina (AWE)	Membrana de Electrólito Polimérico (PEM)	de Óxido Sólido (SOEC)
Electrodo / Catalizador ( $O_2$ )	SS Perforado Recubierto de Ni	Carbono platino	Perovskitas (LSCF, LSM) (La,Sr,Co,FE) (La,Sr,Mn)
Capa de Difusión de Gas	Malla de Níquel	Malla de Titanio / Tela de carbono	Malla / Espuma de níquel
Placas Bipolares	SS / SS recubierto de Ni	Platino / Titanio Recubierto de Oro o Titanio	SS Recubierto de Cobalto
Densidad de Corriente Nominal ( $A\ cm^{-1}$ )	0.2 - 0.8	1.0 - 2.0	0.3 - 1.0
Rango de Voltaje (Límites) (V)	1.4 - 3.0	1.4 - 2.5	1.0 - 1.5
Temperatura de Operación ( $^{\circ}C$ )	70 - 90	50 - 80	700 - 850
Presión de Celda Electroquímica (bar)	30	70	1.0
Pureza del Hidrógeno	99.5 - 99.9998 %	99.9-99.9999 %	99.9 %
Eficiencia	50 - 78 %	50 - 83 %	89 % (Laboratorio)
Vida Útil (h)	60,000	50,000 - 80,000	20,000
Estado del Desarrollo	Maduro	Comercial	Investigación y Desarrollo
Área de Electrodo ( $cm^2$ )	10,000 - 30,000	1,500	200
Costo de Capital (Celda) Mínimo 1 MW	$270\left(\frac{USD}{kW}\right)$	$400\left(\frac{USD}{kW}\right)$	$2000\left(\frac{USD}{kW}\right)$
Costo de Capital (Celda) Mínimo 10 W	$500-1000\left(\frac{USD}{kW}\right)$	$700-1400\left(\frac{USD}{kW}\right)$	Desconocido

Nota: Carmo et al., 2013; Dahbi et al., 2024; Kumar y Lim, 2022; Lahrichi et al., 2024

El resultado de la electrólisis de agua alcalina es conocido como gas de Brown, gas de hidroxilo o gas HHO, una combinación de hidrógeno y oxígeno en relación estequiométrica de 2:1 (Paparao & Murugan, 2021), siendo otra forma del hidrógeno que soluciona problemáticas de almacenamiento tales como temperaturas bajas y altas presiones.

La producción del gas HHO está condicionada por factores internos de las celdas electrolíticas, como es la concentración de la solución de electrolito, los parámetros de operación de la celda (presión y temperatura), el área de superficie del electrodo, así como la corriente eléctrica, observándose que la corrosión de los electrodos es la principal problemática en esta tecnología (El-Shafie, 2023; Emam et al., 2024). Para su implementación, las celdas electrolíticas de agua alcalina se clasifican en dos configuraciones principales:

- Electrolizador de Celda Húmeda
- Electrolizador de Celda Seca

Los electrolizadores de celda húmeda mantienen a los electrodos sumergidos en la solución alcalina, son más económicos y de fácil construcción en comparación con su equivalente, además de fácil mantenimiento y limpieza, debido a que solo se tiene que remplazar todo el electrolito, por su parte, los electrolizadores de celda seca mantienen un flujo de solución alcalina a través de los electrodos, no sumergidos completamente, permitiendo ser más compacto y relativamente seguro en comparación que su competencia, sin embargo resulta más difícil de fabricar, además la limpieza de las placas para evitar zonas secas que aumenten la resistencia implica el desmontaje del equipo resultando en mantenimientos más complicados (Ismail et al., 2018; Rodriguez-Castillo et al., 2023; Subramanian & Thangavel, 2020).

En cuanto a términos de rendimiento, la celda húmeda produce mayor cantidad de gas que la celda seca para las mismas condiciones de diseño, sin embargo, la celda seca reduce la corrosión de los electrodos, así como el espacio de trabajo (Soly et al., 2021). Las celdas húmedas mantienen la conductividad estable lo que resulta prioridad en términos de investigación, por lo que, en este trabajo de tesis, la celda electrolítica utilizada es tipo de celda húmeda.

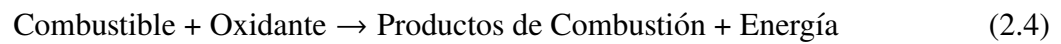
Existen una gran variedad de aplicaciones sobre el uso de hidrógeno generado por electrolizadores, destacando las “Celdas Combustibles”, una tecnología basada en hidrógeno, que permiten generar electricidad de manera rápida y fiable, asegurando un suministro constante incluso cuando la generación renovable es intermitente. No obstante, su marcada dependencia del hidrógeno (úni-

co combustible que utilizan) genera actualmente grandes variaciones económicas, sin sumar los grandes retos que involucra el almacenamiento y suministro de hidrógeno in situ (Alinejad et al., 2024; Hamedani et al., 2024).

La adopción generalizada del hidrógeno enfrenta importantes desafíos técnicos y de seguridad, tanto en el almacenamiento y las redes de transporte como en su manejo por parte del usuario final, debido a una velocidad de propagación de llama superior y límites de inflamabilidad mucho más amplios que los combustibles convencionales (Tabla 2.1). En este contexto, la implementación de sistemas descentralizados, capaces de producir y utilizar el hidrógeno in situ, podría reducir de forma significativa los riesgos y las complicaciones asociadas al almacenamiento y transporte de hidrógeno o gas HHO (Handique et al., 2024; Qi et al., 2024).

## 2.2. Combustión

El proceso de combustión, tal como lo menciona su nombre, es un proceso químico ocurrido entre una especie combustible y otra oxidante, que al interactuar generan una reacción exotérmica desprendiendo energía de manera controlada y calor, en la mayoría de los casos, este proceso de combustión genera luminiscencia en forma de llama. La reacción química que representa a los procesos de combustión es la siguiente:



Este mecanismo permite transformar la energía química almacenada en el combustible a través de la ruptura de enlaces químicos produciendo energía térmica, que puede aprovecharse para diversas aplicaciones, como la generación de energía mecánica.

La llama es el resultado visible del proceso de combustión, y se caracteriza por una zona con cambios drásticos de temperatura y concentración. Está constituida por un proceso complejo de reacciones químicas que involucra la interacción del flujo de fluido y la transferencia de calor y masa. Estos procesos determinan fenómenos como la ignición, la propagación y la velocidad de combustión, así como las características y la morfología de la llama generada (L. Zhou, 2018). La intensidad y luminosidad de la llama pueden ser indicativas del calor liberado por el combustible mientras que su forma sirve como indicador del mecanismo de disipación del calor (Reyes et al., 2021).

En el caso del hidrógeno, el proceso de combustión es altamente exotérmico, generando como subproducto principal vapor de agua, tal y como se muestra en la ecuación siguiente:



Su proceso de combustión es altamente eficiente, ya que no produce emisiones de carbono, teniendo un impacto ambiental mínimo, además, si se mezcla con otros combustibles, el hidrógeno

logra mitigar la formación de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y mejorar la eficiencia del proceso de combustión (Habib et al., 2024; Haro-Zamora, 2023; X. Sun et al., 2024).

Además, en procesos industriales que necesiten de altas temperaturas, la combustión con oxígeno, incluyendo el uso de gas *HHO* reduce de manera notable la demanda energética, cantidad total de energía térmica necesaria para alcanzar y mantener las condiciones operativas específicas del proceso, al aumentar la temperatura de la llama y la eficiencia general del proceso (Daurer et al., 2024). Las llamas de hidrógeno apenas son visibles a simple vista, numéricamente representan un alto costo computacional debido a fino espesor laminar que tiene ( $\delta_t \sim 0.35mm$ ), además en comparación con los combustibles fósiles, los datos experimentales y numéricos reportados en la literatura de la combustión de hidrógeno son escasos (Ballossier et al., 2024).

### 2.2.1. Clasificación de Llamas

Las llamas que se propagan desde un quemador o libremente y que viajan en una mezcla de gas inicialmente inactiva se denominan llamas estacionarias, teniendo dos tipos generales (El-Mahallawy & Habik, 2002):

- Llamas Premezcladas.
  - Llama Premezclada Laminar.
  - Llama Premezclada Turbulenta.
- Llamas de Difusión.
  - Llama Laminar.
  - Llama Transicional.
  - Llama Turbulenta (Tipo Jet).

En llamas premezcladas, los reactivos se combinan antes de acercarse a la zona de la llama, en cambio, las llamas de difusión tienen la mezcla de combustible y aire en la interfaz de la combustión.

La subclasificación de las llamas de premezcla es determinada por el régimen de flujo del fluido, cuando se tiene un régimen laminar, la velocidad y los escalares, como la temperatura, la densidad y la composición de la mezcla mantienen valores bien definidos, dando como resultado un frente de llama bien definido. Por el contrario, el régimen turbulento se caracteriza por fluctuaciones continuas de velocidad, afectando por consiguiente a los escalares, estas fluctuaciones son consecuencia de los vórtices generados por la cizalladura dentro del flujo, el crecimiento de estos vórtices es el resultado de la competencia entre el proceso de generación (no lineal) y el proceso de destrucción causado por la disipación viscosa (Warnatz et al., 2006).

Al igual que en las llamas de premezcla, las llamas de difusión se subclasifican de acuerdo con el régimen del flujo del combustible, sin embargo, existe una relación entre la velocidad másica del combustible y la altura de la llama (León-Ruiz et al., 2022).

En régimen laminar, la altura de la llama ( $H_f$ ) es proporcional al flujo de masa de combustible, esta dependencia no es lineal, provocando que la altura de la llama aumente con el incremento del caudal alcanzando un máximo, instante en el que la llama comienza a parpadear en la parte superior empezando su proceso de transición de régimen. Las llamas de tipo transicional presentan una disminución de la altura repentina y constante en conjunto con la expansión de la llama fuera de los límites predefinidos en el régimen laminar. Cuando la altura de la llama se vuelve independiente del caudal, la llama comienza a producir más ruido, menos hollín y una luminosidad reducida convirtiéndola en llama turbulenta, tal y como se muestra en la Figura 2.1.

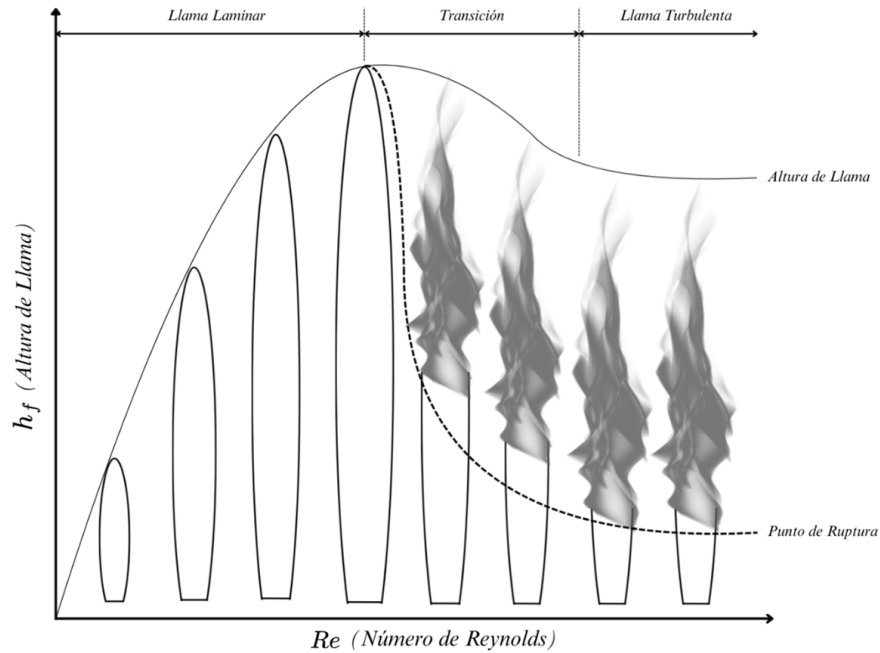


Figura 2.1: Altura de Llama ( $h_f$ ) vs Número de Reynolds ( $Re$ ) en Llamas de Difusión (Hawthorne et al., 1948).

En ese sentido, cuando se supera un valor crítico del número de Reynolds ( $Re$ ), el término de generación excede al amortiguamiento viscoso, produciendo la transición de un flujo laminar a uno turbulento.

### Número de Reynolds ( $Re$ )

Osborne Reynolds estudió en qué condiciones el régimen de un fluido pasa de flujo laminar a turbulento a partir de sus experimentos por medio de bandas de color en tubos de vidrio (Reynolds & Launder, 1997). Reynolds sugirió que pequeñas perturbaciones en flujos laminares, con el tiempo, pueden concluir en inestabilidades de régimen, de manera que el número de Reynolds estableció los límites de la estabilidad.

El número de Reynolds es la relación entre un momento desestabilizador y un efecto viscoso estabilizador, tal y como lo muestra la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu} \quad (2.6)$$

Donde  $\rho$  representa la densidad,  $v$  la velocidad,  $\mu$  la viscosidad del fluido ( $\nu = \mu/\rho$ ), y  $l$  una longitud característica del sistema, la cual depende de la geometría, en cálculos de flujo de tuberías, se utiliza el diámetro para la longitud característica ( $l$ ).

Chakraborty y Cant, 2013, abordaron una serie de experimentos y de simulación numérica, para visualizar los efectos del número de Reynolds en el transporte del modelado de la densidad superficial de llama, establecieron una relación directa entre el número de Reynolds con los número de Damköhler ( $Da$ ) y Karlovitz ( $Ka$ ), definiendo al número de Reynolds como la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho_0 v' l}{\mu_0} \sim Da^2 \cdot Ka^2 \quad (2.7)$$

Donde  $\rho_0$  y  $\mu_0$  son la densidad y viscosidad del gas no quemado respectivamente,  $v'$  representa la raíz medía cuadrática ( $RMS$ ) de la fluctuación de la velocidad turbulenta, y  $l$  es la escala de longitud integral de la turbulencia. Cabe destacar que esta ecuación aplica solo para régimen turbulento.

Por su parte, Sunderland et al., 2008, desarrollaron la relación de escala prevalente para las longitudes de llamas de difusión laminares en quemadores circulares, encontrando un relación lineal entre la longitud de la llama y el número de Reynolds, definen el número de Reynolds de la

siguiente manera:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2.8)$$

Donde  $v$  es la velocidad promedio de la fuente combustible,  $d$  el diámetro de la boquilla del quemador, y  $\nu$  la viscosidad cinemática.

En este trabajo de tesis se optó por la metodología otorgada por Shi et al., 2023, debido a la generalidad de la ecuación, que permite identificar la transición del régimen laminar a turbulento, al igual que se contempla al combustible y al oxidante en los términos de densidad y viscosidad. El cálculo del número de Reynolds se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{D_e \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (2.9)$$

Donde  $D_e$  es el diámetro de la boquilla en (m),  $v$  la velocidad del gas en ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $\rho$  indica la densidad del oxidante y del combustible ( $kg \cdot m^{-3}$ ) y finalmente  $\mu$  representa el coeficiente de viscosidad promedio del combustible y del oxidante ( $Pa \cdot s$ ).

### 2.2.2. Estructura de Llama

En las llamas de premezcla laminar, a medida que el combustible y oxidante fluyen por el quemador se logran mezclar homogéneamente antes de llegar a la boquilla o salida del quemador, de manera que la velocidad del flujo cerca de la pared del quemador es muy baja, permitiendo estabilizar la llama en la parte superior, permitiendo observar las tres zonas que estructuran a una llama que son las siguientes:

- Zona de Pre calentamiento.
- Zona de Reacción.
- Zona de Recombinación

En la zona de recombinación se encuentran los gases de combustión, aquellos gases resultantes de la reacción del proceso de combustión, la zona de pre calentamiento, o zona oscura, representa los gases no quemados antes de comenzar su proceso de reacción. La zona de reacción o zona luminosa es aquella porción donde ocurre la reacción de combustión y la liberación de calor, es la zona en la que se encuentra la temperatura más alta, el color en esta zona depende de la relación aire-combustible (Glassman et al., 2015).

### 2.2.3. Características de Llama

Las características de la llama se refieren a las propiedades que pueden observarse y medirse (Jenkins & Mullinger, 2023). Estas propiedades pueden variar según el tipo de llama y las condiciones en las que se producen, diferentes investigaciones han demostrado con gran cantidad de experimentos que el estudio de llamas debe incluir los siguientes aspectos más importantes (R. Sun et al., 2021):

- Morfología.
  - Color.
  - Geometría (Forma o Estructura).
- Composición Química.
- Termoacústica.
- Distribución de Temperaturas de la Llama.

Dentro de la morfología de la llama, el color puede indicar la temperatura de la llama y la composición química del combustible que se quema, en el caso del hidrógeno, las llamas no contienen carbono, por lo que son casi imperceptibles. La forma de la llama también puede proporcionar información sobre las condiciones de operación del proceso, una llama larga y estrecha puede indicar una alta velocidad del combustible, mientras una llama corta todo lo contrario (Reyes et al., 2021).

La Tabla 2.4 muestra diferentes investigaciones donde se contempla la geometría de la llama así como la distribución de temperatura de la llama, encontrándose una clara disposición de los sensores de temperatura a lo largo del eje central de la llama, en estos experimentos se presentan variaciones en la forma de descarga de la boquilla, variación en las condiciones operativas como es la presión y temperatura de descarga, la influencia de las condiciones ambientales en la llama, la composición y fase del combustible, incluso la manera en que se desarrolla el fenómeno de llama

(por medio de un quemador, una fuga de contenedor a alta presión o una recipiente con combustible líquido). En el caso de los análisis de la morfología de la llama encontramos que el parámetro más importante en estas investigaciones es la correlación entre la geometría adimensional de la llama, como es la altura y el ancho adimensional, siendo función del caudal, la liberación de calor y números adimensionales como el número de Reynolds o el número de Froude.

Tabla 2.4: Investigaciones Relevantes de Geometría de Llama y Distribución de Temperaturas.

Investigación	Categoría y Análisis	Combustible	Resultados
Jet Flame Heights, Lift-Off Distances, And Mean Flame Surface Density For Extensive Ranges Of Fuels And Flow Rates (Bradley et al., 2016)	Geometría / Morfología y Numérico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>CH_4</math></li> <li>▪ <math>C_2H_2</math></li> <li>▪ <math>C_2H_4</math></li> <li>▪ <math>C_3H_8</math></li> <li>▪ <math>C_4H_{10}</math></li> <li>▪ <math>H_2</math></li> </ul>	Presentan correlaciones adimensionales completamente nuevas para la altura de llamas. Correlacionan el caudal con la estructura de la llama, la inestabilidad de llama, así como la extinción de esta.
Flame Characteristics Of Downward Sloping Buoyant Turbulent Jet Fires (Liu et al., 2019)	Geometría / Morfología y Experimental	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>C_3H_8</math></li> </ul>	Estudia las características morfológicas de llama con pendiente descendente, correlaciona el diámetro de la boquilla con la tasa de liberación de calor adimensional y el número de Froude.
Assessment Of The Shape Of Vertical Jet Fires (Palacios & Casal, 2011)	Geometría / Morfología y Numérico	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>C_3H_8</math></li> </ul>	Se analizaron las características morfológicas analizando imágenes infrarrojas, proponiendo expresiones para predecir los valores de longitud y ancho de la llama en función del diámetro de salida y en número de Reynolds.

*Continúa*

Tabla 2.4 (continuación)

Investigación	Categoría y Análisis	Combustible	Resultados
Macroscopic Characteristics And Prediction Model Of Horizontal Extension Length For Syngas Jet Flame Under Inclined Conditions (Z. Wang et al., 2021)	Geometría / Morfología y Experimental	■ Gas de Síntesis	Estudiaron los efectos del ángulo y diámetro de inclinación de la boquilla en la tasa de liberación de calor y las características morfológicas de la llama.
Experimental Investigation On Hydrogen Jet Flame Behavior And Temperature Distribution With Different Shapes Of Outlet (A. Zhang et al., 2024)	Distribución de Temperaturas y Experimental	■ $H_2$	Identificaron el impacto de diferentes formas de boquilla y presiones de descarga en la distribución de temperaturas. Observaron que el aumento de temperatura adimensional a lo largo del eje de la llama es función de la distancia y de la tasa de liberación de calor.
Axial Temperature Profile In Vertical Buoyant Turbulent Jet Fire In A Reduced Pressure Atmosphere (Hu et al., 2013)	Distribución de Temperaturas y Experimental	■ $C_3H_8$	Investigaron los perfiles de temperatura axial producidos por boquillas con diámetros de 4-10 mm a diferentes presiones atmosféricas, encontrando que la temperatura disminuye más rápido verticalmente.
Experimental Investigation On The Behaviors And Temperature Distribution Of Cryogenic Hydrogen Jet Flames (Gong et al., 2024)	Distribución de Temperaturas y Experimental	■ $H_2$ <i>Criogénico.</i>	Se realizaron experimentos a diferentes temperaturas y presiones de liberación descubriendo que la longitud y el ancho de la llama aumentan a medida que aumenta la presión de liberación y disminuye la temperatura de liberación.

*Continúa*

Tabla 2.4 (continuación)

Investigación	Categoría y Análisis	Combustible	Resultados
Experimental Study on Axial Temperature Profile of Jet Fire of Oil-Filled Equipment in Substation (R. Sun et al., 2021)	Distribución de Temperaturas y Experimental	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <i>Aceite de Transformador</i></li> </ul>	Se realizaron una serie de experimentos cambiando la fuente de calor externa y el diámetro del contenedor (similar a una boquilla) estudiando la distribución de temperatura de la línea central axial de la columna de fuego, resultando en un aumento de temperatura conforme el diámetro y la tasa de liberación aumenta.

Se han realizado diferentes investigaciones tanto experimentales como numéricas acerca de la morfología de la llama para diferentes combustibles, por ejemplo:

Bradley et al., 2016 Recopilaron el estudio de llamas en al menos 6 combustibles diferentes en más de 34 publicaciones, en varias de estas investigaciones encontraron que la presión de la tubería de suministro era cercana a la presión atmosférica, teniendo un conjunto de alturas de llama y distancias de despegue, el modo de liberación era principalmente vertical, con velocidades del aire inferiores a  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Obteniendo como resultado una nueva correlación de altura y diámetro de llama ( $H_f/D_e$ ) con una tasa de liberación de calor adimensional ( $Q^*$ ) extendido a valores más altos, de manera numérica determinaron por modelación que la zona de reacción general comprendía entre aproximadamente el 13 y 29 % del volumen de la llama medida.

Por su parte A. Zhang et al., 2024 investigaron el impacto de la presión de descarga y así mismo la geometría en la descarga de la boquilla, tomando como referencia el comportamiento de la llama (morfología) y la distribución de la temperatura a través de la línea central de la llama para el uso de hidrógeno como combustible. Utilizaron descargas con forma circulas a diferentes diámetros y salidas rectangulares a diferentes relaciones de aspecto cubriendo en cada una de las pruebas experimentales presiones de descarga de 20 a 220 bar. Los experimentos fueron realizados en condiciones ambiente, midiendo la longitud, el ancho y la temperatura axial de la llama. El

experimento muestra el acomodo de termopares *tipo C* dispuestos a lo largo del eje de la llama para medir la temperatura en la línea central, cada experimento tiene una duración de 10 segundos con 3 repeticiones por condición operativa. Como resultado encontraron que el tamaño de la llama aumenta conforme incrementa la presión de descarga, proponiendo modelos para longitud y ancho adimensional de la llama, considerando la liberación de calor adimensional para cada una de las diferentes formas de la descarga de la boquilla. Así mismo, se observó un incremento en la temperatura adimensional a lo largo del eje central de la llama como función de la distancia adimensional y el calor liberado adicional.

C. Zhao et al., 2023 estudiaron experimentalmente las características de la mezcla metano-hidrógeno en llamas de difusión de chorro turbulento, observándose para la morfología de la llama, la identificación de dos regiones basadas en la luminosidad de la llama. A través de procesamiento binario de imagen, desarrollaron un perfil promedio de llama y observaron los efectos a diferentes concentraciones: la altura de llama, el espesor de llama y la elevación de llama, concluyendo en efectos competitivos sobre la altura de la llama al aumentar la concentración de  $H_2$  en la mezcla dando como resultado el aumento en la temperatura de la llama, sin embargo, dentro de las limitaciones del estudio es que no considera la concentración de 100%  $H_2$ , y de igual manera el flujo volumétrico manejado en la parte experimental es constante.

Reyes et al., 2022 realizaron un estudio de la morfología en la premezcla de combustión para mezclas de metano-hidrógeno, observando como la adición de hidrógeno aumentaba la velocidad de quemado bajo condiciones controladas iniciales (0.1 MPa y 315 K), modificando la morfología de la llama, cambiando la estructura de la llama, teniendo un gran efecto sobre la inestabilidad termodifusiva en comparación con la hidrodinámica, provocando un incremento en las grietas desarrolladas por la llama.

Du et al., 2022 realizaron un estudio experimental y numérico del comportamiento de combustión de mezclas de gas natural e hidrógeno en quemadores rotacionales, observando una mejora en la eficiencia de la combustión conforme se aumentaba el ángulo de turbulencia, disminuyendo las emisiones de  $CO$ ,  $CO_2$  y  $NO_x$ . De igual manera se observó que conforme se aumentaba la

longitud del remolino, la llama se volvía más estable, sin embargo, la aplicación principal de estos quemadores rotacionales es en turbinas de gas y hornos industriales debido a las llamas turbulentas que generan.

Sujatha et al., 2018 investigaron la medición de la temperatura a partir del color de la llama en centrales térmicas y turbinas de gas, a través del procesamiento de imágenes en color y el uso de métodos de computación suave que utilizan el modelo de una red neuronal artificial, comparando el modelo proyectado con mediciones de sensores de temperatura (*termopares JK*) en placa Arduino UNO y su combinación con MATLAB, sin embargo, las llamas de este sistema no son sostenidas, debido a que maneja tres tipos de condiciones de quemado.

Este trabajo de investigación se enfocará principalmente en los aspectos morfológicos de la llama como lo es el color, la geometría de la llama, así como aquellos aspectos medibles como son la temperatura, el flujo de gases, y la presión de operación del reactor prototipo con el que se cuenta actualmente.

### 2.2.4. Estabilidad de Combustión

Es fundamental mantener la estabilidad del proceso de combustión, ya que previene riesgos significativos de seguridad y al medio ambiente. Además de comprometer el rendimiento de los equipos, la inestabilidad del proceso de combustión se caracteriza por tener una llama con sonido estridente y movimiento irregular, generando problemas como son una baja eficiencia, una mayor emisión de contaminantes, una inadecuada distribución del calor, sobrecalentamiento en el equipo, retorno de llama e incluso el apagado de la llama (Bai et al., 2025).

El uso de combustibles alternativos como el hidrógeno plantea potenciales desafíos para mantener la estabilidad del proceso de combustión, por lo que es imperativo el monitoreo del proceso de combustión para el control y optimización de este. En la actualidad, el monitoreo del proceso de combustión está basado en la combinación de análisis de imágenes de llama con la extracción y procesamiento de parámetros en tiempo real (Matthes et al., 2019).

Tabla 2.5: Investigaciones Relevantes de Monitoreo de Llama.

Investigación	Combustible	Características	Descripción de Resultados
Machine Learning-Based Prediction Of Swirl Combustor Operation From Flame Imaging (Bong et al., 2024)	Metano	Características de la imagen extraídas a través de una red neuronal.	Predicción del caudal total de aire y la relación de equivalencia.
Detection Of Slight Variations In Combustion Conditions With Machine Learning And Computer Vision (Compais et al., 2023).	Tres Mezclas de combustibles ( $CH_4$ , $H_2$ ) y su combinación.	Características estadísticas, geométricas y textuales de la llama	Detección de ligeras variaciones en las condiciones de combustión
Image Processing For The Characterization Of Flame Stability In A Non-Premixed Liquid Fuel Burner Near Lean Blowout (De Giorgi et al., 2016).	Combustible Líquido (No especificado).	Análisis de frecuencia de la intensidad de pixeles.	Monitoreo del proceso de combustión para el reconocimiento de la inestabilidad en un quemador estacionario.

*Continúa*

Tabla 2.5 (continuación)

Investigación	Combustible	Características	Descripción de Resultados
Flame Stability Measurement Through Image Moments And Texture Analysis (Golgiyaz et al., 2023).	Carbón.	Análisis de textura de patrón binario local uniforme.	Predicción del estado de un proceso de combustión a través de un modelo mutipercepción.
Prediction Of Combustion State Through A Semi-Supervised Learning Model And Flame Imaging (Han et al., 2021).	Combustóleo.	Características de la imagen extraídas a través de una red neuronal.	Predicción de estados de combustión vistos y no vistos a través de un clasificador de procesos gaussianos semisupervizado.
Assessment Of Flame Stability Through A Convolutional Denoising Autoencoder And Statistical Analysis (Han et al., 2023).	Etileno	Características de la imagen extraídas a través de una red neuronal.	Análisis cuantitativo y estadístico de la estabilidad de la llama.
On-Line Flicker Measurement Of Gaseous Flames By Image Processing And Spectral Analysis (Y. Huang et al., 1999).	Butano.	Parpadeo de llama.	Dependencia directa al diámetro del quemador, obtención de la relación de equivalencia.
A New Camera-Based Method For Measuring The Flame Stability For Non-Oscillating And Oscillating Combustions (Matthes et al., 2019).	Carbón duro y Carbón Torreficado.	Área de llama.	Cuantifican la inestabilidad de llama a partir de un índice geométrico.
Flame Stability Analysis Of Flame Spray Pyrolysis By Artificial Intelligence (Pan et al., 2021).	Alcohol Reactivo C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH + CH <sub>3</sub> OH (94-96 %) C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> OH (4-6 %)	Análisis de imagen de llama.	A partir un modelo de detección de objetos determinan diferentes zonas de una imagen de llama.

*Continúa*

Tabla 2.5 (continuación)

<b>Investigación</b>	<b>Combustible</b>	<b>Características</b>	<b>Descripción de Resultados</b>
An Unsupervised Classification Method For Flame Image Of Pulverized Coal Combustion Based On Convolutional Auto-Encoder And Hidden Markov Model (Qiu et al., 2019).	Carbón	Características de la imagen extraídas a través de una red neuronal.	Clasificación de los estados de combustión.
Quatitative Assessment Of Flame Stability Through Image Processing And Spectral Analysis (D. Sun et al., 2015).	Combustóleo Pesado	Características de la imagen de una llama (Color, geometría y luminancia).	Cuantificación de la inestabilidad de la llama.
Pattern Recognition For Measuring The Flame Stability Of Gas-Fired Combustion Based On The Image Processing Technology (Y. Wang et al., 2020).	Gas Natural.	Características extraídas de la imagen de llama.	Reconocimiento de patrones para diagnosticar el estado de combustión.
Quantitative Measurement Of The Stability Of Pulverized Coal Fired Flame Through Digital Image Processing And Statistical Analysis (Xu et al., 2023).	Carbón.	Característica extraídas de la imagen de una llama (Brillo, No uniformidad, Parpadeo de Llama).	Se determinó la estabilidad de llama de manera cuantitativa.
Monitoring Combustion Instabilities Of Stratified Swirl Flames By Feature Extractions Of Time-Averaged Flame Images Using Deep Learning Method (Y. Zhou et al., 2021).	Metano	Características de la imagen extraídas a través de una red neuronal.	Determinan la estabilidad del proceso de combustión, prediciendo los estados termoacústicos de las llamas.

La Tabla 2.5 resume estudios de monitoreo del proceso de combustión basado en el análisis de imágenes de llama, la mayoría de estos estudios extraen información y características de imágenes de llama como es el color, la zona de la raíz, características de textura, para después procesar

y analizar los datos evaluando la estabilidad del proceso de combustión. C. Zhao et al., 2023 investigaron, a flujo constante, la longitud de la llama y las perturbaciones acústicas provocadas, encontrando para tres diferentes caudales máxicos como la llama incrementaba su longitud hasta 5 cm en un intervalo de  $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Demostrando como es de suma importancia estudiar las variaciones de flujo, el hidrógeno generado a partir de celdas electrolíticas tiene la desventaja de presentar oscilaciones de flujo debido a las variaciones en la producción de gas provocadas por medidas de seguridad, así como la naturaleza intermitente del uso de energía renovables.

## 2.3. Parámetros de Desempeño

Los parámetros de desempeño a utilizar para evaluar sistemas de combustión y quemadores incluyen, la eficiencia y el sostenimiento térmicos. El sostenimiento térmico permite mantener condiciones térmicas estables y constantes durante la operación, garantizando la estabilidad del proceso de combustión. La eficiencia térmica se destaca como un parámetro clave, ya que mide la capacidad del sistema para convertir la energía química del combustible en energía térmica útil. Este indicador no solo evalúa el rendimiento del quemador, sino que también tiene implicaciones económicas, energéticas y ambientales, que son fundamentales para el diseño y la operación de sistemas de combustión eficientes y sostenibles.

### 2.3.1. Eficiencia Térmica

Como ya fue mencionado previamente, la eficiencia térmica permite cuantificar la proporción de energía química del combustible que se utiliza efectivamente para generar calor útil frente a la energía que se pierde en forma de gases de escape o demás fenómenos de transferencia de calor. En teoría, una alta eficiencia térmica reduce costos operativos al hacer uso de menor combustible para generar la misma cantidad de calor. Sirve como indicador para comparar y seleccionar las funciones adecuadas del quemador en uso, además, la medición de la eficiencia permite validar el diseño de quemadores y estrategias de control, optimizando la configuración de parámetros operativos como la distribución de flujo y de temperaturas así la geometría de los quemadores.

Hou y Chou, 2013 investigaron la influencia de una llama de combustión confinada en la eficiencia térmica ( $\eta$  - Ecuación 2.10) de un quemador de flujo en remolino, observando que, a mayor ángulo de remolino, mayor eficiencia térmica, emplearon la siguiente expresión en un experimento donde calentaban agua contenida en un recipiente:

$$\eta = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{\dot{V} \cdot HHV} \quad (2.10)$$

Donde  $m$  es la masa del agua ( $kg$ ),  $C_p$  es el calor específico a presión constante del agua ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ),  $\dot{V}$  representa el consumo de combustible ( $m^3$ ) y  $HHV$  indica el valor calorífico superior del combustible ( $kJ \cdot m^3$ ).

En este trabajo de investigación se empleará la definición de eficiencia térmica, junto con las ecuaciones auxiliares del estudio reportado por Ahmadi et al., 2022, en el cual se modeló mediante *CFD* la influencia de la geometría en la eficiencia térmica (Ecuación 2.11) de quemadores de gas domésticos. Dicho estudio reportó mejoras significativas, en un rango de 3.3 % a 22.2 %, a partir de las siguientes expresiones:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{System}}{\dot{Q}_{Fuel}} \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{System} = \dot{m}_{mezcla} \cdot C_{PSystem} \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

$$\dot{Q}_{Fuel} = \dot{m}_{Fuel} \cdot \Delta H_{RX} \quad (2.13)$$

Donde  $\dot{m}_{mezcla}$  y  $\dot{m}_{Fuel}$  son los flujos másicos ( $kg \cdot h^{-1}$ ),  $C_{PSystem}$  es la capacidad calorífica específica del recipiente, o en nuestro caso el aire dentro de la cámara de combustión,  $\Delta T$  el sostenimiento térmico y  $\Delta H_{RX}$  el calor de reacción del proceso de combustión ( $kJ \cdot kg^{-1}$ ).

### 2.3.2. Sostenimiento del Gradiente Térmico

El sostenimiento térmico hace referencia a la capacidad del sistema para mantener condiciones térmicas estables y constantes, este parámetro de desempeño nos permite determinar si el quemador puede mantener una temperatura constante en la cámara de combustión, incluso bajo oscilaciones en las condiciones operativas, como es la oscilación debido a la naturaleza intermitente del uso de energías renovables, la disponibilidad de aire en el proceso de combustión o incluso de la carga térmica del combustible empleado. Es de vital importancia para aplicaciones donde el control preciso de la temperatura es fundamental, además de que nos permite calcular la eficiencia térmica

del sistema.

Así mismo, el sostenimiento térmico también está relacionado con la prevención de inestabilidades del proceso de combustión, siendo indicador de seguridad en sistemas donde el apagado inesperado puede provocar un escenario de riesgo.

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

El sostenimiento térmico es función de la temperatura y del tiempo, donde la tasa de cambio de la temperatura con respecto al tiempo es nula (Ecuación 2.14), generalmente se evalúa después de haber alcanzado una temperatura deseada, permitiendo evitar que el sistema se enfríe o caliente de más.

## 2.4. Análisis de Imágenes

A partir del análisis de imágenes de llama se puede extraer información relevante de la dinámica espacial y temporal de la llama (Y. Wang et al., 2020). Factores como las propiedades del combustible, las condiciones de operación, e incluso el tipo de quemador, son factores que dependiendo de la aplicación pueden variar drásticamente, y que están correlacionados con la calidad y el contenido de las imágenes obtenidas.

El procesamiento digital de imágenes implica la aplicación de operaciones matemáticas y algorítmicas sobre conjuntos de datos provenientes de imágenes digitales, con el propósito de optimizar su calidad para aplicaciones específicas o de extraer información significativa contenida en ellas (Alonso, 2009). Una imagen digital está compuesta por un conjunto finito de elementos denominados píxeles, los cuales se ubican en posiciones definidas dentro de una cuadrícula de muestreo, generalmente rectangular. Cada píxel representa un valor numérico que corresponde a un nivel de cuantificación en una escala de brillo, formando así una matriz bidimensional que codifica la intensidad luminosa en cada punto de la imagen. A diferencia de las imágenes continuas, cuya descripción matemática admite propiedades topológicas y geométricas bien definidas, las imágenes digitales no siempre permiten una analogía directa de tales propiedades debido a su naturaleza discreta y cuantizada, lo cual plantea desafíos particulares en su análisis y procesamiento (Sonka et al., 2014).

### 2.4.1. Espacios de Color

Un espacio de color o modelo de color es la representación geométrica en la que un color está definido, permitiendo analizar toda la información presente dentro de la imagen, siendo una métrica para medir la distancia entre sus componentes cuyos valores numéricos definen un color específico (Amin et al., 2024). Inicialmente, los espacios de color se basaron en experimentos de percepción humana, lo que permitió la clasificación de los colores (Busin et al., 2009). Actualmente, dependiendo del enfoque, los espacios de color pueden clasificarse según su definición o sus características.

Según su definición, se agrupan en tres categorías: fundamentales, derivados y específicos (Kahu et al., 2019); por sus características, se dividen en cuatro familia: espacios primarios, espacios de luminancia-crominancia, espacios perceptuales y espacios de ejes independientes (Cheng et al., 2001). Los espacios de color más utilizados para el procesamiento digital de imágenes utilizan tres componentes para un color complejo, como son RGB, HSI, YIQ, CMY.

### Espacio de Color RGB

Matemáticamente, el modelo RGB es un subespacio del espacio euclidiano, representado como un cubo (Figura 2.2) cuyos ejes corresponden a las tres componentes primarias: rojo (R), verde (G) y azul (B). Cada color dentro de este espacio se define mediante una combinación de intensidades de estos tres componentes (Amin et al., 2024).

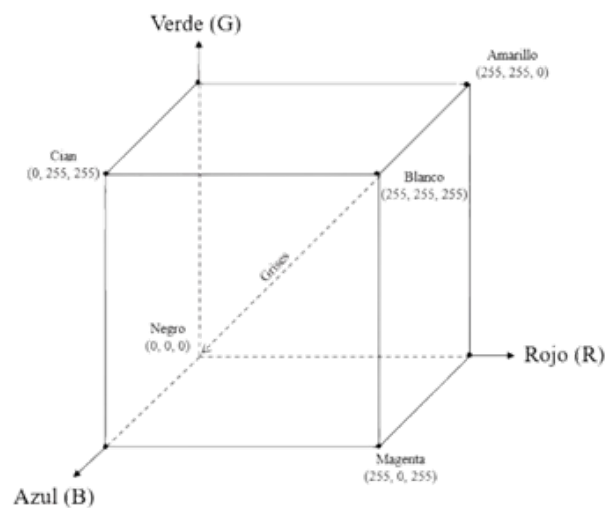


Figura 2.2: Representación 3D del espacio de color RGB (Cheng et al., 2001)

Una imagen digital en color RGB se representa como un arreglo de tres imágenes monocromáticas independientes, cada una de tamaño  $(P \times Q)$ , correspondientes a las intensidades de R, G y B. Aunque el espacio RGB es ampliamente utilizado para la visualización en dispositivos como monitores y videocámaras de color, no siempre es el espacio de color más adecuado para el procesamiento de imágenes, especialmente en tareas de segmentación, debido a la alta correlación entre sus componentes, lo que significa que cambios en la iluminación afectan simultáneamente a los

tres canales, dificultando una interpretación robusta del color.

Por esta razón es común transformar las imágenes desde RGB hacia otros espacios de color más adecuados para ciertos procesos, como HSI o YCbCr (Busin et al., 2009).

### Espacio de Color HSI

Por su parte, el espacio de color HSI (Hue, Saturation, Intensity) permite representar los colores de forma más cercana a la percepción humana, distinguiéndolos por sus atributos de tono (Hue), saturación (Saturation) e intensidad (Intensity). El espacio HSI separa la información de color (tono y saturación) de la información de iluminación (intensidad), lo que hace particularmente útil en tareas de procesamiento de imágenes como la segmentación, donde es deseable trabajar con el color independientemente de la iluminación (Y. Huang et al., 1999).

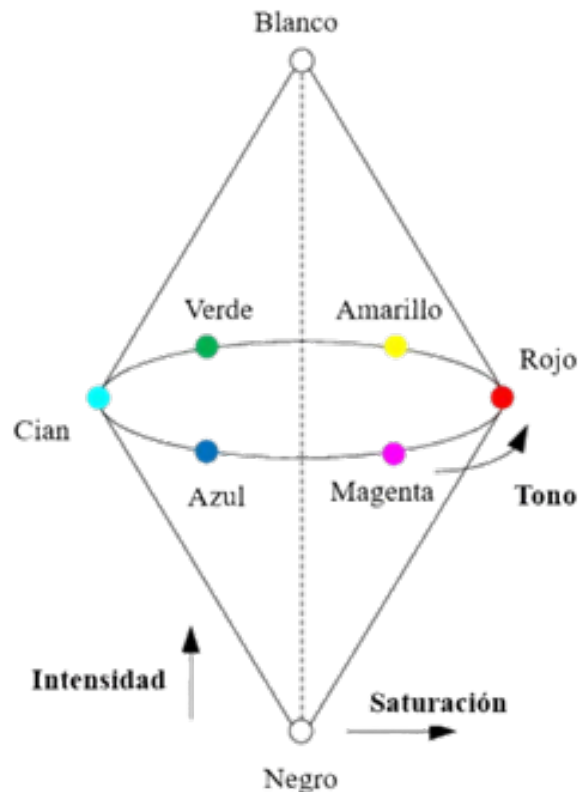


Figura 2.3: Espacio de Color HSI (D. Sun et al., 2015)

En la Figura 2.3 se observa la representación gráfica del espacio de color HSI, el tono está

asociado con la longitud de onda dominante en una mezcla de luz representando el color percibido, generalmente suele representarse como un ángulo entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  en el plano de color. La saturación indica la pureza del color, indicando la cantidad de luz blanca mezclada con el tono, en el modelo geométrico, la saturación es la distancia radial desde el centro del espacio HSI. La intensidad refleja el nivel de brillo o iluminación percibida de un color, y describe qué tan claro u oscuro es. Es comparable con a la escala de grises y, geoméricamente, representa la altura a lo largo del eje axial (D. Sun et al., 2015).

### 2.4.2. Cuantificación de Color

Las imágenes digitales buscan aproximarse al número de colores que el ojo humano puede detectar, de manera que utilizan un método de almacenamiento de la información contenida en la imagen denominado “Color Verdadero”, el cual suele contener miles o millones de colores, si la imagen es de 8 bits por canal, se tienen 256 posibles valores para cada componente RGB, lo que genera un total de aproximadamente 16.7 millones de colores teóricos diferentes ( $256^3 = 16,777,216$ ), por lo que su visualización, transmisión y procesamiento sea problemático (Celebi, 2011). A pesar del avance en los sistemas computacionales, en ocasiones es necesario reducir la cantidad total de colores almacenados en una imagen, procurando mantener la distorsión al mínimo (Celebi et al., 2015).

La cuantificación del color (*QC*, *Quantization of Color*) es una operación común en el procesamiento de imágenes que tiene como finalidad reducir la cantidad de colores sirviendo también como un paso de preprocesamiento para diferentes técnicas de preprocesamiento de imágenes (Brun & Trémeau, 2002). Las aplicaciones más utilizadas de la cuantificación del color en el procesamiento de imágenes se en listan a continuación (Deng & Manjunath, 2001; Deng et al., 2001; Kuo & Cheng, 2007; Sertel et al., 2009; Sherkat et al., 2005; C. K. Yang & Tsai, 1998):

- Compresión.
- Segmentación.

- Localización (detección de texto).
- Análisis de color-textura.
- Marca de agua.
- Renderizado no fotorrealista.
- Recuperación basada en contenido.

### **Métodos de Cuantificación de Color**

Los métodos de cuantificación de color se dividen en las siguientes categorías:

- Independientes de la imagen.
- Dependientes de la imagen.
  - Preagrupamiento (Algoritmo Jerárquico).
  - Postagrupamiento (Algoritmo Particional).

Los métodos independientes de la imagen determinan una paleta de colores fija, sin considerar las características específicas de cada imagen, por su parte, los métodos dependientes de la imagen funcionan de manera adaptativa, basándose en la distribución de color de las imágenes (Celebi, 2011).

Los métodos de preagrupamiento se basan principalmente en el análisis estadístico de la distribución de color de las imágenes, particionan al conjunto de entrada en un conjunto de  $K$  clústeres, este tipo de algoritmo encuentra clústeres anidados de forma recursiva de arriba hacia abajo (divisiva) o de abajo hacia arriba (aglomerativa) (Cheng et al., 2001). Los métodos de preagrupamiento incluyen: corte de media, octree, método basado en la varianza, división binaria, bipartición ortogonal voraz, corte central y vecino más cercano por pares.

En cambio, los métodos de postagrupamiento determinan una paleta inicial de color y la mejoran iterativamente, particionan al conjunto de entrada en subconjuntos mutuamente excluyentes, de

manera que estos algoritmos encuentran todos los clústeres simultáneamente (Thompson et al., 2020). Los métodos de postagrupamiento incluyen: minmax, k-means (KM), c-means difusos, aprendizaje competitivo y mapas auto organizados.

Los métodos de preagrupamiento suelen ser más rápidos que los de postagrupamiento, sin embargo, estos últimos tienden a producir resultados más precisos, siempre que los algoritmos se inicialicen correctamente. Actualmente, la mayoría de las investigaciones en cuantificación de color se enfocan en el uso de algoritmos basados en particiones. En este contexto, el método k-means resulta especialmente conveniente, ya que requiere definir menos parámetros por parte del usuario, es intuitivo, fácil de implementar y significativamente más eficiente que otras alternativas (S. C. Huang, 2021).

### **Métricas de Calidad de Imagen**

La calidad de una imagen es un término que representa las propiedades visuales de las imágenes, así como la cantidad de degradaciones visuales presentes en la imagen (Pérez-Delgado & Celebi, 2024). Las degradaciones en la calidad de la imagen están vinculadas en el procesamiento en compresión. Segmentación, transmisión e incluso en la impresión (Lepcha et al., 2023).

La evaluación de la calidad de imagen, al igual que la visualización de las imágenes, generalmente se basan en la percepción humana. Sin embargo, se requieren de criterios estandarizados que permitan evaluar la calidad y fidelidad de las operaciones del procesamiento de imágenes, por lo tanto, el uso de índices de evaluación de la calidad (*IQA* – Image Quality Assessment) los cuales permiten verificar, mediante modelos matemáticos, la calidad y fidelidad de dichas operaciones (Z. Wang et al., 2004).

$$MSE = \frac{1}{WH} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|p_{ij} - p'_{ij}\|_2^2 \quad (2.15)$$

Uno de los índices de evaluación de la calidad más utilizado es el error cuadrático medio (*MSE*) (Ecuación 2.15) debido a su bajo requerimiento computacional, sin embargo, no siempre refleja

adecuadamente las distorsiones en las imágenes procesadas (Z. Wang & Bovik, 2009). Es por eso, que existen tres metodologías de evaluación objetiva de la calidad imagen:

- Técnicas de Referencia Completa.
- Técnicas de Referencia Reducida.
- Técnicas Sin Referencia.

Las técnicas de referencia completa evalúan la calidad usando imágenes de referencia o la imagen original sin procesamiento, por su parte las técnicas de referencia reducida relacionan solo características extraídas de las imágenes procesadas comparándolas con imágenes de referencia, y las técnicas sin referencia realizan su evaluación en ciego (L. Zhang et al., 2012).

Las métricas de evaluación de la calidad con técnicas de referencia completa miden el grado de desviación de la imagen distorsionada con la imagen de referencia, la métrica más sencilla es la “Relación Señal-Ruido Máxima” (*PSNR*) (Ecuación 2.16), sin embargo, no siempre se correlaciona con la percepción humana. “El Índice de Similitud Estructural” (*SSIM*) (Ecuación 2.17), y el “Índice de Similitud Estructural Multiescala” (*M-SSIM*) (Ecuación 2.18), correlacionan de mejor manera la percepción humana (Simoes & de Sá, 2024).

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE/3} \right) \quad (2.16)$$

$$SSIM = l^\alpha \cdot c^\beta \cdot s^\gamma \quad (2.17)$$

Donde  $l$  es la luminancia,  $c$  el contraste,  $s$  la estructura,  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  son constantes positivas que definen la importancia relativa de cada componente.

$$MS - SSIM = (l_M)^{\alpha_M} \cdot \prod_{j=1}^M (c_j)^{B_j} \cdot (s_j)^{\gamma_j} \quad (2.18)$$

Donde la imagen original corresponde a  $j = 1$  y la escala más alta corresponde a  $j = M$ ,  $l_M$  denota el componente de luminancia para la escala más alta,  $c_j$  y  $s_j$  representan el contraste y la

estructura para la escala  $j$  y  $\alpha$ ,  $\beta_j$  y  $\gamma_j$  son constantes positivas que definen la importancia relativa de cada componente en cada escala.

Para comparar el rendimiento del procesamiento de imágenes con referencia reducida se utilizan métricas donde solo evalúan características en común como el *RMSE* (Raíz del Error Cuadrático Medio) (Ecuación 2.19) que evalúa el error de la imagen procesada resultante a partir de la desviación de los píxeles procesados con los originales (Y. Wang et al., 2018).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{WH} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \|p_{ij} - p'_{ij}\|_2^2} \quad (2.19)$$

El uso de técnicas sin referencias no obtiene información de las imágenes originales y asume que la calidad de diferente parámetros, como la intensidad o energía, fue presumiblemente distorsionada (Kamble & Bhurchandi, 2015). La “Evaluación de Calidad de Imagen Natural” (*NIQE*) mide las desviaciones de valores estadísticos en imágenes, estas características se modelan como distribuciones gaussianas multidimensionales, expresando la calidad como la diferencia entre las estadísticas del modelo y las de la imagen procesada, entre menor sea el valor de *NIQE*, mejor será la calidad perceptual de la imagen (Mittal et al., 2013). De igual manera, la “Evaluación de la Calidad de Imagen Basado en la Percepción” (*PIQE*) realiza la puntuación de la calidad sin referencia de una imagen mediante la estimación de la distorsión por bloques, un valor bajo de *PIQE* indica una alta calidad perceptual (Venkatanath et al., 2015).

## 2.5. Índice de Estabilidad de Combustión

Cómo se mencionó previamente, es fundamental mantener la estabilidad del proceso de combustión, está depende de múltiples factores relacionados con las propiedades termodinámicas, geométricas y ópticas de la llama, así como de la calidad del combustible, las condiciones de operación y el entorno en el que se desarrolla la combustión (Bai et al., 2025). El uso de combustibles alternativos introduce nuevas variables que favorecen la inestabilidad del proceso de combustión, en ese sentido, el hidrógeno enfrenta desafíos técnicos, tales como el sobrecalentamiento de materiales, así como variaciones en el suministro de combustible, en particular, aquellos sistemas descentralizados que dependen de fuentes renovables (Tello et al., 2025).

En hornos industriales, la estabilidad del proceso de combustión presenta fluctuaciones, por lo que es fundamental cuantificar la estabilidad de la llama durante la operación permitiendo a los operadores de plantas energéticas monitorear y ajustar el proceso de manera más eficiente (Matthes et al., 2019), especialmente bajo condiciones variables de demanda energética. En el contexto del hidrógeno verde, la alta demanda energética generará fuertes fluctuaciones en la corriente, afectando la calidad del hidrógeno producido, provocando fluctuaciones en la liberación de calor, generando inestabilidad en la combustión, junto con oscilaciones de presión y flujo (Mu et al., 2022; Speckmann et al., 2019). Una herramienta útil para este propósito es el "*Índice de Estabilidad de Llama*" ( $\delta_f$ ), el cual permite evaluar cuantitativamente la estabilidad del proceso de combustión bajo diferentes condiciones operativas.

Xu y Yan, 2025 evaluaron la estabilidad de la llama utilizando tres métodos: frecuencia de oscilación de la llama, un indicador basado en procesamiento de imágenes y un índice de estabilidad de la llama basado en la cuantificación espectroscópica de la llama. Los resultados experimentales mostraron una alta consistencia entre los tres métodos, con coeficientes de correlación superiores a 0.86, lo que valida la eficacia de los índices para cuantificar la estabilidad de la llama.

Como se mencionó en la sección 2.2.4, la mayoría de los estudios se limitan a el análisis de imágenes y la extracción de las características de color, sin embargo, no integran parámetros de

desempeño ligados a las condiciones de combustión, por lo que este trabajo de tesis busca cuantificar la estabilidad del proceso de combustión del hidrógeno integrando el impacto de las oscilaciones en el flujo de gas  $H_2/O_2$  en los parámetros de desempeño junto con análisis de imágenes de llama.

# Capítulo 3

---

## Metodología

---

### 3.1. Sistema Experimental

El sistema experimental es un prototipo constituido por dos secciones, en la primera se desarrolla la producción de la mezcla de gas  $H_2/O_2$ , conformado por un reactor de electrólisis de agua alcalina conectado en serie a un tanque de burbujeo cuya función principal es evitar el retroceso de la llama; en la segunda sección se localiza la zona del quemador (Figura 3.1).

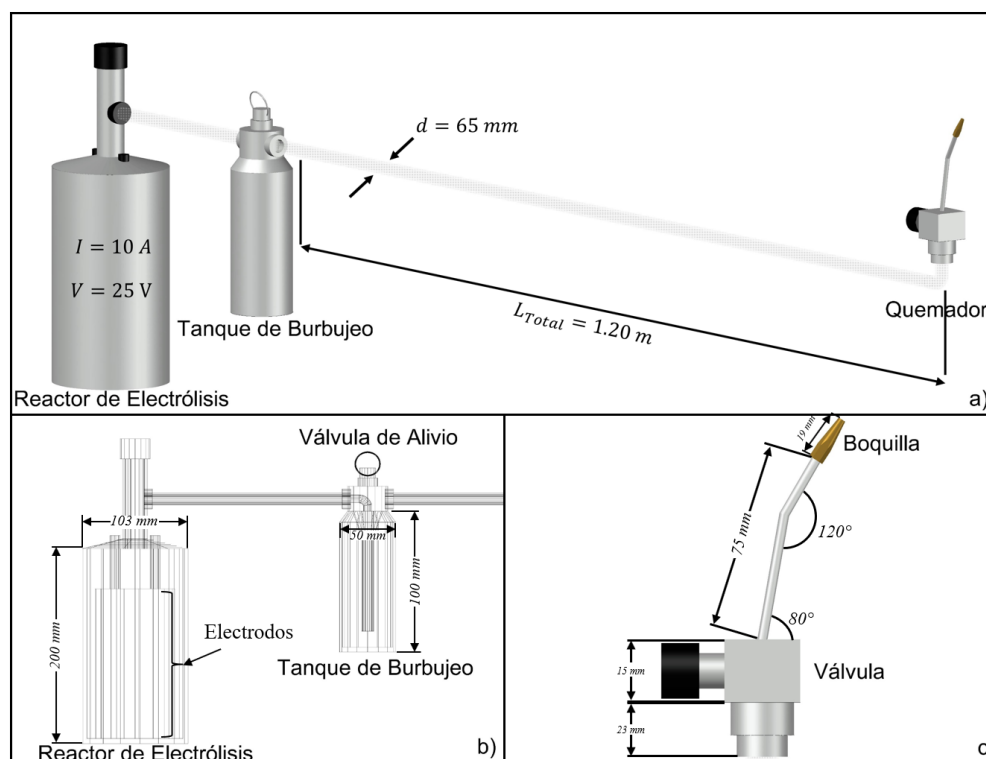


Figura 3.1: Sistema de Reacción Prototipo. a) Sistema Completo, b) Primera Sección: Constitución Interna del Reactor de Electrólisis y Tanque de Burbujeo, c) Segunda Sección: Quemador.

La producción de mezcla de gas  $H_2/O_2$  se realiza en operación por lotes, la solución electrolítica empleada en este trabajo de tesis es hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración 2 molar, el reactor opera a 10 amperes y 25 voltios, y cuenta con un controlador, regulando la fuente de poder en modo *On/Off* a una presión máxima. El gas producido sale del tanque de burbujeo y pasa a través de una tubería de 120 cm de longitud hasta llegar a una válvula de aguja que regula la disponibilidad de la mezcla de  $H_2/O_2$  en el quemador. La válvula está acoplada a una tubería de acero inoxidable 316 y este a su vez se acopla al quemador.

El quemador está conformado por una boquilla de cono sólida roscada (Figura 3.2), cuya longitud es de 2 cm y diámetro interno de descarga de 0.05 mm.

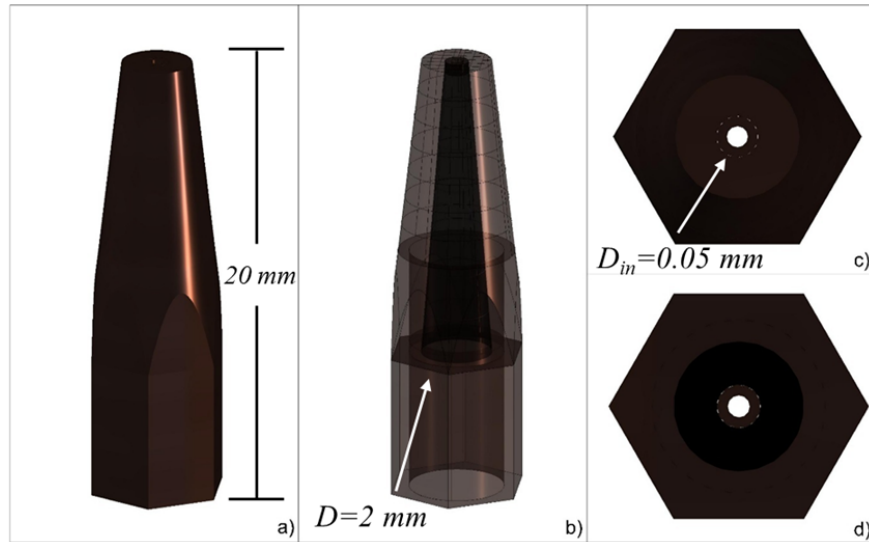


Figura 3.2: Diagrama Esquemático de la Boquilla. a) Vista Frontal, b) Vista Interna, c) Vista Superior, d) Vista Inferior

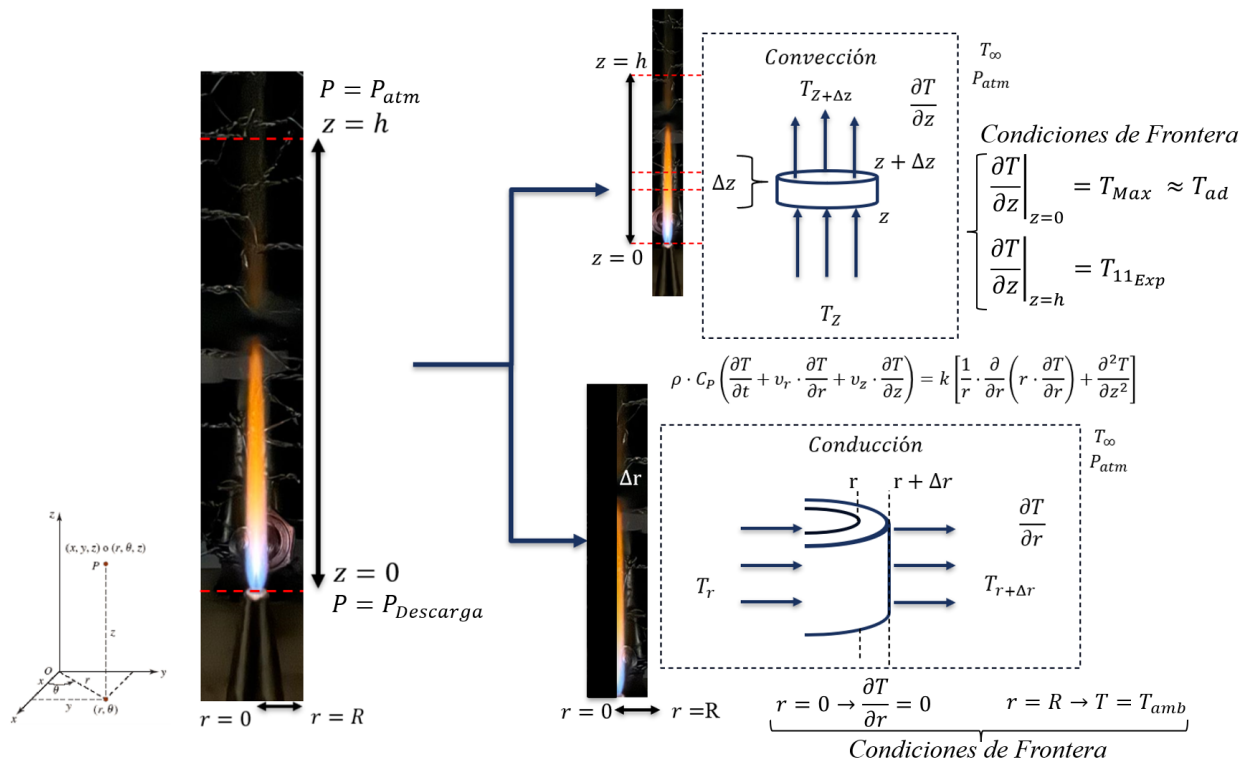


Figura 3.3: Procesos de Transferencia de Calor del Sistema Experimental.

El sistema experimental presenta variaciones en la altura de la llama ( $H_f$ ) debido a oscilaciones en el flujo del gas  $H_2/O_2$  provocadas por los cambios en la presión interna del reactor de electrólisis, intentando compensar la producción. De manera que se observó el proceso de transferencia de calor de la llama a los alrededores, tal y como se muestra en la Figura 3.3, donde se puede ver que el proceso de transferencia de calor es significativo en la dirección axial, predominando el fenómeno de convección. Por su parte, el fenómeno de conducción predomina en dirección radial, sin embargo la transferencia de calor en esta dirección es despreciable en comparación con la dirección axial.

### 3.1.1. Pruebas Experimentales Preliminares

En este trabajo de investigación se diseñó un arreglo experimental preliminar contemplando los arreglos experimentales mostrados en la literatura (Gong et al., 2024; Hu et al., 2013; R. Sun et al., 2021; A. Zhang et al., 2024), tomando lectura de la distribución de temperaturas en la línea central de la llama, a equidistancias a partir de la descarga de la boquilla (5, 10, 15 y 20 cm respectivamente). De igual manera se verifica en la zona reactiva (Zona de Llama) la transferencia de calor en la dirección radial con dos sensores posicionados a un centímetro de separación de la llama con alturas de 0 y 2.5 cm respecto a la descarga de la boquilla (Figura 3.4).

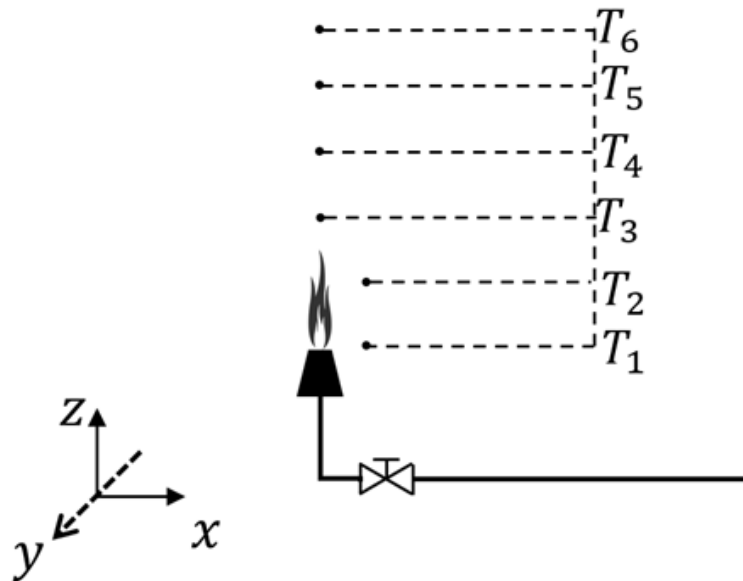


Figura 3.4: Sistema Experimental Preliminar

Las pruebas experimentales preliminares se contemplaron con una duración de 5 minutos, sin modificar la apertura de la válvula y se registró las temperaturas por medio de termopares ("Tipo K") conectados a un microprocesador de la plataforma Arduino para la obtención de los datos. Así mismo, se registra las condiciones ambientales como es la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad promedio del viento, etc. para cada prueba realizada con los datos reportados por el Departamento de Investigaciones, Arquitectónicas y Urbanísticas - DIAU,

Clima y Urbanización en el Valle de Puebla, Estación *RAMM07 - BUAP CU San Manuel*”, cuya geolocalización es mostrada en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Geolocalización de la Estación *RAMM07 - BUAP CU San Manuel*”

Cómo se explicará en el apartado de resultados, las pruebas experimentales preliminares determinaron la necesidad de modificar el sistema experimental a un sistema confinado, para establecer la fiabilidad de los datos obtenidos y el posterior análisis de la morfología de la llama.

### 3.1.2. Sistema de Monitoreo

Para mejorar la estabilidad de la llama y reducir la incidencia de perturbaciones externas en la llama, se confinó la zona de combustión y zona de propagación de los gases de combustión mediante un ducto de geometría cilíndrica fabricado en PMMA, aprovechando la baja conductividad térmica del material en comparación con otros materiales (Tabla 3.1). Además, el PMMA ofrece ventajas significativas en términos de transparencia óptica, lo que permite observar los fenómenos en condiciones controladas.

Tabla 3.1: Propiedades Térmicas y Mecánicas de Materiales de Construcción

Material	Conductividad Térmica ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	Resistencia Térmica ( $^{\circ}C$ )	Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ )
Acero Inoxidable	15 - 25	800 - 1000	7.8
Iconel	11 - 15	1000 - 1200	8.5
Aluminio	205	300 - 400	2.7
Cerámica	2 - 10	1200 - 1800	3.5 - 6.0
PMMA	0.19	80 - 100	1.2
Titanio	21.9	500 - 600	4.5
Cobre	390	200 - 300	8.9

El ducto cuenta con un área de succión que permite regular la disponibilidad y el flujo de aire ambiente. La longitud y el diámetro se definieron considerando la identificación de gradientes térmicos en las pruebas experimentales preliminares, así mismo, se identificó los rangos de operación del sistema experimental mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Rangos de Operación del Sistema Experimental

Rango de Operación	Presión ( $kPa$ )	Temperatura ( $K$ )	Flujo ( $\frac{cm^3}{s}$ )	Humedad ( $\%$ )
Máximo	239.2	1173.1	33.3	90.0
Mínimo	101.3	298.1	-	10.0

A partir de la información de la Tabla 3.2 se seleccionaron los elementos de medición, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Especificaciones Técnicas de los Sensores.

Sensor	Parámetro	Especificación
Temperatura	Voltaje de Operación ( <i>V</i> )	3.3 - 5
	Corriente de Trabajo ( <i>mA</i> )	50
	Rango de Temperatura ( $^{\circ}C$ )	-200 - 1024
	Resolución ( $^{\circ}C$ )	0.25
	Frecuencia SPI máxima ( <i>mHZ</i> )	4.3
	Tiempo de Conversión	0.17
Presión	Material	Acero Inoxidable
	Rango de Entrada ( <i>psi</i> )	0-100
	Salida de Voltaje ( <i>V</i> )	0.5 - 4.5
	Precisión (%)	2
Flujo	Material del Cuerpo	PMMA
	Rango de Flujo ( <i>LPM</i> )	0.1 - 3
	Precisión (%)	0.5
	Presión Máxima ( <i>MPa</i> )	0.1
Humedad	Rango de Humedad (%)	0 - 95
	Rango de Temperatura ( $^{\circ}C$ )	-20 - 60
	Precisión Humedad (%)	$\pm 5$
	Precisión Temperatura (%)	$\pm 2$

La programación de los sensores para la obtención de datos se realizó en la plataforma de Arduino, y la vinculación de los microprocesadores para el procesamiento de la información se realizó mediante MATLAB. La distribución de los termopares se determinó a partir de los resultados de las pruebas experimentales preliminares, tomando como criterio la identificación de gradientes térmicos en la zona de propagación de la llama y gases de combustión, la Tabla 3.4 muestra la posición de todos los elementos de medición dentro de la cámara de combustión.

Tabla 3.4: Posición de los Sensores.

Sensor	Posición (m)	Sensor	Tipo / Dirección	Posición (m)
$T_1$	0.025	$T_{1,r}$	Axial	0.000
$T_2$	0.050		Radial	0.010
$T_3$	0.075	$T_{2,r}$	Axial	0.050
$T_4$	0.100		Radial	0.010
$T_5$	0.125	$T_{3,r}$	Axial	0.100
$T_6$	0.150		Radial	0.010
$T_7$	0.175	$T_{4,r}$	Axial	0.150
$T_8$	0.200		Radial	0.010
$T_9$	0.300			
$T_{10}$	0.400	Sensor de Humedad ( $H_1$ )		0.500
$T_{11}$	0.500			

En la Figura 3.6 se representa el flujo de señales entre el módulo de adquisición de datos mediante la plataforma de Arduino, y su procesamiento en MATLAB para la visualización de herramientas gráficas y el cálculo de parámetros de desempeño tales como es la eficiencia térmica y el sostenimiento del gradiente térmico.

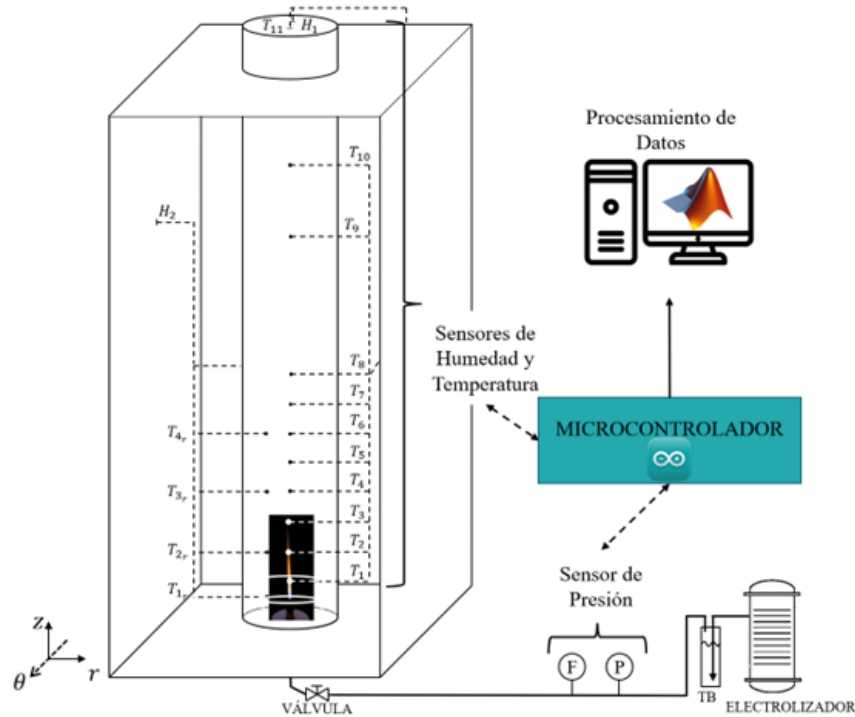


Figura 3.6: Diagrama del Sistema de Monitoreo y el Procesamiento de Señales.

### Programación de Sensores

El sensor de presión a diferencia de los sensores de temperatura y humedad no cuenta con un transmisor acoplado, el cual permite convertir señal analógica a digital y este a su vez a los valores de temperatura o humedad en el rango de trabajo del sensor, por lo que en el sensor de presión fue necesario generar una secuencia de cálculo que permita la conversión de señal analógica (voltaje) a presión, tal como se muestra en la Figura 3.7. Para esto se realizaron pruebas experimentales con el sensor de presión, teniendo como punto de referencia la lecturas proporcionadas por un manómetro (INFRA-METRON/Serie 10165), empleando aire comprimido como flujo de trabajo.

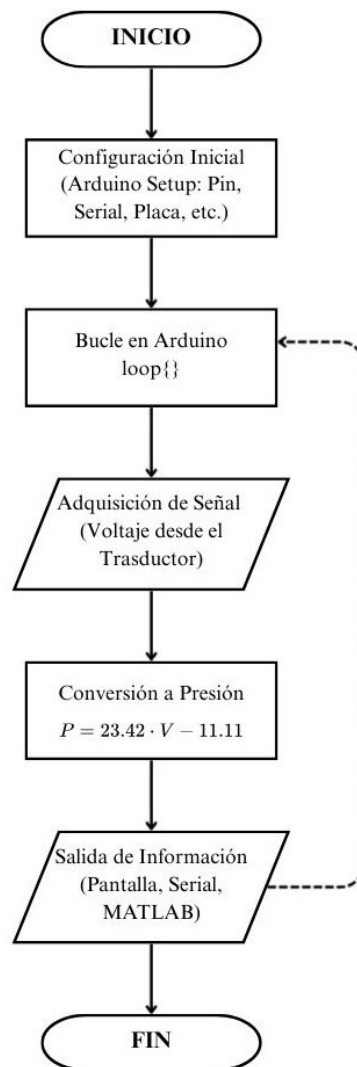


Figura 3.7: Secuencia de cálculo para el Sensor de Presión

Se registraron las lecturas de presión del manómetro para ajustar el comportamiento del sensor, obteniendo la ecuación de ajuste (Figura 3.8) con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.9983$ .

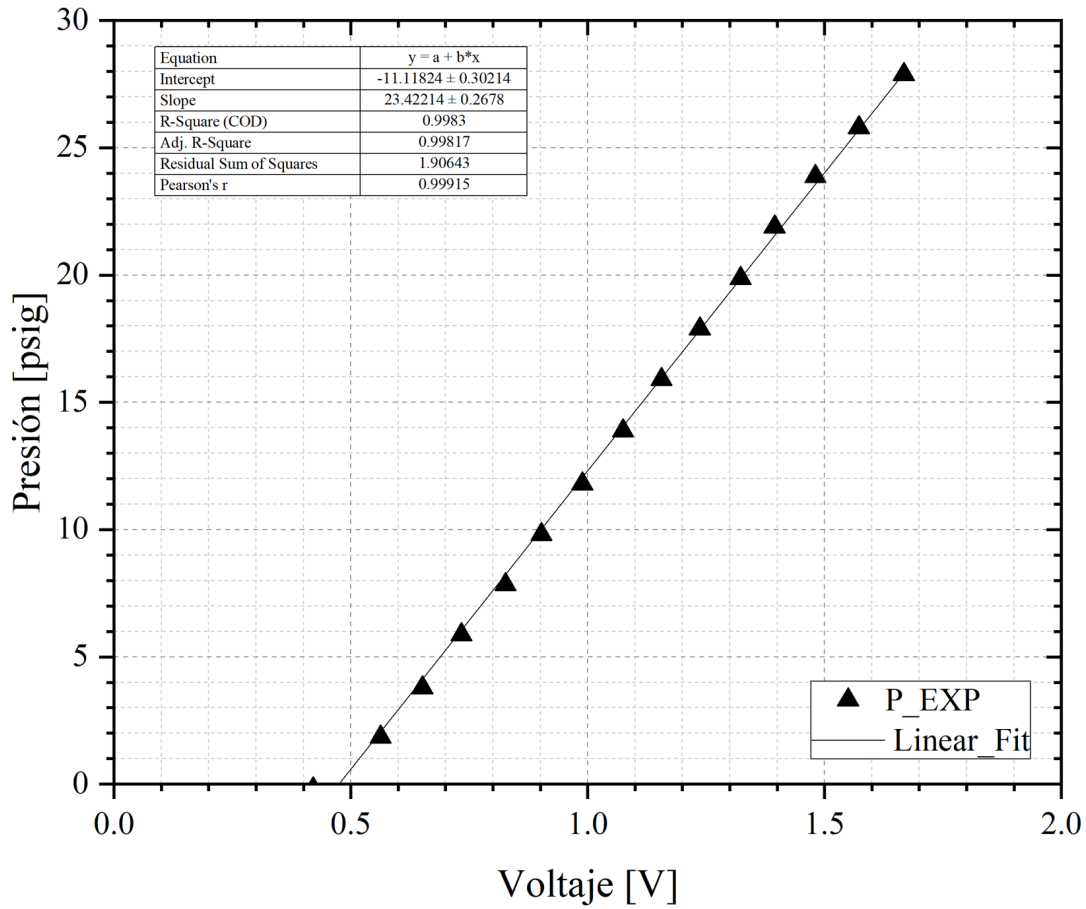


Figura 3.8: Curva de Ajuste del Sensor de Presión

La Ecuación 3.11 se programó en el microprocesador del sensor de presión.

$$P = 23.42 \cdot \hat{V} - 11.11 \quad (3.1)$$

### 3.2. Análisis Térmico de la Llama

Para el cumplimiento del Objetivo Específico No. 2, se realizaron pruebas experimentales por triplicado a diferentes aperturas de válvula y dos aperturas de disponibilidad de aires, como se muestra en la Tabla 3.5 . Así mismo la Figura 3.9 indica la metodología experimental realizada.

Tabla 3.5: Diseño de Experimentos

Variables	Niveles					
Apertura de la Válvula	50°		70°		90°	
Área de Succión de Aire	100 %	50 %	100 %	50 %	100 %	50 %

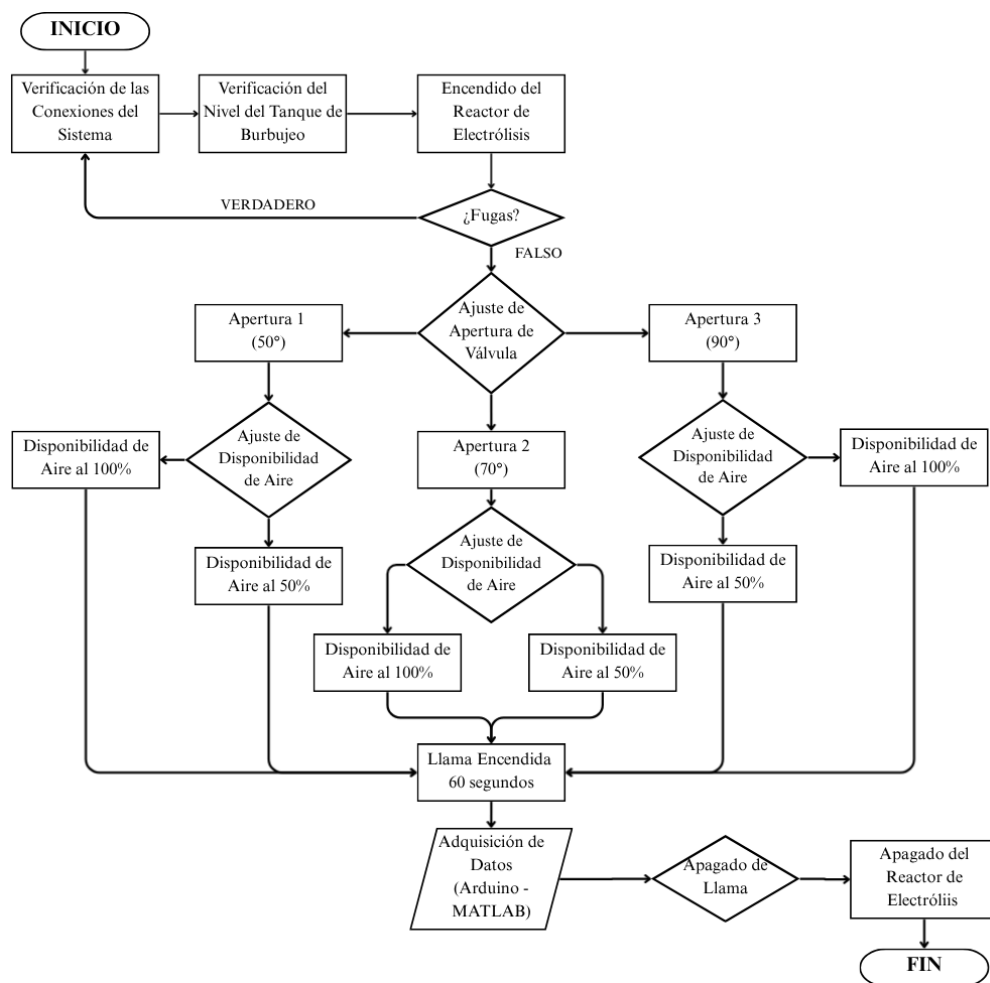


Figura 3.9: Metodología Experimental para el Análisis Térmico de la Llama

Las aperturas de válvula se determinaron a partir de la apertura máxima donde la llama se sostiene, dejando un margen de seguridad del 20 %. En cada experimento se midió los siguientes parámetros:

- Temperatura ( $T$ )
- Presión ( $P$ )
- Caudal ( $\dot{V}$ )
- Humedad Relativa ( $HR$ )

Una vez realizados los experimentos se grafican los perfiles térmicos determinando la temperatura de la llama. Para ello se emplean los valores adimensionales de la temperatura a lo largo de la zona de propagación la temperatura adimensional, denotada como  $\theta$ , respecto a la posición adimensional ( $X$ ) a lo largo del ducto, tal y como se muestra en la Ecuación 3.2.

$$\theta = f(X) \quad (3.2)$$

Basado en la consideración de que la dinámica de variación térmica a lo largo de la zona de propagación de los gases de combustión puede ser representada como una sucesión de estados cuasiestacionarios, se elige la condición en la cual se obtiene la temperatura máxima en la zona de propagación para determinar la temperatura de la llama .

El Balance General de Energía es:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} \pm \text{Generación} = \text{Acumulación} \quad (3.3)$$

Considerando como volumen de control la zona de propagación de los gases de combustión, el balance de energía del sistema experimental se describe mediante la Ecuación 3.4:

$$\rho \cdot C_P \cdot v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = -k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - A_t \cdot h \cdot (T - T_\infty) = 0 \quad (3.4)$$

Sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

$$T(0) = T_1, \quad T(H) = T_{11} \quad (3.5)$$

Se definen la temperatura y distancia axial adimensional como:

$$\theta = T_{(z)} - T_{\infty} \quad (3.6)$$

$$X = \frac{z}{H} \quad (3.7)$$

Empleando las definiciones adimensional de la temperatura y la distancia axial, así como agrupando términos el balance de energía queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\gamma \cdot H}{\lambda} \cdot \theta = 0 \quad (3.8)$$

La Ecuación 3.8 es una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden, donde  $\lambda$  y  $\gamma$  se definen de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{k}{\rho \cdot C_P \cdot v_z} \quad (3.9)$$

$$\gamma = \frac{A_t \cdot h}{\rho \cdot C_P \cdot v_z} \quad (3.10)$$

Con las siguientes condiciones de frontera:

$$\theta(0) = \theta_1, \quad \theta(1) = \theta_{T_{11}} \quad (3.11)$$

Que resolviendo de manera general nos queda:

$$\theta(X) = C_1 \cdot e^{(\alpha \cdot X)} + C_2 \cdot e^{(\beta \cdot X)} \quad (3.12)$$

Empleando las condiciones de frontera  $C_1$  y  $C_2$  se definen de la siguiente manera:

$$C_1 = \theta_1 - C_2 \quad (3.13)$$

$$C_2 = \frac{(\theta_{T_{11}} - \theta_1 e^\alpha)}{(e^\beta - e^\alpha)} \quad (3.14)$$

Los resultados obtenidos se compararán, con los obtenidos por la metodología de Y. Zhang et al., 2016, donde la temperatura de la llama se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta = e^{(-\alpha_z \cdot X)} - e^{(-\beta_z \cdot X)} \quad (3.15)$$

En donde los parámetros  $\alpha_z$  y  $\beta_z$  son coeficientes constantes determinados para cada experimento, facilitando la comparación y el análisis de los perfiles térmicos en diferentes sistemas. El ajuste de parámetros se realizó en MATLAB con optimización no lineal, realizando el ajuste de las curvas minimizando el error cuadrático medio, este análisis permite cuantificar el orden de magnitud del efecto de las variaciones en el flujo de gas de la mezcla  $H_2/O_2$  y el área de succión de aire del entorno influyen significativamente sobre la temperatura de la llama, la posición de la temperatura máxima y el gradiente térmico global de la zona de propagación.

### 3.3. Parámetros de Desempeño

Para dar cumplimiento al *Objetivo Específico No. 3*, se retomaron las ecuaciones (2.11) y (2.14) para el cálculo de la eficiencia térmica y el sostenimiento del gradiente térmico a partir de los datos experimentales obtenidos previamente, con base en las siguientes consideraciones:

- El calor generado en el proceso de combustión ( $\dot{Q}_{Sistema}$ ) se evalúa definiendo como volumen de control la zona de propagación de la llama y los gases de combustión (cámara de combustión), por lo que el gradiente térmico considerado para su cálculo es entre la temperatura

registrada por el termopar 1 ( $T_{MAX}$ ) y la temperatura del entorno ( $T_{\infty}$ ).

- Se considera que, en el volumen de control las variaciones en la capacidad calorífica son despreciables. Este valor es obtenido por simulación utilizando ASPEN PLUS empleando la ecuación de Peng-Robinson para el cálculo de propiedades termodinámicas.
- El sostenimiento térmico es calculado con las lecturas de los termopares  $T_1$  y  $T_{11}$  siendo los sensores que engloban la zona de propagación de la flama y gases de combustión, evaluándose en el estado en donde se alcanza la temperatura máxima del proceso.
- La eficiencia térmica del sistema experimental se define basado en lo reportado por Ahmadi et al., 2022 mediante la Ecuación 3.15:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{Sistema}}{\dot{Q}_{Combustible}} \quad (3.16)$$

Donde el calor generado por el sistema (Ecuación 3.16) y el calor generado por el combustible (Ecuación 3.17) se definen de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{Sistema} = \dot{m}_{mezcla} \cdot C_{PSistema} \cdot \Delta T \quad (3.17)$$

$$\dot{Q}_{Combustible} = \dot{m}_{Combustible} \cdot \Delta H_{RX} \quad (3.18)$$

- La morfología de la llama para este trabajo de tesis, se definen a partir de  $H_f$  (Altura de Llama),  $W_f$  (Ancho Máximo de Llama) y  $A_f$  (Área de Frente de Llama).

### 3.4. Caracterización Morfológica Ante Oscilaciones de Flujo

Como ya fue mencionado, la morfología de una llama comprende el color y su geometría, por lo que se realizaron pruebas experimentales emulando oscilaciones en la producción de mezcla de gas  $H_2/O_2$ , a diferencia de las pruebas experimentales del análisis térmico, estas pruebas tiene las siguientes consideraciones y condiciones experimentales (Tabla 3.6):

- Se retiraron los tres sensores más cercanos a la llama, con el fin de no interferir con la morfología o adquisición de imagen.
- Se cerro el área de succión de aire para analizar como única variable el efecto del flujo del gas  $H_2/O_2$  producido.
- Se instalo una entrada de flujo de aire constante, para mantener la temperatura del ducto por debajo de la temperatura de resistencia térmica (o a  $T_{min}$  de operación).

Tabla 3.6: Condiciones Experimentales Caracterización Morfológica

(a) Variables del Experimento	(b) Condiciones Ambientales	
<b>Apertura de Válvula</b>	<b>Condiciones Ambientales</b>	
40°	Temperatura (°C)	23.39
<b>Flujo Controlado de Aire</b>	Humedad Relativa (%)	35.00
$45.8333 \frac{cm^3}{s}$	Velocidad Promedio del Viento ( $m \cdot s^{-1}$ )	23.39

El sistema de monitoreo automatizado fue complementado con la instalación del sistema de captura y procesamiento de imágenes, la adquisición de imágenes se realiza por medio de un conjunto de cámaras de alta resolución, con transmisión de video en resolución 4K hasta 60 cuadros por segundos, permitiendo la captura precisa de imágenes de la zona de estudio. El procesamiento de imágenes es realizado en MATLAB, en el cuál, las imágenes obtenidas son preprocesadas, segmentadas, binarizadas y cuantificadas, permitiendo determinar la geometría de la llama y la distribución de colores. Posteriormente, a partir de la transformación del espacio de color se

extraen las características de color e iluminación de la llama que permita correlacionar el registro de datos experimentales y cuantificar un índice de estabilidad del proceso de combustión ante oscilaciones de flujo.

### 3.4.1. Cuantificación de Color

Las imágenes capturadas por el sistema de monitoreo son imágenes de “Color Verdadero”, por lo que se capturan miles o millones de colores, de ahí la necesidad de reducir la cantidad de colores para la extracción de información de color y cuantificar el índice de estabilidad.

Si dimensionamos una imagen de color “Verdadero” cuyos píxeles se encuentran en una matriz  $(H \times W)$ , en el espacio de color RGB cada píxel  $p_{x_{i,j}}$ , con  $i \in [1, H]$  y  $j \in [1, W]$ , se define por tres valores enteros del intervalo  $[0, 255]$  que representa cantidades del color rojo, verde y azul, de manera que  $p_{x_{i,j}} = (R_{i,j}, G_{i,j}, B_{i,j})$ . Aplicando la cuantificación de color obtendremos una nueva imagen con un número limitado de colores distintos  $q$ , resultando en que la paleta de colores original sea mucho mayor que el tamaño de la paleta de colores utilizada para representar la imagen cuantificada.

De manera que  $p'_{x_{i,j}} = (R'_{i,j}, G'_{i,j}, B'_{i,j})$  denotará al píxel de la imagen cuantificada en la fila  $i$  y la columna  $j$  con  $i \in [1, H]$  y  $j \in [1, W]$ , por lo tanto  $p'_{x_{i,j}}$  ocupa en la imagen cuantificada la misma posición que  $p_{x_{i,j}}$  en la imagen original. El algoritmo de este proceso de muestra en la siguiente figura (3.10):

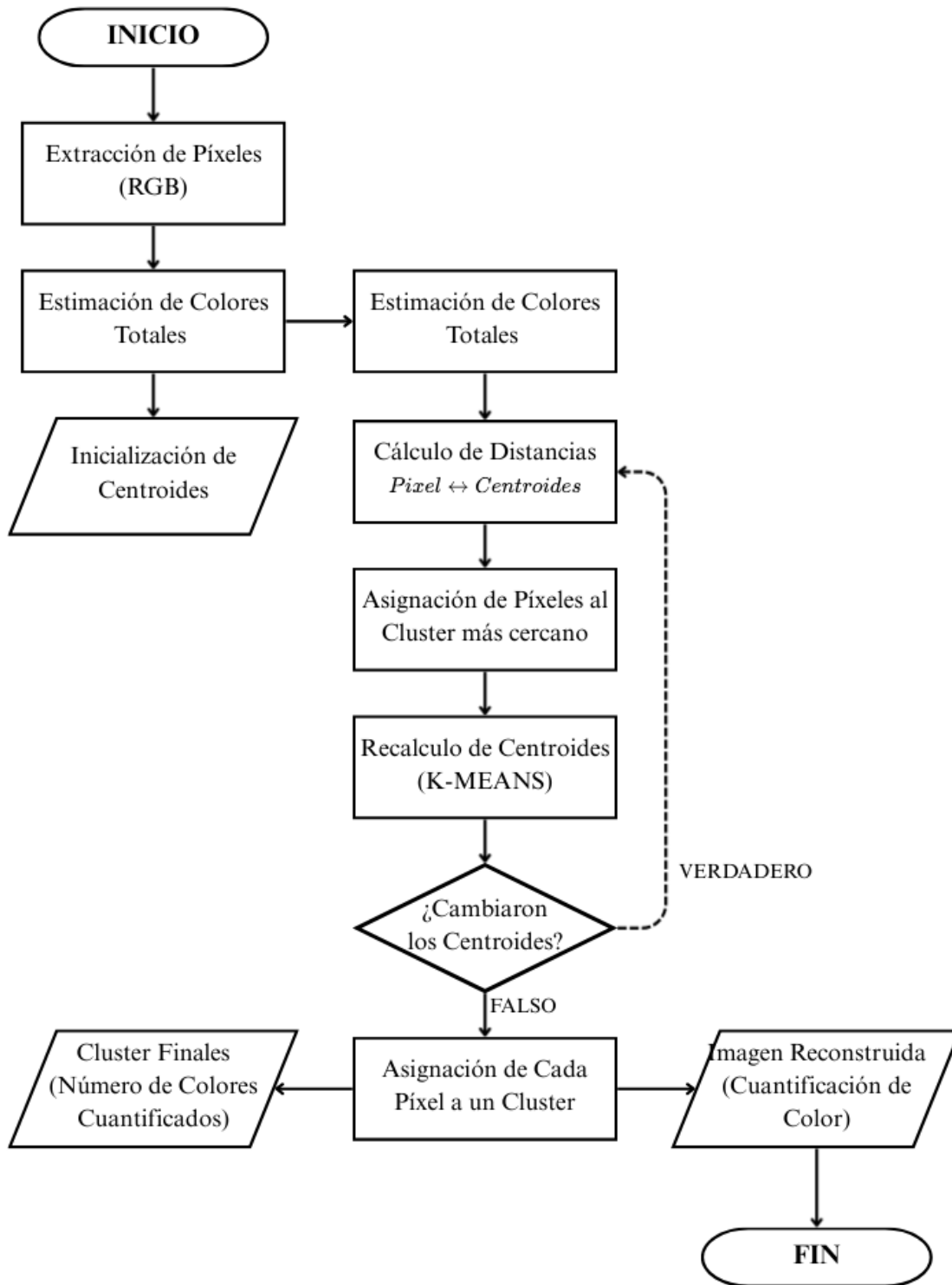


Figura 3.10: Algoritmo de Cuantificación de Color

### 3.4.2. Transformación del Espacio de Color

Debido a las limitantes del espacio de color RGB (alta correlación entre sus componentes), se opta por realizar los análisis de color HSI debido a la separación del contenido cromático (tono y saturación) del componente de brillo (intensidad), por lo que descompone la información en parámetros más interpretables. La conversión desde el espacio de color RGB hacia HSI se realiza mediante las siguientes ecuaciones:

#### Intensidad (I)

La intensidad representa el brillo percibido del píxel, y se calcula como el promedio aritmético de las tres componentes de color:

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (3.19)$$

#### Saturación (S)

La saturación mide la pureza del color, una saturación de cero indica un tono gris sin color, mientras que una saturación máxima representa un color puro.

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} \cdot \min(R, G, B) \quad (3.20)$$

#### Tono (T)

El tono se calcula como un ángulo en el círculo cromático, y depende de la relación entre las diferencias de los componentes RGB.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2+(R-B)(G-B)}} \right)$$

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{si } B \leq G \\ 2\pi - \theta, & \text{si } B > G \end{cases} \quad (3.21)$$

El valor del tono se convierte de radianes a grados para expresar su posición dentro del círculo cromático.

### 3.5. Índice de Estabilidad de Combustión

La Figura 3.11 esquematiza un diagrama de bloques del método de medición de estabilidad de la llama, observando la integración del Sistema de Monitoreo Automatizado con el sistema de captura y procesamiento de imágenes. Seis parámetros estadísticos característicos de la llama son extraídos en el procesamiento de imágenes, dentro de la morfología se obtiene la altura y el ancho máximo de llama, al igual que el área del frente de llama, y complementando, el espacio de color HSI permite obtener de manera separada la información de color (tono y saturación) y la información de iluminación (intensidad).

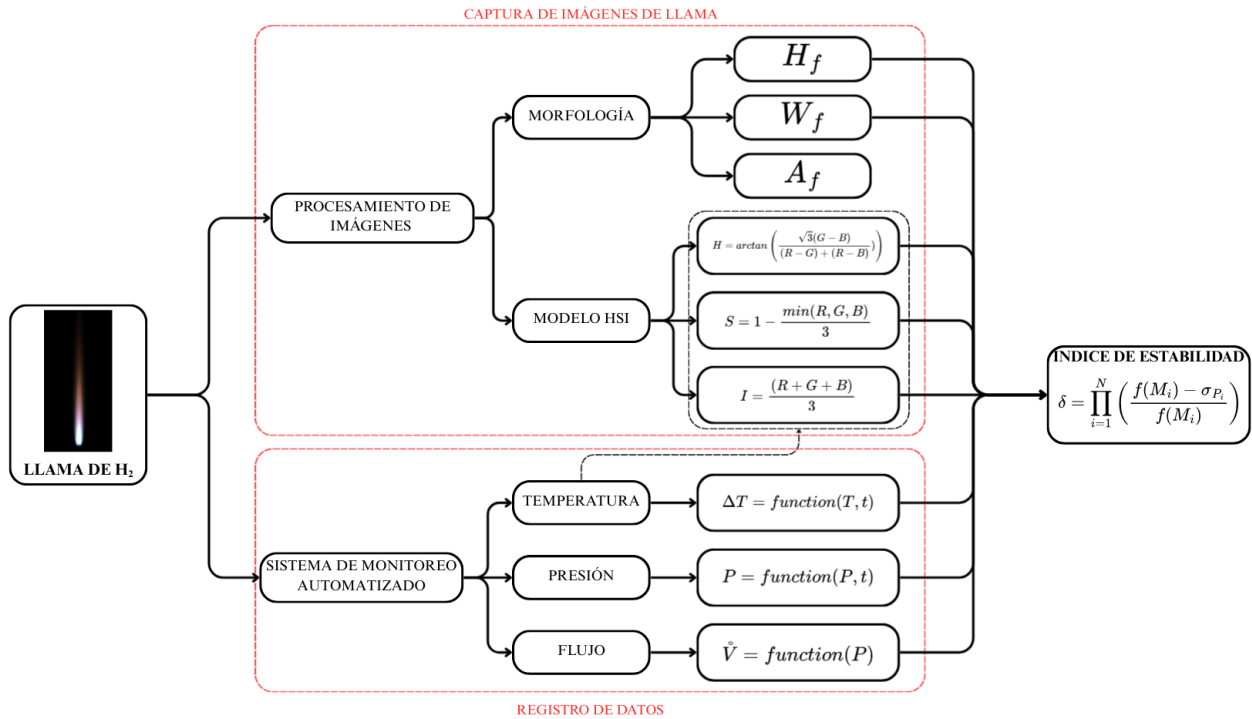


Figura 3.11: Diagrama de Bloques del Método de Evaluación de Estabilidad de Llama.

El índice de estabilidad fusiona las desviaciones estándar de los parámetros de desempeño junto con los parámetros estadísticos característicos del análisis de imágenes, de acuerdo con la ecuación:

$$\delta_f = \prod_{i=1}^N \left( \frac{M_i - \sigma_{M_i}}{M_i} \right) \in [0, 1] \quad (3.22)$$

Donde  $\delta_f$  es el índice de estabilidad del proceso de combustión,  $M_i$  es el parámetro evaluado y  $\sigma_{M_i}$  es la desviación estándar del parámetro. Debido a que cada parámetro representa una propiedad física diferente del proceso de combustión, cada parámetro se normaliza, por lo que las cantidades normalizadas son adimensionales y se encuentran dentro del dominio de [0, 1].

# Capítulo 4

---

## Resultados

---

## 4.1. Sistema de Monitoreo

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en pruebas preliminares para el cumplimiento del primer objetivo específico, lo que permitió el desarrollo de las herramientas gráficas del sistema de monitoreo, actualizando cada valor en tiempo real, permitiendo al usuario validar las condiciones térmicas en la zona de propagación de la llama, y a su vez se almacena la información creando bases de datos para la evaluación del análisis térmico de la llama, así como el cálculo de los parámetros de desempeño.

### 4.1.1. Pruebas Experimentales Preliminares

En la Tabla 4.1 se muestran las condiciones ambientales de los escenarios de las pruebas experimentales preliminares.

Tabla 4.1: Condiciones Ambientales de Pruebas Experimentales Preliminares.

<b>Prueba Experimental Representativa 1 (Clima sin Lluvia)</b>		<b>Prueba Experimental Representativa 2 (Clima con Lluvia)</b>	
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	21.1	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	14.1
Humedad Relativa (%)	20.0	Humedad Relativa (%)	80.0
Velocidad Promedio del Viento ( $m \cdot s^{-1}$ )	1.8	Velocidad Promedio del Viento ( $m \cdot s^{-1}$ )	8.61

La Tabla 4.2 muestra valores estadísticos como la media ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma^2$ ) respecto al tiempo para las pruebas experimentales representativas, para cada posición dada, donde se observa que los sensores en las posiciones radial ( $T_{1R}$  y  $T_{2R}$ ) presentan menor desviación estándar temporal con valores entre  $0.49 K$  y  $0.92 K$ . Sin embargo, las mediciones en dirección axial presentan mayor desviación estándar temporal, con un máximo de  $352.74 K$ , mostrando un mayor impacto en esta dirección, en comparación con la dirección radial.

Tabla 4.2: Valores Estadísticos de las Pruebas Preliminares

Posición	Media ( $\bar{x}$ ) [ $^{\circ}C$ ]		Desviación Estándar ( $\sigma^2$ ) [ $^{\circ}C$ ]	
$T_{1R}$	24.23	26.64	0.49	0.86
$T_{2R}$	24.07	26.50	0.30	0.92
$T_3$	263.79	352.74	63.70	103.30
$T_4$	145.71	105.18	45.24	36.50
$T_5$	147.22	45.03	36.12	11.59
$T_6$	37.22	30.37	6.39	9.62

La Figura 4.1 muestra la evolución temporal de la temperatura promedio obtenida a partir de las pruebas representativas. Las bandas de error representan la desviación estándar calculada en cada segundo, lo cual refleja reproducibilidad para los sensores dispuestos en la posición radial. Los sensores dispuestos en la dirección axial reflejan poca reproducibilidad, sin embargo, conforme se incrementa la distancia en la dirección axial, la desviación estándar disminuye.

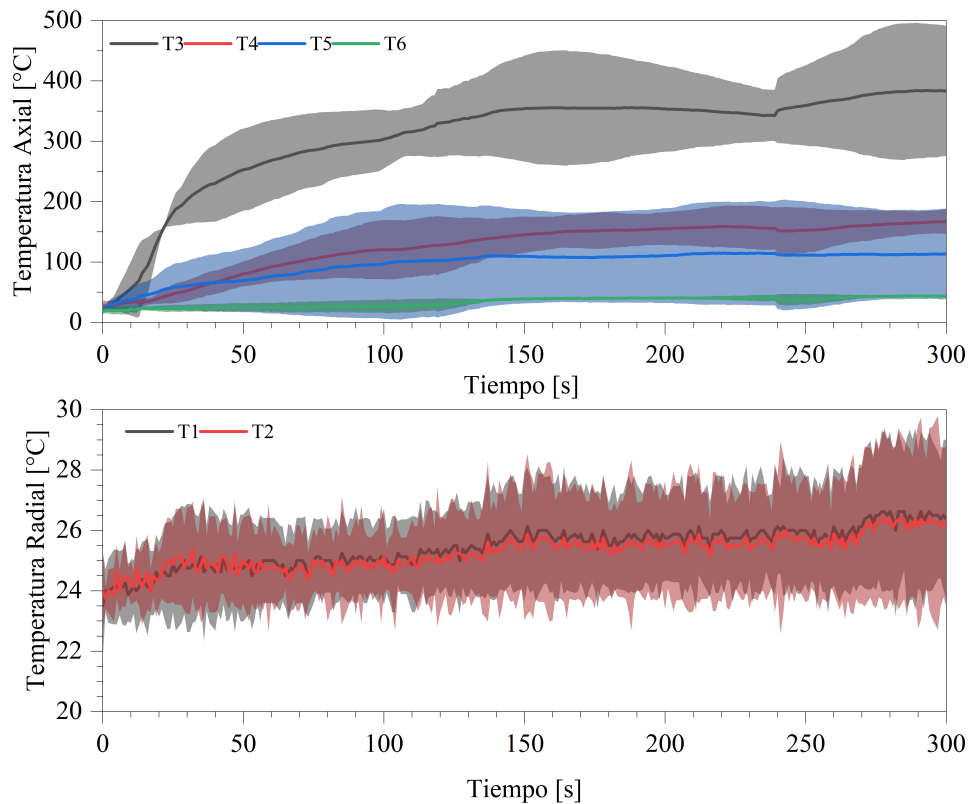
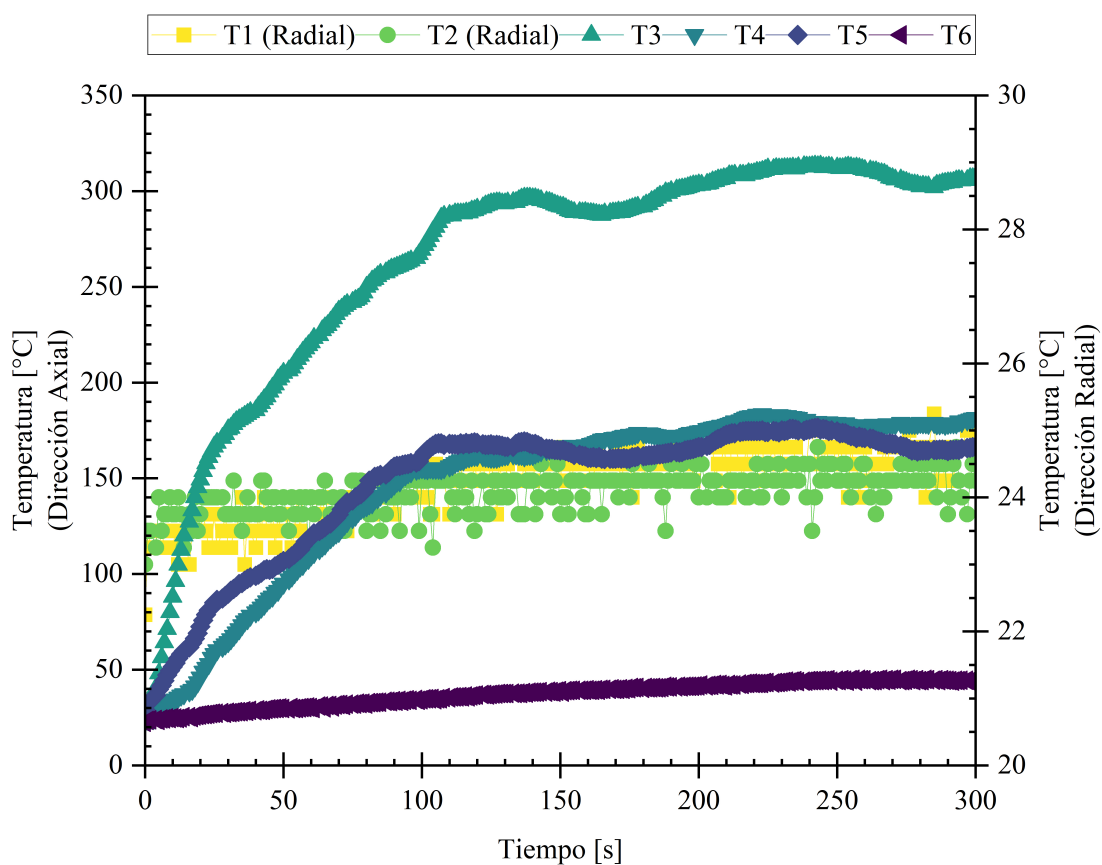


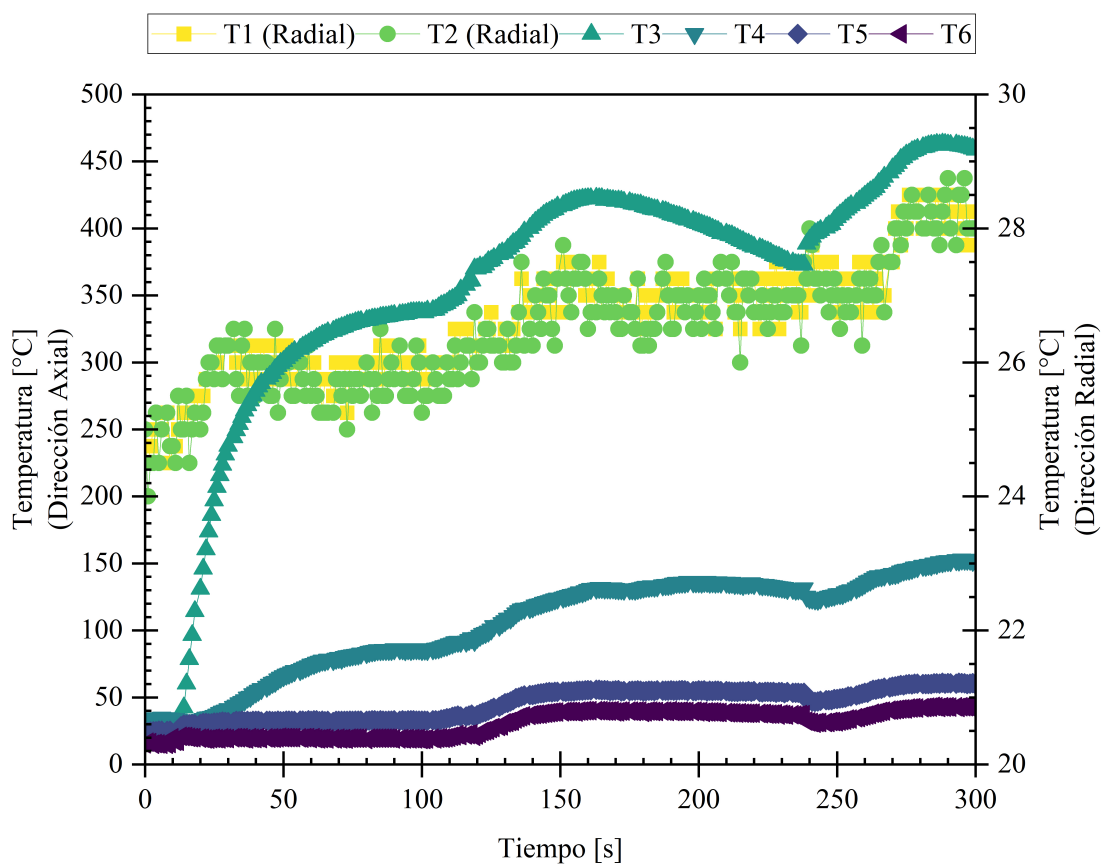
Figura 4.1: Consistencia Experimental Entre Pruebas

En la Figura 4.2 se muestran los perfiles térmicos obtenidos en estas dos pruebas preliminares. El sensor  $T_3$ , de acuerdo a los datos experimentales corresponden al valor de temperatura más alto, tal y como se muestra en la Figura 4.2a, correspondiente a la posición más cercana a la llama. En cuanto al resto de sensores dispuestos en la dirección axial, observamos una tendencia significativa a la disminución de la temperatura promedio, así como una reducción en la dispersión de los datos. Debido a la alta desviación en la medición de los sensores dispuestos en la dirección axial, se optó por confinar el sistema, tratando de minimizar aquellos factores externos que puedan afectar la confiabilidad de las mediciones experimentales (vibraciones o condiciones ambientales).



(a) Prueba Experimental Preliminar 1

Figura 4.2: Pruebas Experimentales Preliminares (parte 1)



(b) Prueba Experimental Preliminar 2

Figura 4.2: Pruebas Experimentales Preliminares (continuación)

## 4.2. Análisis Térmico de la Llama

Las condiciones experimentales se muestran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 para las dos aperturas de succión de aire, 100 % y 50 % respectivamente.

Tabla 4.3: Condiciones Experimentales (Área de Succión de Aire al 100 %)

Experimento	Ángulo de Apertura de Válvula [En Grados]	Fracción de Apertura de Válvula	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura de Entrada de Cámara [°C]	Temperatura de Salida de Cámara [°C]	Temperatura de Confinamiento [°C]	Humedad Ambiente $\left[ \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{aireseco}}} \right]$
01	50.0	45.5 %	21.44	25.75	24.50	23.80	0.015
02	50.0	45.5 %	21.33	26.00	25.75	25.30	0.015
03	50.0	45.5 %	22.67	26.00	25.75	25.30	0.015
01	70.0	63.6 %	20.39	27.25	25.75	26.70	0.017
02	70.0	63.6 %	17.83	26.25	25.00	25.80	0.014
03	70.0	63.6 %	17.50	26.50	26.75	25.80	0.014
01	90.0	81.8 %	21.56	23.00	22.50	23.00	0.015
02	90.0	81.8 %	24.06	27.00	26.25	26.20	0.015
03	90.0	81.8 %	24.06	26.75	27.00	26.20	0.015

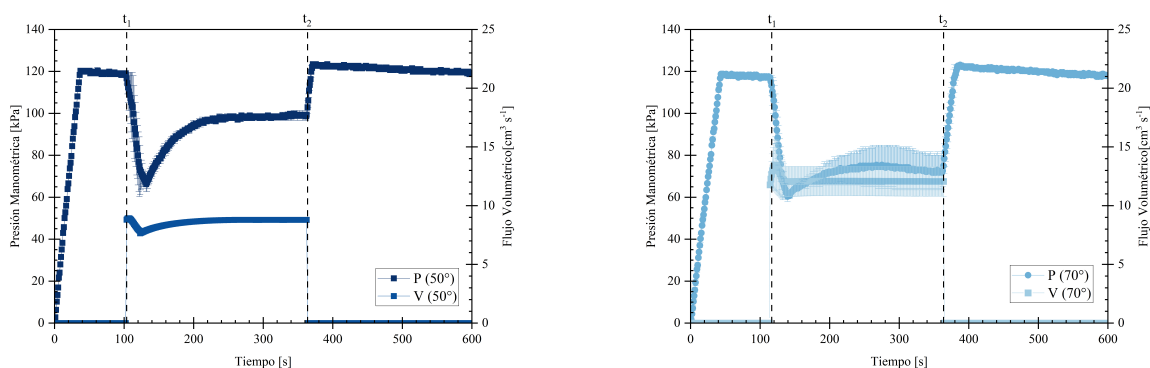
Tabla 4.4: Condiciones Experimentales (Área de Succión de Aire al 50 %)

Experimento	Ángulo de Apertura de Válvula [En Grados]	Fracción de Apertura de Válvula	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura de Entrada de Cámara [°C]	Temperatura de Salida de Cámara [°C]	Temperatura de Confinamiento [°C]	Humedad Ambiente $\left[ \frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{aireseco}}} \right]$
01	50.0	45.5 %	23.83	24.50	24.50	24.50	0.008
02	50.0	45.5 %	23.44	25.00	23.00	24.50	0.008
03	50.0	45.5 %	23.33	25.75	25.00	24.50	0.008
01	70.0	63.6 %	16.86	21.75	20.00	21.00	0.005
02	70.0	63.6 %	19.87	21.75	21.00	21.40	0.006
03	70.0	63.6 %	20.78	22.50	22.25	22.20	0.005
01	90.0	81.8 %	21.56	23.00	22.50	23.00	0.005
02	90.0	81.8 %	24.00	24.75	25.25	24.10	0.005
03	90.0	81.8 %	25.06	24.75	25.00	24.80	0.006

A partir de las mediciones experimentales del caudalímetro se desarrollo un modelo experimental, mostrado en la ecuación (4.1):

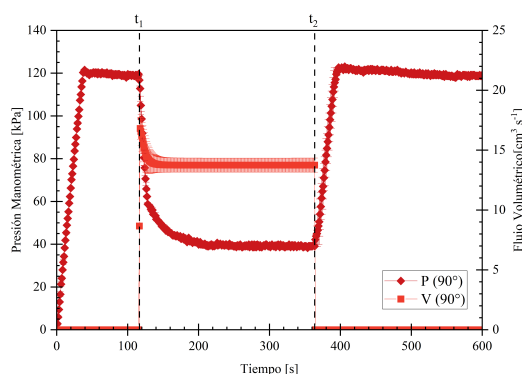
$$\dot{V} = \text{función}(P) = A \cdot e^{(B \cdot P)} + \Gamma \cdot e^{(E \cdot P)} \quad (4.1)$$

El efecto de la presión operativa del reactor de electrólisis al flujo volumétrico se observa en la Figura 4.3 para un área de succión de aire del 100%. Cada punto de las curvas corresponde al promedio de tres replicas independientes, con el fin de reducir la dispersión de los datos experimentales.



(a) Apertura de Válvula a 50°

(b) Apertura de Válvula a 70°



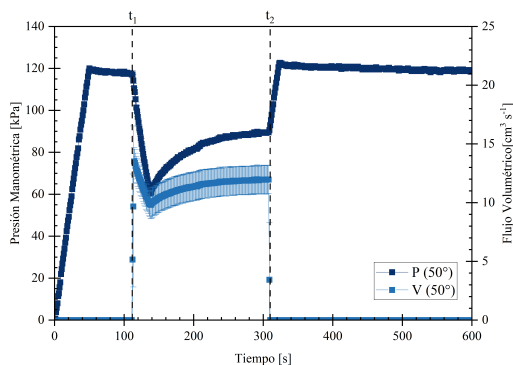
(c) Apertura de Válvula a 90°

Figura 4.3: Presión vs Flujo (Área de Succión de Aire al 100%),  $t_1$  = Tiempo de encendido,  $t_2$  = Tiempo de apagado

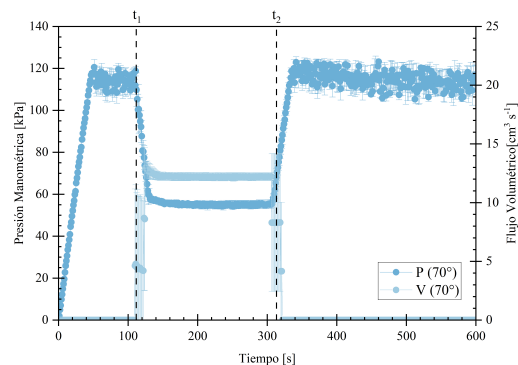
La Figura 4.3a representa la variación de la presión y del flujo volumétrico para una apertura de válvula de 50° (45.5%), teniendo un flujo promedio de gas  $H_2/O_2$  de  $8.60 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , permitiendo alcanzar el estado estacionario para la presión (98.42 kPa) en un tiempo de 130 segundos, para un tiempo experimental de 260 segundos. La Figura 4.3b representa el punto medio de apertura de válvula (70° - 63.6%), teniendo un flujo volumétrico promedio de  $12.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  con un incremento del  $37.4\% \pm 0.04\%$  con respecto a la apertura de 50° (durante los últimos 60 segundos

de apertura), sin embargo, la presión tiene una reducción del  $26.10\% \pm 1.00\%$  con un valor en el estado estacionario de  $73.16\text{ kPa}$ , alcanzado a los 170 segundos de un tiempo total experimental de 250 segundos, indicando que a mayor apertura de válvula mayor el consumo de hidrógeno, de manera que el reactor compensa la producción del gas, se observa que esta apertura de válvula tiene mayor dispersión que los otros experimentos. Así mismo, la Figura 4.3c muestra los experimentos realizados con la apertura de válvula de  $90^\circ$  ( $81.8\%$ ) donde se observa el mayor flujo volumétrico promedio de  $13.82\text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , con un incremento del  $56.48\% \pm 0.02\%$  en comparación con la apertura de válvula de  $50^\circ$  y del  $13.94\% \pm 0.03\%$  con la apertura de válvula de  $70^\circ$ , así mismo, en un tiempo de 95 segundos se alcanza la presión en estado estacionario de  $39.25\text{ kPa}$  representando el menor valor, con una reducción del  $60.36\% \pm 0.43\%$  en comparación con la apertura de válvula de  $50^\circ$  y de  $46.35\% \pm 0.64\%$  con la apertura de válvula de  $70^\circ$ , determinando la cantidad de gas de hidrógeno consumido por el proceso de combustión.

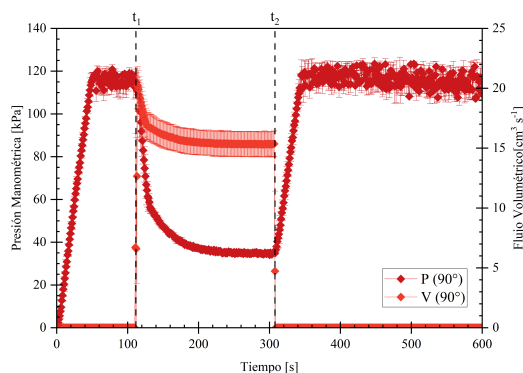
La Figura 4.4 muestra el efecto de la presión al flujo volumétrico para un área de succión de aire del 50 %.



(a) Apertura de Válvula a 50°



(b) Apertura de Válvula a 70°



(c) Apertura de Válvula a 90°

Figura 4.4: Presión vs Flujo (Área de Succión de Aire al 50 %),  $t_1$  = Tiempo de encendido,  $t_2$  = Tiempo de apagado

La Figura 4.4a muestra la apertura de válvula de 50° (45.5 %), con un flujo volumétrico promedio de  $11.4 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , representando nuevamente el menor flujo volumétrico promedio, alcanzando un estado cuasiestacionario de presión a los 100 s, con un valor promedio de  $88.45 \text{ kPa}$ , para un tiempo experimental total de  $\approx 200 \text{ s}$ . La Figura 4.4b representa la apertura de válvula de 70° (63.6 %), con un flujo volumétrico promedio de  $12.0 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , lo que representa un incremento del  $5.2 \% \pm 0.48 \%$  con respecto a la apertura previa, alcanzado el estado estacionario de presión en menor tiempo ( $\approx 70 \text{ s}$ ) con un valor de  $55.08 \text{ kPa}$ , teniendo una reducción del  $37.7 \% \pm 0.58 \%$  para el mismo tiempo experimental total. La Figura 4.4c indica los experimentos con la mayor

apertura de válvula ( $90^\circ - 81.8\%$ ), encontrando un flujo volumétrico promedio de  $15.8 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  indicando un incremento del  $32.5\% \pm 0.69\%$  en comparación con la apertura de válvula de  $50^\circ$  y de  $31.7\% \pm 0.17\%$  con la apertura  $70^\circ$ , alcanzando estado estacionario a los 130 s de iniciado el experimento, con un valor de  $34.9 \text{ kPa}$ , indicando una reducción de  $60.5\% \pm 0.58\%$  en comparación con la apertura de válvula de  $50^\circ$  y de  $36.7\% \pm 0.66\%$  con la apertura de  $70^\circ$ .

Ambos experimentos realizados con diferentes áreas de succión mantienen el mismo comportamiento, menores flujos volumétricos para menores aperturas de válvula, al igual, mayores aperturas de válvula dan como resultado menores valores de presión.

La Figura 4.5 muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo para diferentes aperturas de válvula con un área de succión de aire del 100 %, cada punto de las curvas corresponde al promedio de tres replicas de los datos registrados por el sensor más cercano a la llama ( $T_1$ ) con tiempos experimentales de 60 segundos de llama encendida. Como puede observarse en la Figura 4.5, para una apertura de válvula de  $50^\circ$  (45.5 %, línea gris) la temperatura máxima promedio tiene un valor de  $612.88\text{ }^\circ\text{C} \pm 25.375\text{ }^\circ\text{C}$ , siendo el valor más alto de temperatura, para una apertura de válvula de  $70^\circ$  (63.6 %, línea roja), la temperatura máxima promedio alcanza un valor de  $591.08\text{ }^\circ\text{C} \pm 72.97\text{ }^\circ\text{C}$ , siendo la apertura de válvula con mayor dispersión experimental de las tres aperturas. La apertura de válvula de  $90^\circ$  (81.8 %, línea roja) alcanza una temperatura máxima promedio de  $579.37\text{ }^\circ\text{C} \pm 15.87\text{ }^\circ\text{C}$ .

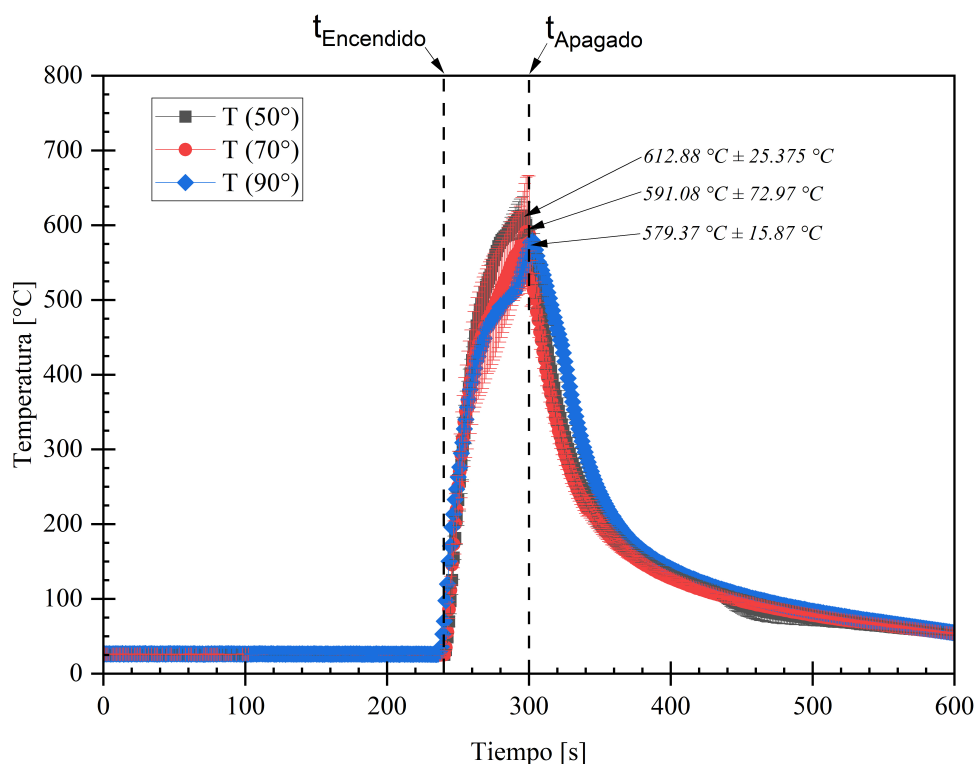


Figura 4.5: Dispersión del Perfil Térmico Promedio del Primer Sensor de Temperatura (Área de Succión de Aire a 100 %)

La Figura 4.6 muestra la dispersión experimental de la temperatura registrada por el sensor más cercano a la llama con respecto al tiempo de los experimentos a diferentes aperturas de válvula realizados con un área de succión de aire del 50 %. Nuevamente, cada punto representa el promedio de tres replicas para tiempo experimental de 60 segundos de llama encendida. Observándose que para la apertura de válvula de 50° (45.5 %, línea gris), se alcanza una temperatura máxima promedio de  $752.83\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 24.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siendo nuevamente la temperatura experimental más alta. La apertura de válvula de 70° (63.6 %, línea roja) alcanza una temperatura máxima promedio de  $715.88\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 31.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  y por su parte, la apertura de válvula de 90° alcanza una temperatura promedio de  $665.33\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 37.07\text{ }^{\circ}\text{C}$  representando el menor valor de temperatura con la mayor dispersión experimental.

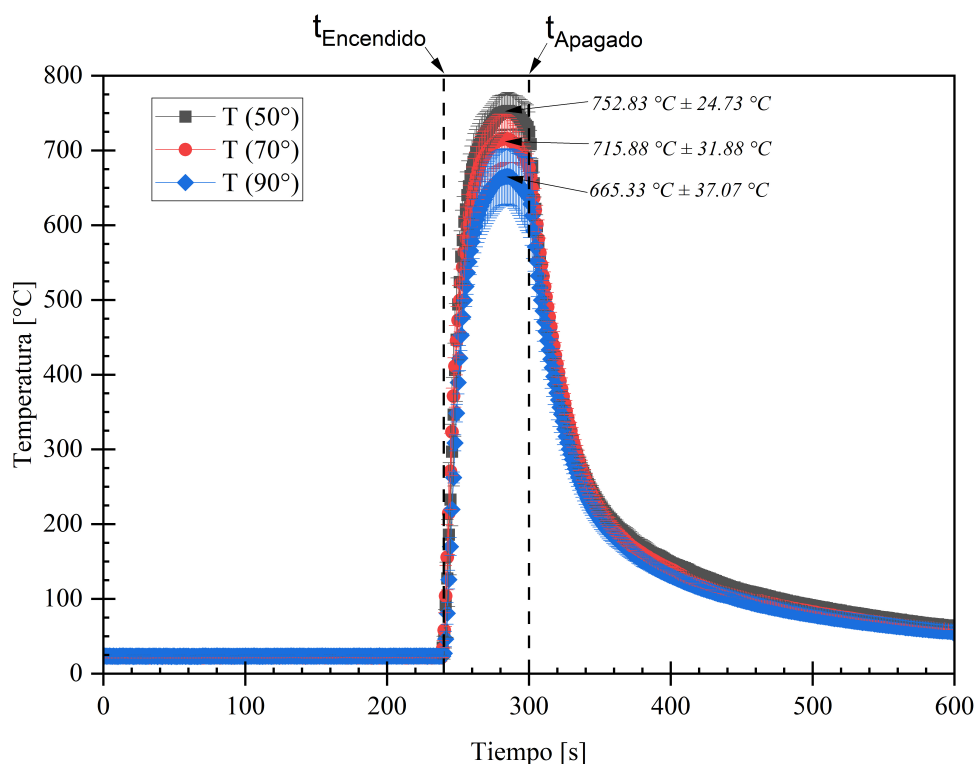


Figura 4.6: Dispersión del Perfil Térmico Promedio del Primer Sensor de Temperatura (Área de Succión de Aire a 50 %)

La Figura 4.7 presenta las temperaturas máximas promedio obtenidas para cada apertura de válvula, evidenciándose una relación inversa entre ambas variables. A medida que disminuye la apertura de válvula, la temperatura máxima registrada tiende a incrementarse.

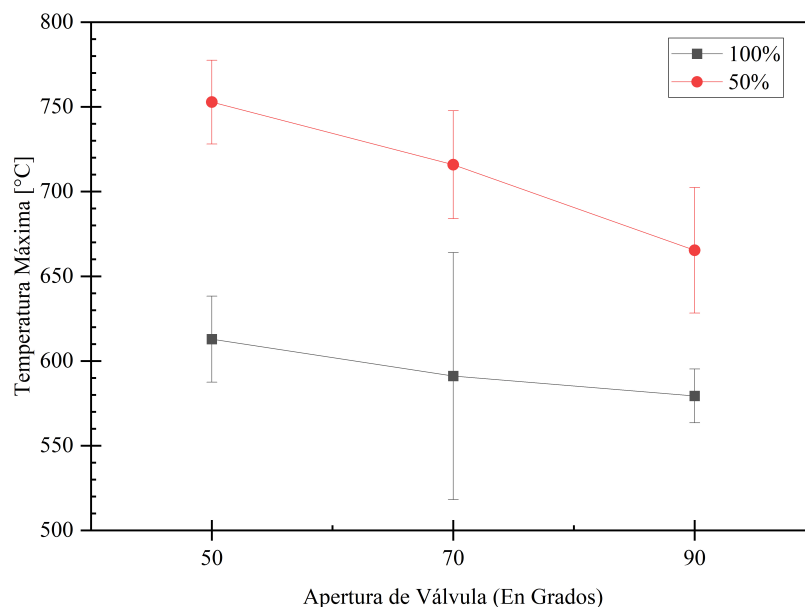


Figura 4.7: Temperatura Máxima Promedio vs Apertura de Válvula Para Ambas Área de Succión.

De acuerdo con A. Zhang et al., 2024, una mayor presión resulta en valores de temperatura más altos, si consideramos que las aperturas de válvula presentan los valores de presión manométrica más altos, tal y como se muestran en la Tabla 4.5, podemos concluir que la apertura de válvula condiciona la temperatura máxima promedio alcanzada.

Tabla 4.5: Condiciones de Experimentos Promedio.

Apertura de Válvula	Área de Succión de Aire	Flujo Volumétrico Promedio [ $cm^3 \cdot s^{-1}$ ]	Presión Manométrica Promedio [ $kPa$ ]
50°	100 %	8.6	98.42
70°	100 %	12.1	73.16
90°	100 %	13.8	39.25
50°	50 %	11.4	88.45
70°	50 %	12.0	55.08
90°	50 %	15.8	34.90

Por su parte, Abdelhafez, 2024 demostraron que el enriquecimiento de hidrógeno de manera premezclada en cámaras de combustión mejora la estabilidad del proceso de combustión, permitiendo alcanzar niveles más altos de temperatura, por lo que, si planteamos que el área de succión de aire de 50 % representa, en comparación con el área de succión de aire al 100 %, un escenario enriquecido en hidrógeno, da como resultado valores de temperatura más elevados, tal y como se mostró en la Figura 4.7.

Se estimó el número de Reynolds ( $Re$ ) para cada experimento haciendo uso de la Ecuación (2.9), observando como el número de Reynolds incrementa conforme la apertura de válvula incrementa tal y como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Número de Reynolds Para Todos los Experimentos.

Apertura de Válvula	Área de Succión de Aire	Número de Reynolds ( $Re$ )	Régimen
50° (45.45 %)	50 %	240.17 ± 31.10	Laminar
	100 %	172.46 ± 16.45	Laminar
70° (63.64 %)	50 %	259.13 ± 7.83	Laminar
	100 %	255.50 ± 27.24	Laminar
90° (81.82 %)	50 %	333.17 ± 27.70	Laminar
	100 %	262.73 ± 46.73	Laminar

Cai et al., 2024 demostraron que al aumentar el número de  $Re$ , se tiene un proceso de combustión con mayor eficiencia, logrando obtener valores de temperatura más altos, tal y como se muestra en la Tabla 4.6, un área de succión de aire al 50 % presenta valores del número de  $Re$  mayores, logrando temperaturas más altas en comparación con un área de succión de aire al 100 %, como se indicó previamente (Figura 4.7), un número de  $Re$  menor indica una menor eficiencia de combustión, teniendo como resultado valores menores de temperatura (Área de succión de aire al 100 %).

De acuerdo con Murphy et al., 2024, el número de Reynolds promediado en ambas condiciones de disponibilidad de aire (100 % y 50 %) evidencian una clara relación lineal con respecto a la velocidad, tal y como se muestra en la Figura 4.8, donde un aumento de la velocidad conduce a un aumento correspondiente y proporcional al  $Re$ . Para el presente trabajo de investigación la relación lineal entre el número de Reynolds ( $Re$ ) y la velocidad ( $v$ ) se describe mediante la siguiente ecuación:

$$Re = 313.47624 \cdot v + 4.06E^{-13} \quad (4.2)$$

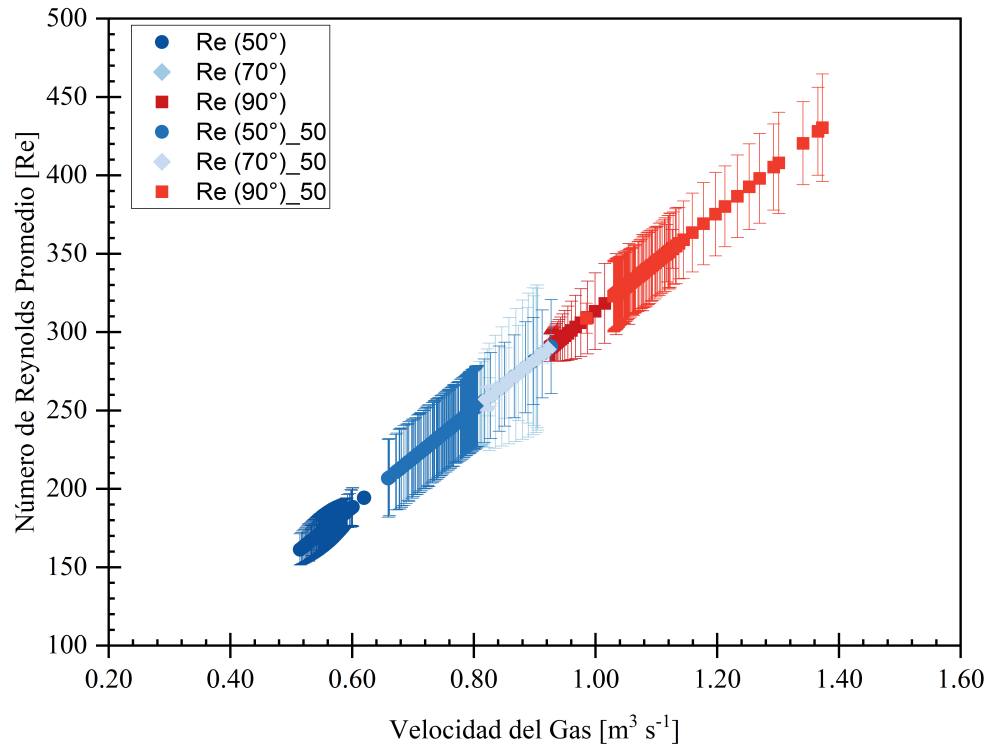


Figura 4.8: Número de Reynolds vs Velocidad del Gas para Ambas Áreas de Succión de Aire

En la Figura 4.9 se muestran los perfiles de temperatura experimentales a lo largo de la dirección axial dentro de la cámara de combustión con respecto a la posición adimensional de los sensores, mostrando que las máximas temperaturas (del sensor  $T_1$ ) registradas corresponden a los experimentos con área de succión de aire de 50 %.

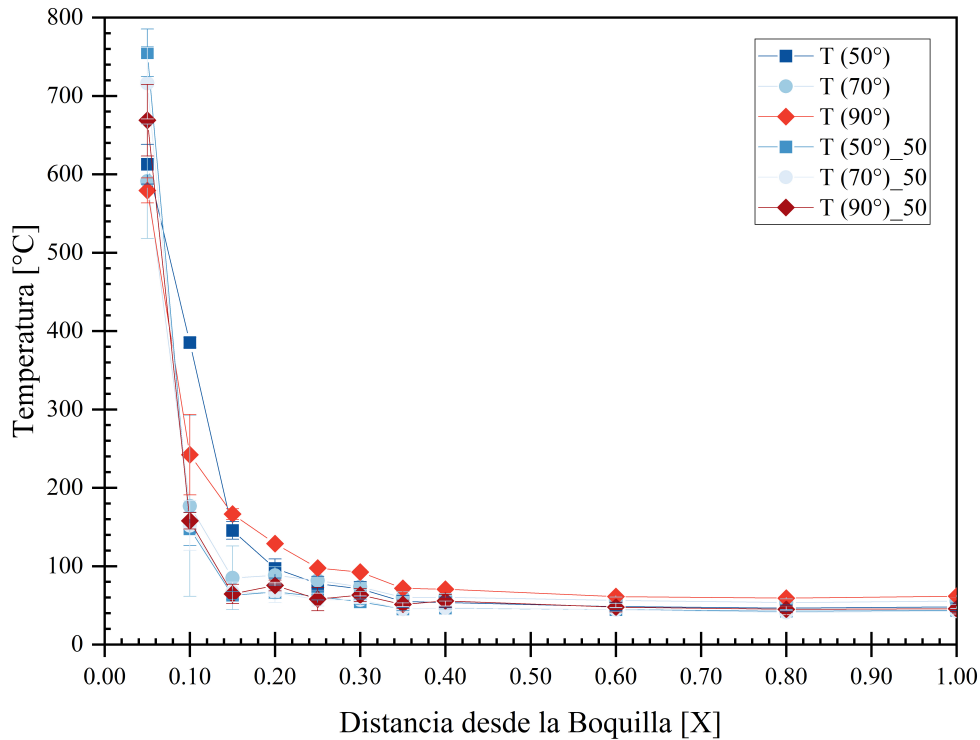


Figura 4.9: Perfiles de Temperatura Experimental en la Cámara de Combustión

En el caso de la apertura de válvula de 50° se tiene un incremento de temperatura del 29.77 % con respecto a el área de succión de aire de 100 %, de igual manera, la apertura de válvula de 70° tiene un incremento de temperatura del 3.17 %, y finalmente la apertura de válvula de 90° alcanza un incremento de temperatura de 15.47 %. Sin embargo, conforme incrementa la distancia desde la boquilla, los perfiles de temperatura se invierten, mostrando una mejor distribución de las temperatura a lo largo de la cámara de combustión para los experimentos con área de succión de aire de 100 %. Lo que significa que la apertura de válvula de 50° con 50 % de área de succión de

aire tiene un decremento de temperatura que va desde 15.48 % hasta un 56.86 %, la apertura de válvula de 70° de igual manera tiene un decremento de temperatura en un rango desde 24.58 % hasta un 45.56 % siendo la apertura con menor caída, y por ultimo, la apertura de válvula de 90° tiene un decremento de temperatura que va desde 21.18 % hasta un máximo de 61.23 % siendo la apertura de válvula con peor caída de temperatura. Puede observarse como la temperatura no varía significativamente en cada experimento después de 30 cm teniendo dispersión experimental en un rango de 1.50°C hasta un máximo de 4.40°C.

La solución del balance de energía adimensional de la cámara de combustión se presenta en la Ecuación 4.3:

$$\theta(X) = \theta_1 + \left( \frac{\theta_{T_{11}} - \theta_1 \cdot e^\alpha}{e^\beta - e^\alpha} \right) \cdot (e^{\beta \cdot X} - e^{\alpha \cdot X}) \quad (4.3)$$

Los valores para  $\alpha$  y  $\beta$  del modelo desarrollado en este trabajo de investigación se compara con los valores de  $\alpha_z$  y  $\beta_z$  empleados en la metodología Y. Zhang et al., 2016, haciendo uso de los mismo valores experimentales para ambos modelos, mostrando los experimentos con un área de succión de aire al 100 % en la Tabla 4.7, y la Tabla 4.8 muestra los experimentos realizados con un área de succión de aire al 50 %.

Tabla 4.7: Comparación de los Valores  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_z$  y  $\beta_z$  para un Área de Succión de Aire del 100 %.

Apertura de Válvula	Experimento	$T_1$ [°C]	$T_{11}$ [°C]	Haro-Zamora et al., 2025			Y. Zhang et al., 2016		
				$\alpha$	$\beta$	$R^2$	$\alpha_z$	$\beta_z$	$R^2$
50°	001	21.44	43.25	-1.19 (-2.27, -0.11)	-70.67 (-102.02, -39.32)	0.9979	20.34 (19.09, 21.58)	37.64 (33.94, 41.35)	0.9940
	002	21.33	49.50	-1.16 (-2.23, -0.08)	-71.57 (-101.53, -41.60)	0.9968	23.44 (22.15, 24.73)	41.04 (37.38, 44.69)	0.9957
	003	22.67	54.75	-1.22 (-2.31, -0.14)	-69.78 (-102.76, -36.79)	0.9964	18.99 (17.7, 20.29)	32.57 (29.34, 35.8)	0.9919
70°	004	20.39	44.25	-1.08 (-2.17, 0.00)	-79.74 (-114.47, -45.00)	0.9939	27.46 (26.09, 28.82)	198.6 (-7890, 8287)	0.9973
	005	17.83	61.00	-1.09 (-2.18, -0.01)	-81.33 (-118.49, -44.18)	0.9956	22.11 (21.23, 22.99)	43.56 (40.41, 46.7)	0.9976
	006	17.67	60.00	-1.07 (-2.16, 0.01)	-78.14 (-111.00, -45.28)	0.9906	28.79 (26.38, 31.2)	90.07 (32.26, 147.9)	0.9924
90°	007	21.28	43.00	-1.08 (-2.03, -0.13)	-76.27 (-111.79, -40.75)	0.9964	18.49 (17.71, 19.28)	36.99 (34.37, 39.61)	0.9969
	008	24.06	63.25	-1.1 (-2.07, -0.12)	-76.42 (-112.74, -40.10)	0.9971	21.85 (19.91, 23.78)	37.64 (32.51, 42.78)	0.9875
	009	24.06	60.25	-1.06 (-1.99, -0.13)	-76.12 (-110.93, -41.30)	0.9951	27.03 (21.94, 32.12)	49.21 (31.78, 66.64)	0.9555

Tabla 4.8: Comparación de los Valores  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha_z$  y  $\beta_z$  para un Área de Succión de Aire del 50 %.

Apertura de Válvula	Experimento	$T_1$ [°C]	$T_{11}$ [°C]	Haro-Zamora et al., 2025			Y. Zhang et al., 2016		
				$\alpha$	$\beta$	$R^2$	$\alpha_z$	$\beta_z$	$R^2$
50°	001	23.83	45.75	-1.11 (-2.34, 0.12)	-77.44 (-107.35, -47.53)	0.9877	28.51 (26.08, 30.94)	185.1 (-6700, 7070)	0.9927
	002	23.44	41.25	-1.12 (-2.37, 0.12)	-73.12 (-98.42, -47.82)	0.9912	29.62 (26.06, 33.18)	178.5 (-6583, 6940)	0.9866
	003	23.33	43.75	-1.15 (-2.40, 0.10)	-71.94 (-98.33, -45.56)	0.9897	28.1 (24.55, 31.66)	183.1 (-9134, 9500)	0.9824
70°	004	16.86	50.25	-0.96 (-1.92, 0.00)	-85.02 (-121.02, -49.03)	0.9941	35.69 (30.03, 41.36)	86.64 (10.03, 163.2)	0.9801
	005	19.78	40.00	-1.12 (-2.41, 0.17)	-75.98 (-103.34, -48.62)	0.9899	28.97 (25.31, 32.62)	184.2 (-9415, 9783)	0.9849
	006	20.78	45.00	-1.11 (-2.29, 0.07)	-76.69 (-107.36, -46.02)	0.9882	30.18 (28.31, 32.05)	174.1 (-2584, 2932)	0.9962
90°	007	21.56	43.00	-1.14 (-2.36, 0.07)	-73.39 (-102.89, -43.90)	0.9879	29.59 (27.05, 32.14)	178.3 (-4628, 4985)	0.9927
	008	24.00	44.00	-1.08 (-2.22, 0.05)	-76.35 (-106.40, -46.29)	0.9898	32.14 (29.95, 34.34)	140.8 (-403.8, 685.4)	0.9958
	009	25.06	49.75	-1.07 (-2.19, 0.04)	-76.02 (-103.79, -48.26)	0.9915	30.69 (28.11, 33.27)	176.2 (-3920, 4272)	0.9933

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) reportado en las Tablas 4.7 y 4.8 se observa gráficamente en la Figura 4.10 para los experimentos con una área de succión del 100 %, y la Figura 4.11 para los experimentos con un área de succión del 50 %.



Figura 4.10: Ajuste Modelo para los Perfiles Térmicos con Área de Succión al 100 %.

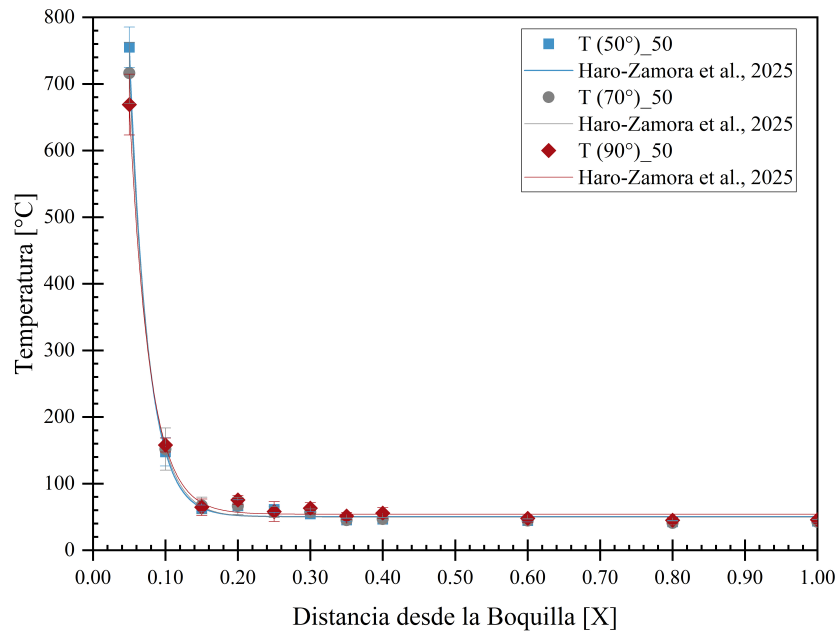


Figura 4.11: Ajuste Modelo para los Perfiles Térmicos con Área de Succión al 50 %.

### 4.3. Sostenimiento del Gradiente Térmico

A continuación se presenta la relación entre las aperturas de válvula y sus áreas de succión de aire con el sostenimiento del gradiente térmico. La Figura 4.12 muestra los valores promedios del gradiente de temperatura con respecto a la posición axial, para las diferentes áreas de succión de aire disponible.

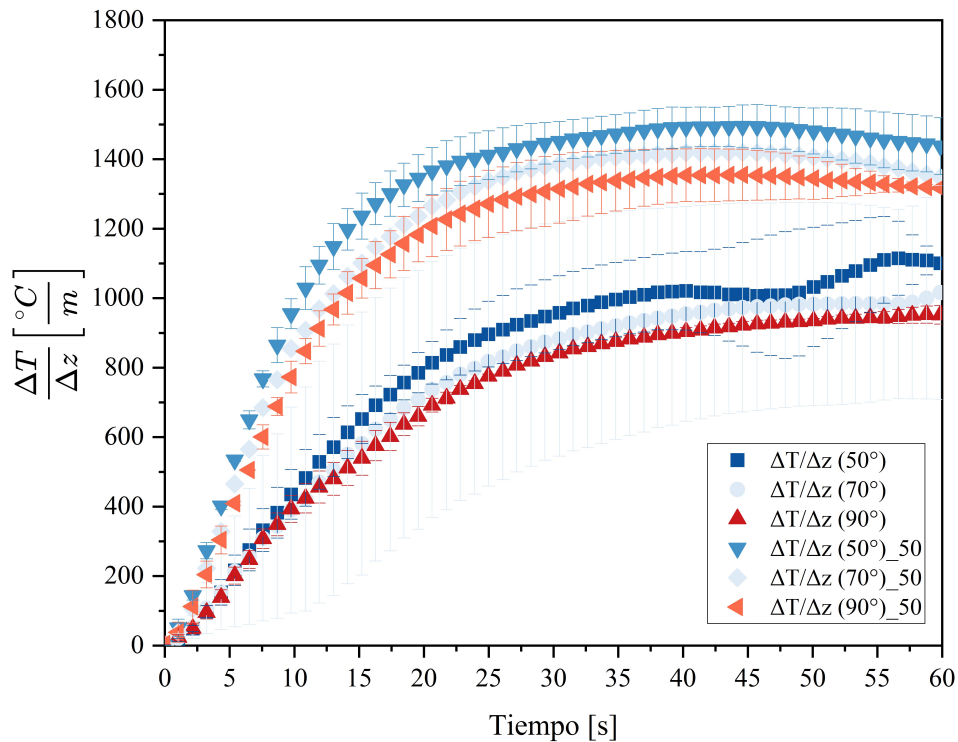


Figura 4.12: Gradiente de Temperatura con Respecto a la Posición.

Este análisis nos permite encontrar la temperatura de trabajo para cada prueba experimental, se observa (Figura 4.12) que los experimentos con una mayor área de succión de aire presentan un menor gradiente de temperatura ( $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ ) en comparación con los experimentos con un área de succión de aire al 50%. La apertura de válvula de 50° presenta los gradientes térmicos de mayor magnitud, con un valor de  $\approx 1029.76 \text{ }^\circ\text{C}$  para los experimentos con un área de succión de aire al 100%, y de  $\approx 1456.35 \text{ }^\circ\text{C}$  para los experimentos con un área de succión de aire al 50%, lo que representa un incremento del 41.4%, mismo comportamiento presentado para el sensor  $T_1$  en las Figuras 4.5 y

4.6. Del mismo modo, para una apertura de válvula de  $70^\circ$ , los gradientes de temperatura muestran el valor un valor medio de  $\approx 992.20^\circ\text{C}$  y  $\approx 1376.84^\circ\text{C}$  para los experimentos realizados con una área de succión de aire al 100 % y 50 %, respectivamente, indicando un incremento del 38.8 % entre ambas áreas de succión de aire. Por su parte, la apertura de válvula de  $90^\circ$  registra los gradientes de temperatura más bajos de los experimentos, para una área de succión de aire del 100 % se obtiene el valor de  $\approx 945.38^\circ\text{C}$ , con un incremento del 40.4 % para un área de succión de aire del 50 % con un valor de  $\approx 1327.39^\circ\text{C}$ .

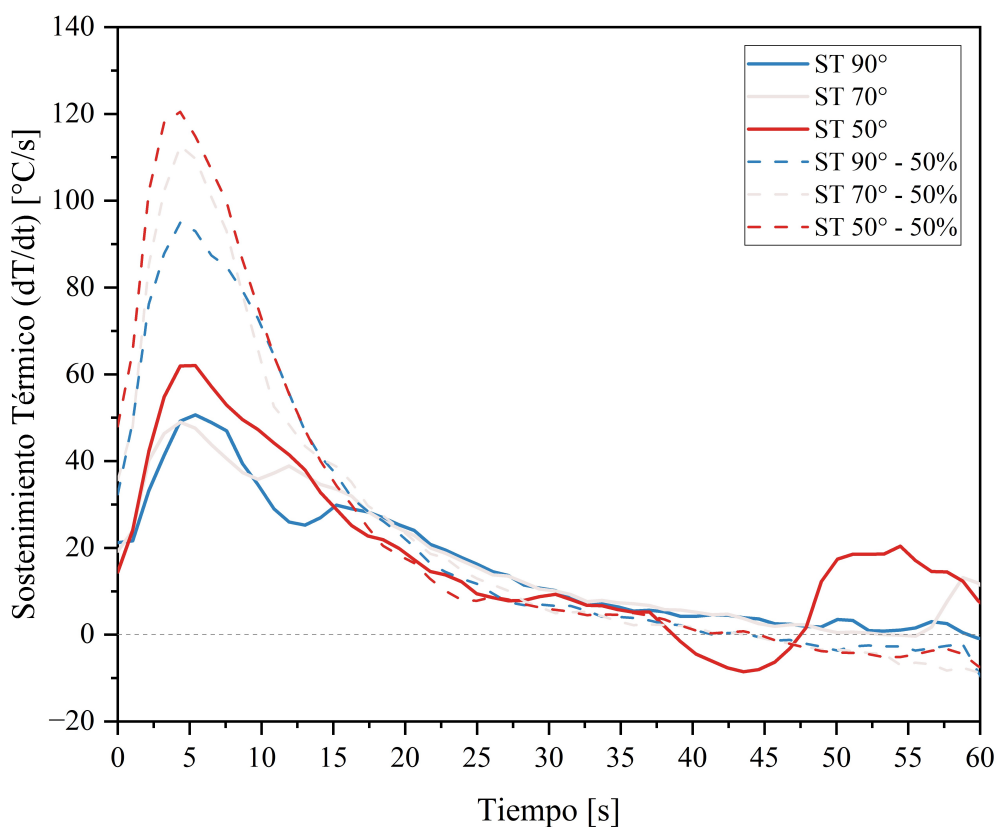


Figura 4.13: Sostenimiento del Gradiente Térmico

La Figura 4.13 muestra el comportamiento del sostenimiento térmico  $\left(\frac{dT}{dt}\right)$  para cada apertura de válvula, observando la tendencia de alcanzar valores  $\leq 0$ . Observamos que los experimentos realizados con un área de succión de aire al 100 % presentan mayor ruido alcanzado el estado estable (tiempo de 50 s) teniendo incrementos y disminuciones de  $\approx 20^\circ\text{C}$  para la apertura de válvula de  $50^\circ$ , de  $\approx 5^\circ\text{C}$  para la apertura de válvula de  $70^\circ$  y de  $\approx 15^\circ\text{C}$  para la apertura de válvula

de 70° esto es debido a la dispersión experimental de estas aperturas y que ya fue mencionado en la Figura 4.5.

Por su parte, los experimentos realizados con un área de succión de aire al 50 % alcanzan el estado estable del sostenimiento térmico en menor tiempo ( $\approx 40 s$ ) y a diferencia de los experimentos con un área de succión de aire al 100 %, estos experimentos no presentan ruido debido a la menor dispersión experimental mostrada en la Figura 4.6.

## 4.4. Eficiencia Térmica

Las curvas de la eficiencia térmica promedio y su dispersión experimental para las diferentes aperturas de válvula y áreas de succión de aire se muestran en la Figura 4.14. Donde se puede observar nuevamente que los experimentos con un área de succión de aire de 50 % presentan una mejor eficiencia térmica, en comparación con los experimentos con un área de succión de aire del 100 %, comportamiento que va en concordancia con las temperaturas mostradas en las Figuras 4.5 y 4.6, al igual que en las Figuras 4.12 y 4.13.

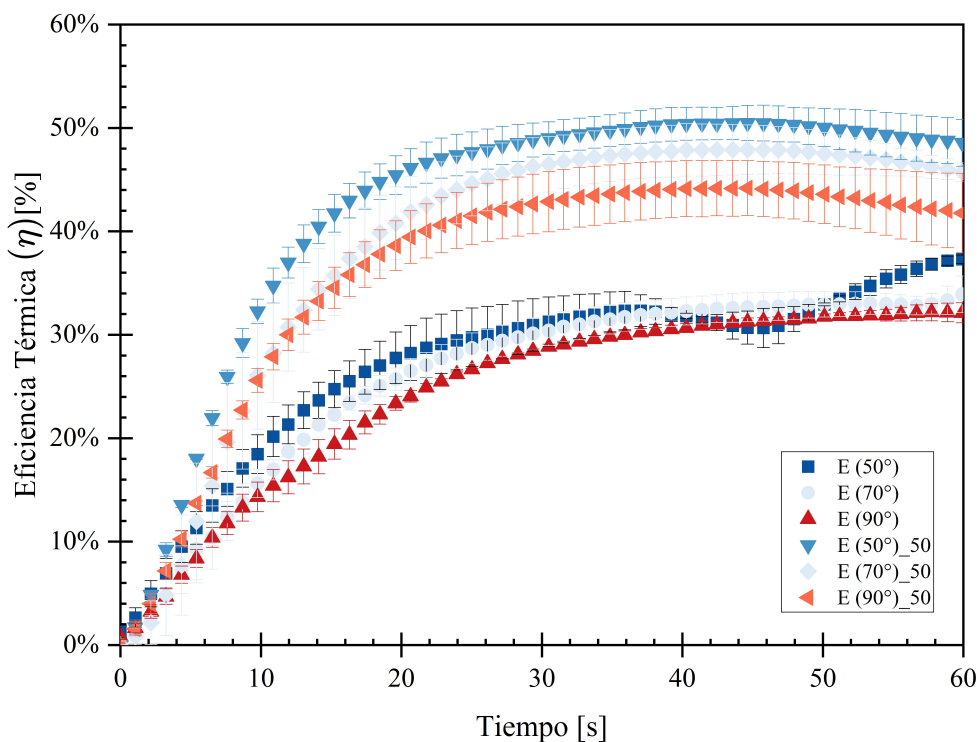


Figura 4.14: Eficiencia Térmica

La apertura de válvula de 50° presenta los valores de mayor eficiencia térmica, siendo de 37.30 % para un área de succión de aire al 100 % y de 50.48 % para el área de succión de aire al 50 % (el valor más alto de eficiencia), lo que indica un incremento del 35.34 %. Para la apertura de válvula de 70° con un área de succión de aire al 100 % se tiene una eficiencia del 36.06 %, teniendo un incremento del 32.96 % al reducir el área de succión de aire al 50 %, logrando una eficiencia

del 47.90 %. Finalmente la apertura de válvula de 90° presenta eficiencias del 32.18 % y 44.18 % para las áreas de succión de aire del 100 % y 50 %, respectivamente, indicando un incremento del 37.29 %.

Por su parte, Jannasch et al., 2006 reportaron eficiencia térmicas en el rango de 45 a 66 % para la combustión de gas natural, evidenciando la ventaja operativa que podría ofrecer el uso de hidrógeno en procesos de combustión. Jonin y Haussener, 2025 obtuvieron una eficiencia térmica del 37 % en un periodo experimental aproximado de 18 minutos, utilizando flujos relativamente bajos de una mezcla *hidrógeno-aire-oxígeno*. De igual manera, Fumey et al., 2016 demostraron que el precalentamiento del aire de combustión permite incrementar la eficiencia térmica de la combustión de hidrógeno hasta alcanzar un 68 %.

En este trabajo de investigación, se obtuvieron eficiencias térmicas en el rango de 32 a 50 %, las cuales se encuentran dentro del intervalo reportado en la literatura para condiciones experimentales comparables, de manera que la integración de este arreglo experimental a los diferentes sectores productivos es factible.

## 4.5. Caracterización Morfológica Ante Oscilaciones de Flujo

Se realiza la caracterización morfológica de la llama en tres ciclos de producción-combustión de la mezcla de gas  $H_2/O_2$ .

El efecto de la presión operativa del reactor de electrólisis al caudal experimental se observa en la Figura 4.15, donde se puede observar como la presión manométrica oscila periódicamente en un rango con un mínimo de 70 *kPa* a un máximo de 130 *kPa*. Cada ciclo tiene un periodo promedio de 94 s, en concordancia con la frecuencia indicada en la Figura 4.15 que es de 0.0106 Hz. De igual manera, el flujo combustible muestra el mismo comportamiento oscilatorio, sin embargo, presenta oscilaciones más suaves que la presión, evidenciando una clara relación entre los ápices de presión y los incrementos de flujo.

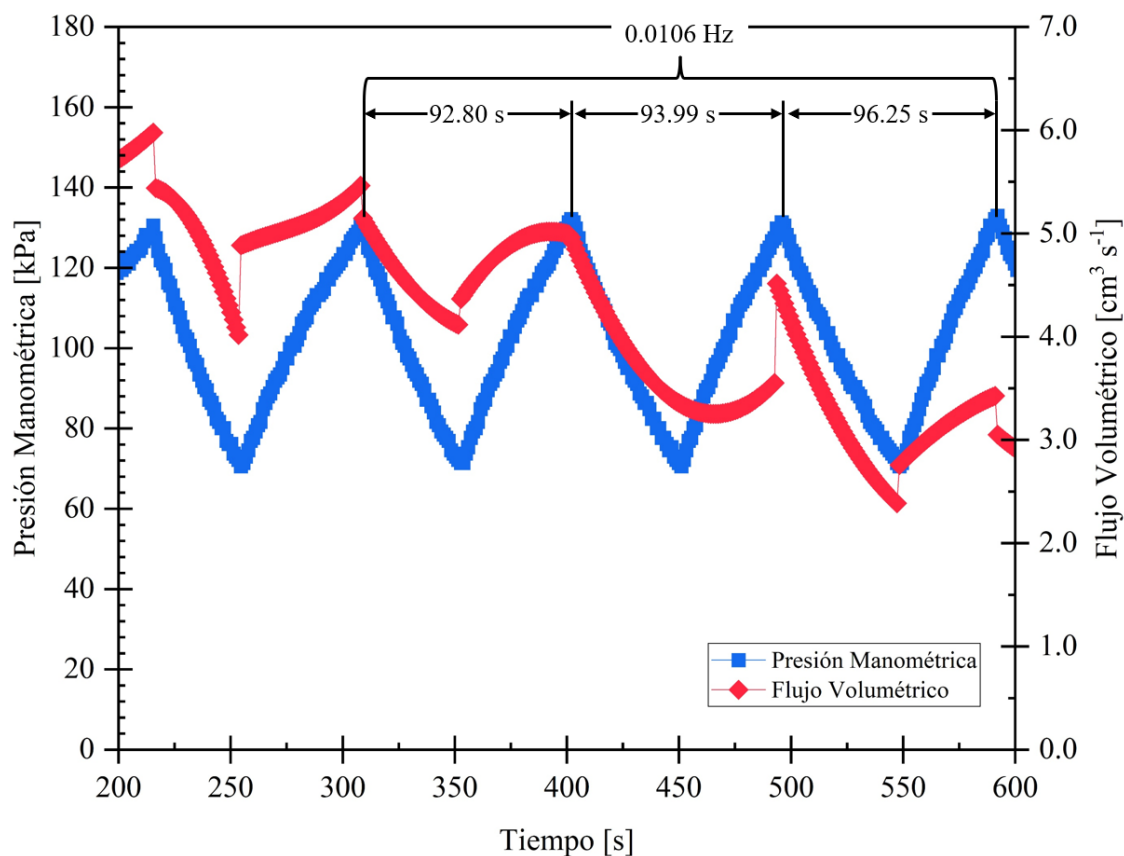
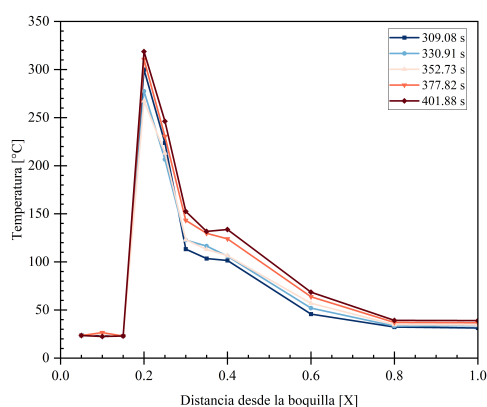
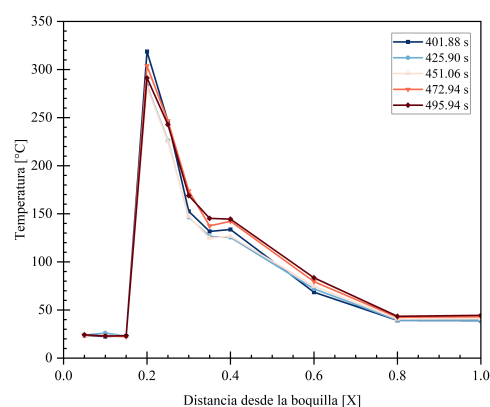


Figura 4.15: Presión Manométrica vs Flujo Volumétrico (Oscilaciones)

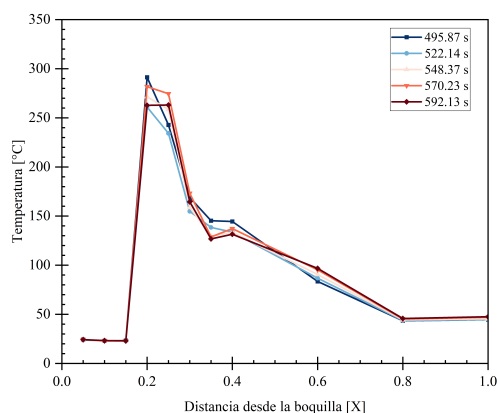
La Figura 4.16 muestra los perfiles térmicos obtenidos para cada ciclo, observándose el mismo comportamiento presentado en el análisis térmico de la llama, con el retiro de los tres sensores más cercanos a la llama, la zona de mayor magnitud térmica se encuentra en el sensor más próximo a la llama, y se muestra el mismo comportamiento del descenso progresivo de temperatura a lo largo de la dirección axial dentro de la cámara de combustión. Visualmente, el primer ciclo (Figura 4.16a) y segundo ciclo (Figura 4.16b) presentan temperaturas similares, para el tercer ciclo (4.16c) la temperatura promedio disminuye  $\approx 20^{\circ}\text{C}$ , que van en concordancia con la reducción de flujo volumétrico y la menor disponibilidad del gas combustible.



(a) Perfil de Temperatura del Primer Ciclo



(b) Perfil de Temperatura del Segundo Ciclo



(c) Perfil de Temperatura del Tercer Ciclo

Figura 4.16: Perfiles de Temperatura en la Cámara de Combustión ante Oscilaciones de Presión.

La Figura 4.17 presenta la comparación de los perfiles de temperatura para cada ciclo de producción-combustión, donde se observan los valores promedios y su desviación experimental junto con el modelo teórico propuesto en este trabajo de investigación. Se puede observar el mismo comportamiento de disipación térmica a lo largo de la dirección axial, mostrado previamente, viendo como la temperatura incrementa conforme el tiempo (con el paso de los ciclos) teniendo una baja dispersión en las posiciones  $X = 0.8$  y  $X = 1.0$  (más lejanas de la boquilla) ( $\sigma^2 = \pm 2.22^\circ C$ ) en comparación con la mayor dispersión en la posición  $X = 0.3$  (las zonas más cercanas a la descarga de la boquilla) con un valor de  $\sigma^2 = \pm 16.70^\circ C$ .

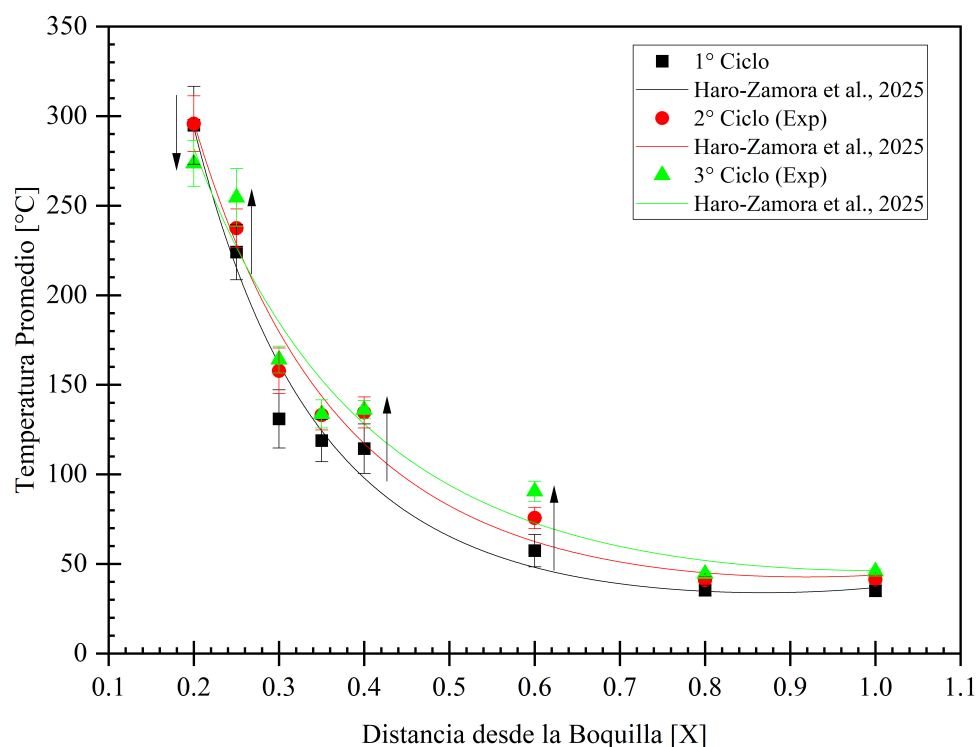


Figura 4.17: Perfil de Temperatura Promedio para Tres Ciclos de Producción-Combustión.

### 4.5.1. Análisis de Imágenes de Llama

El preprocesamiento de imágenes de imágenes para el análisis de imágenes en este trabajo de tesis consta de las siguientes técnicas:

- Recorte (Cropping)
- Binarización
- Segmentación

El recorte permite eliminar partes irrelevantes, permitiendo centrar la zona de llama, la binarización para delimitar la altura y ancho de la llama, finalizando con la segmentación que nos permite una mayor definición por pixel para separar la llama del fondo.

La Figura 4.18 muestra la binarización de la zona de interés (llama) que nos permite observar la zona de interés permitiendo delimitar las dimensiones de la llama como es la altura máxima de la llama ( $H_f$ ), el ancho máximo de llama ( $W_f$ ) y el área de frente de llama ( $A_f$ ).

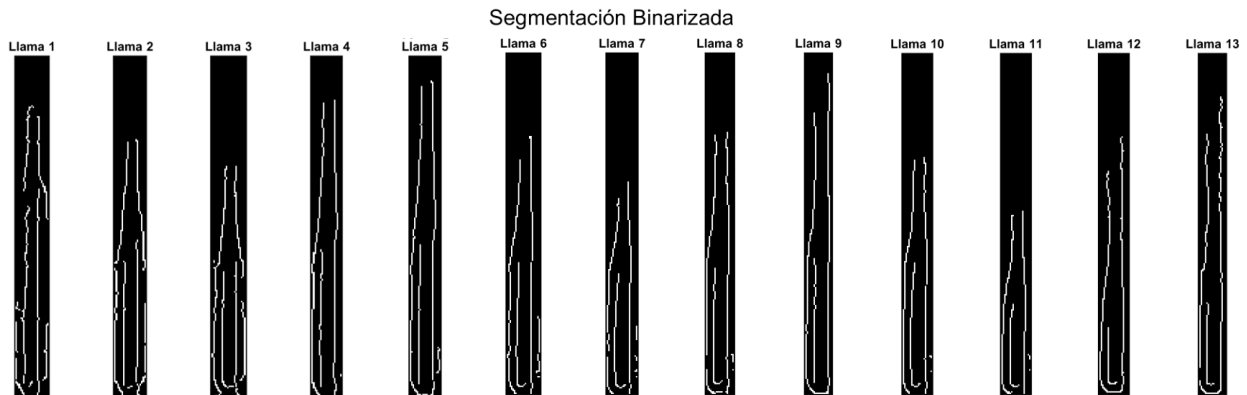


Figura 4.18: Binarización para Tres Ciclos de Producción-Combustión

### 4.5.2. Dimensiones de Llama

Delimitado la región de interés, la segmentación en el espacio HSI permite realizar un análisis de contraste en la región de estudio, correspondiente a la llama, la Figura 4.19 muestra los tres ciclos de producción-combustión de la mezcla  $H_2/O_2$ , donde se observa la representación en el espacio de color  $RGB$ , donde los valores de pixel corresponden a un color puro.

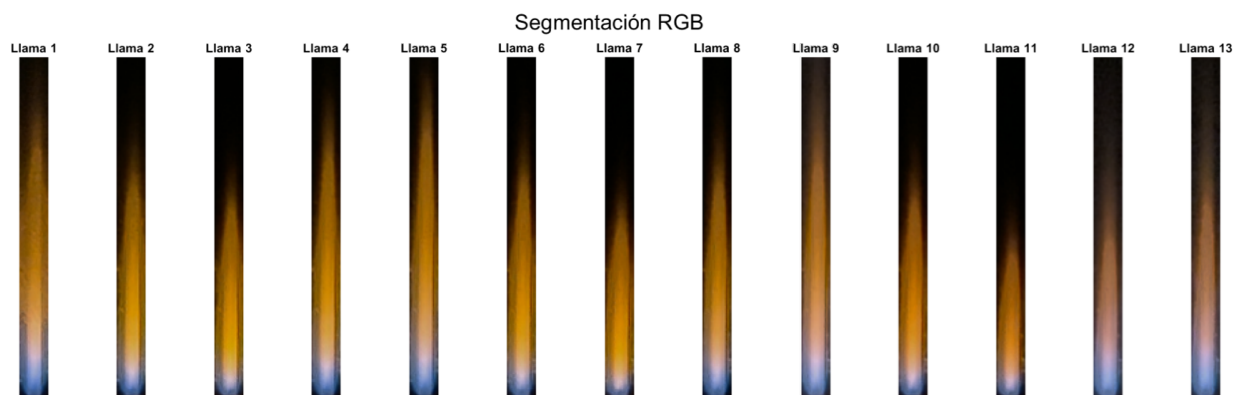


Figura 4.19: Segmentación de RGB para Tres Ciclos de Producción-Combustión.

La segmentación nos permitió obtener las dimensiones de la llama mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 4.9: Dimensiones de Llama para Tres Ciclos de Producción-Combustión.

No. de Llama	Altura ( $H_f$ ) [mm]	Ancho ( $W_f$ ) [mm]	Área ( $A_f$ ) [mm <sup>2</sup> ]
1	33.13	3.27	488.24
2	27.35	3.15	383.22
3	24.93	3.41	358.54
4	30.43	3.07	406.25
5	33.71	3.11	432.44
6	28.25	3.44	385.82
7	22.91	3.17	330.57
8	29.56	2.99	355.38
9	32.92	2.80	332.21
10	26.19	2.99	330.98
11	19.64	2.94	222.25
12	24.24	3.02	236.51
13	29.21	2.73	274.76

Donde se puede observar que la altura mayor es alcanzada por la *Llama 5* con un valor de  $H_f = 33.71\text{mm}$  correspondiente también al valor de temperatura más alto registrado en los tres ciclos ( $318.75^\circ\text{C}$ ), por otro lado, la altura de menor dimensión es registrada por la *Llama 11* con una altura de  $H_f = 19.64\text{mm}$  con el menor valor de flujo volumétrico de los tres ciclos ( $2.75\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ ). De acuerdo con la Figura 4.19 y la Tabla 4.9, el ancho más amplio corresponde a la *Llama 6* con un valor de  $W_f = 3.44\text{ mm}$ , del mismo modo, el ancho de llama más estrecho corresponde a la *Llama 13*, con un valor de  $W_f = 2.73\text{ mm}$ . El área de frente de llama de mayor magnitud es alcanzado por la *Llama 1* con un valor de  $A_f = 488.24\text{ mm}^2$ , la llama con menor área pertenece a la *Llama 11*, con un valor de  $A_f = 222.25\text{ mm}^2$ .

De las componentes que integran a la morfología de la llama, el ancho máximo de llama presenta menor dispersión ( $W_f = 3.08 \pm 0.35\text{mm}$ ) en comparación con el resto de componentes como es el área del frente de llama y la altura de llama.

### 4.5.3. Cuantificación de Color

La reducción de colores debido a la cuantificación se muestra en la Tabla 4.10, reduciendo la cantidad de colores verdaderos de un máximo de 4924 colores hasta un mínimo de 26 colores cuantificados.

Tabla 4.10: Cuantificación de Color para Tres Ciclos de Producción-Combustión

No. de Llama	No. de Colores Verdaderos	No. de Colores Cuantificados
1	4924	36
2	3305	38
3	2933	30
4	3572	35
5	4330	37
6	3427	34
7	2646	30
8	3320	36
9	4282	34
10	3150	32
11	2518	29
12	3694	26
13	3983	28

La Figura 4.20 muestra en el espacio RGB la representación de los colores cuantificados, y en comparación con la Figura 4.19 se puede concluir visualmente que no existe variación significativa.

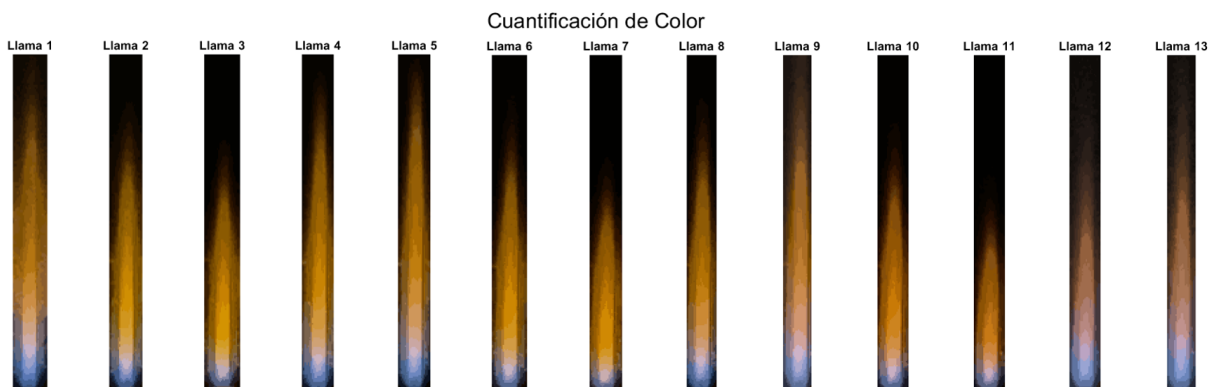


Figura 4.20: Segmentación RGB de la Cuantificación de Colores para Tres Ciclos de Producción-Combustión.

En la tabla 4.11 se muestran las métricas de calidad de imagen de referencia completa y reducida, donde se puede observar que para el *Error Cuadrático Medio* (*MSE*) encontramos valores que van en un rango de  $2.97 \times 10^{-4}$  a  $5.81 \times 10^{-4}$ . De acuerdo con Y. Wang et al., 2018, en una buena cuantificación de color, se espera que  $MSE < 1$ , de manera que se cumpla  $RMSE > MSE$ . La *Raíz del Error Cuadrático Medio* (*RMSE*) presenta valores en un rango de  $1.72 \times 10^{-2}$  a  $2.41 \times 10^{-2}$ , permitiendo comprobar que bajo métricas de calidad de imagen de referencia completa, el proceso de cuantificación de color es apropiado para nuestro análisis de imágenes, permitiendo recopilar valores estadísticos de color para un número reducido de colores.

Tabla 4.11: Métricas de Evaluación de Calidad de Imágenes con Referencia.

No. de Llama	MSE $\times 10^4$	RMSE $\times 10^2$	PSNR	SSIM
1	5.20	2.28	32.84	0.9737
2	3.79	1.95	34.21	0.9673
3	3.46	1.86	34.61	0.9654
4	4.62	2.15	33.35	0.9742
5	5.32	2.31	32.74	0.9676
6	3.75	1.94	34.26	0.9677
7	2.97	1.72	35.28	0.9688
8	4.43	2.10	33.54	0.9622
9	5.81	2.41	32.36	0.9692
10	4.04	2.01	33.94	0.9646
11	3.30	1.82	34.82	0.9755
12	4.06	2.01	33.92	0.9559
13	4.81	2.19	33.18	0.9578

La métrica de *Relación Señal-Ruido Máxima* (*PSNR*), de acuerdo con Simoes y de Sá, 2024, nos indica el grado de desviación de la imagen cuantificada en comparación con la original, a diferencia del *MSE* y *RMSE*, el *PSNR* entre más alto el valor de *dB* se obtenga, mejor calidad de procesamiento, Simoes y de Sá, 2024 demostraron que una imagen mayor a 30 *dB* se considera aceptable, por lo tanto, se puede concluir que las imágenes cuantificadas en este trabajo de investigación son aceptables en términos de calidad. Así mismo, el *índice de Similitud Estructural* (*SSIM*) nos indica que valores cercanos a 1, indican similitud perfecta, por lo tanto esta métrica avala una buena calidad de las imágenes cuantificadas.

La Tabla 4.12 muestra el uso métricas sin referencias, permitiendo comprobar nuevamente la calidad para parámetros como la intensidad (Componente principal del espacio de color HSI), permitiéndonos definir que los colores obtenidos de la cuantificación de color, representan con precisión la magnitud de la captura de imágenes originales, para estimar el índice de estabilidad con mejor precisión. La *Evaluación de la Calidad de Imagen Basado en la Percepción (PIQE)*, presenta valores en un rango desde 14.15 hasta un 28.03, indicando que entre menor valor mayor porcentaje de calidad de la imagen, de manera que podemos inferir que tenemos imágenes con calidad de hasta  $\approx 85\%$ . La *Evaluación de Calidad de Imagen Natural (NIQE)* presenta valores en un rango de 11.00 hasta 23.90, si se alcanza un menor valor, mejor calidad perceptual de la imagen. Sin embargo, la *Evaluación de Calidad Espacial de Imágenes sin Referencia* presenta los valores más desfavorables, idealmente menores valores indican una mejor calidad de la imagen, valores superiores a 14.17 representa más degradación, de manera que en esta métrica no se logra reproducir con fiel calidad las imágenes cuantificadas (43.46 – 48.25).

Tabla 4.12: Métricas de Evaluación de Calidad de Imágenes sin Referencia.

No. de Llama	PIQE	BRISQUE	NIQE
1	28.03	43.46	17.22
2	18.01	45.68	12.33
3	23.09	44.97	11.00
4	17.09	43.46	23.90
5	17.94	43.46	22.95
6	14.72	44.46	15.08
7	19.09	48.25	13.48
8	19.30	45.14	14.26
9	14.15	43.46	18.71
10	17.53	45.92	14.48
11	15.46	44.73	13.49
12	20.61	43.49	16.28
13	17.49	43.46	14.54

#### 4.5.4. Espacio de Color HSI

Además de permitir la obtención precisas de las dimensiones geométricas de la llama, la transformación del espacio de color mediante técnicas de procesamiento de imágenes proporciona una herramienta robusta para la extracción de información cuantitativa relevante. En particular, las características cromáticas de la llama, separando los componentes. A partir de esta representación, se pueden calcular diversos parámetros estadísticos en la región de estudio, siendo los más representativos el valor promedio y la desviación estándar de cada uno de los componentes del espacio HSI. Estos parámetros (Apéndice A) ofrecen una medida cuantitativa del comportamiento global y de la variabilidad local del color dentro de la llama, lo cual es de gran utilidad para correlacionar propiedades ópticas con fenómenos físicos como la temperatura, la estabilidad y la eficiencia de la combustión. La Figura 4.21 muestra los ciclos de producción-combustión en el espacio de color HSI, observando las con mejor claridad las zonas de la llama, al igual de las zonas más calientes.

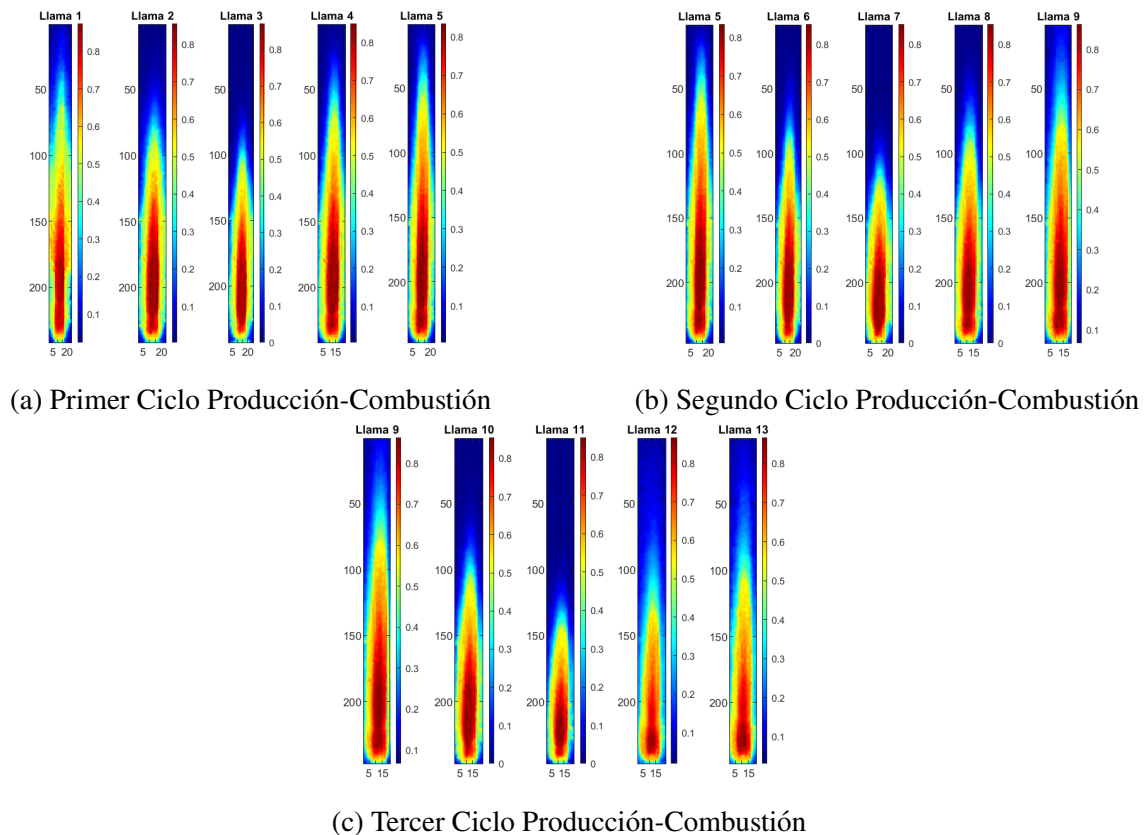


Figura 4.21: Segmentación HSI para Tres Ciclos de Producción-Combustión.

## 4.6. Índice de Estabilidad de Combustión

La variación de flujo, al igual que la presión de producción de la mezcla combustible afecta directamente la morfología de la llama y su distribución de temperaturas a lo largo de la cámara de combustión. El uso del índice de estabilidad nos permite observar de manera cuantitativa la inestabilidad relativa en el proceso de combustión.

La Figura 4.22 muestra el índice de estabilidad como función de la altura de llama ( $H_f$ ) y su correlación con el flujo volumétrico, observándose que conforme incrementa la altura de llama, se mejora el índice de estabilidad de combustión, indicando que llamas más altas podrían mejorar las condiciones dentro de la cámara de combustión, sin embargo, arriba de 60% la dispersión es mayor (> 10%).

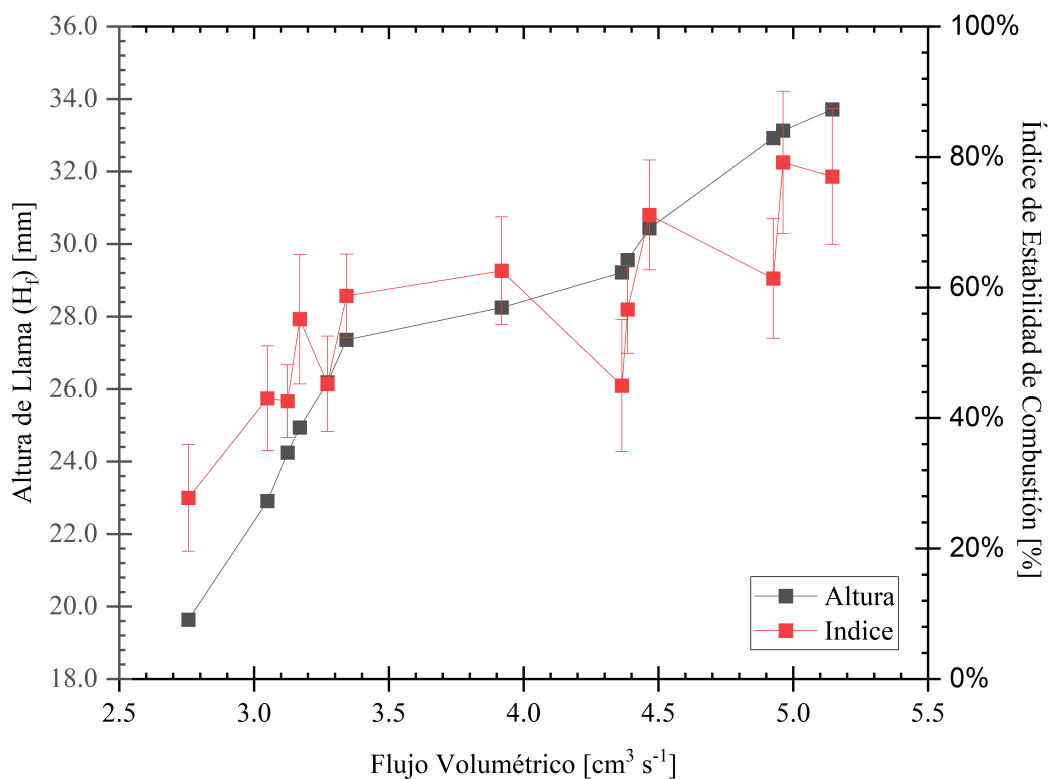


Figura 4.22: Índice de Estabilidad de Combustión vs Altura de Llama ( $H_f$ )

Igualmente se puede observar que, mayores flujos volumétricos desarrollan alturas más altas, a diferencia del análisis térmico previo, donde los valores de flujo volumétrico son inversos a los valores de presión, en el análisis de ciclos, los valores de mayor flujo volumétrico registran los mayores valores de presión, y con menor variación de presión, se desarrolla una mejor estabilidad del proceso de combustión.

La Figura 4.23 representa la relación entre el índice de estabilidad de combustión con el ancho de llama ( $W_f$ ), mostrando un comportamiento similar a las oscilaciones de presión mostradas en la Figura (4.15), de la cual podemos establecer que el ancho de llama óptimo de operación debe estar en un rango entre 3.0 mm y 3.2 mm, para que favorezca escenarios de estabilidad de combustión más constante.

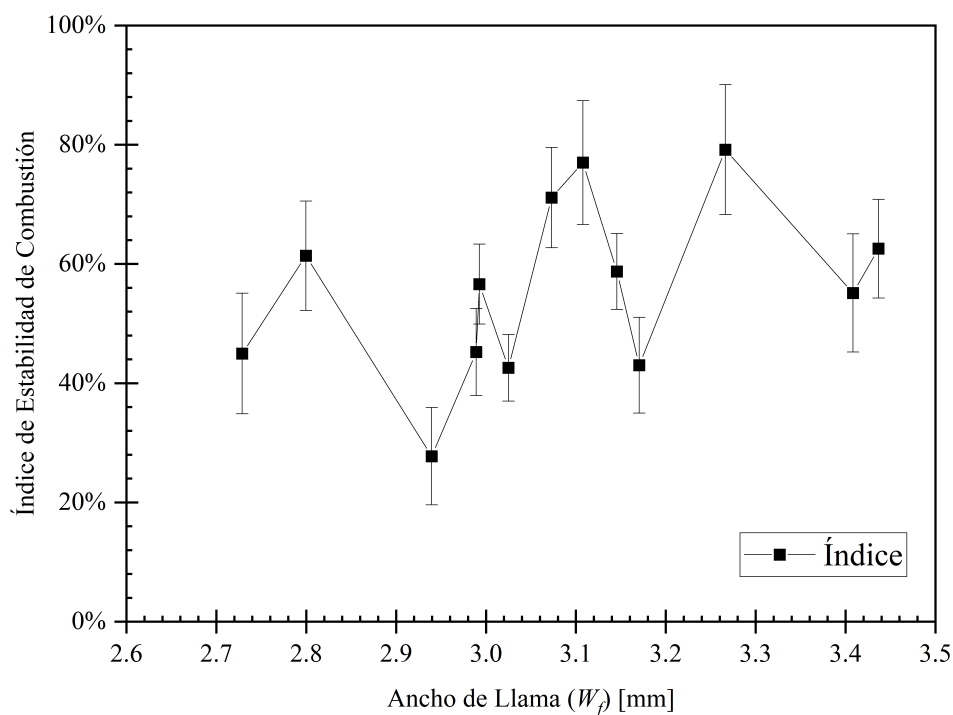


Figura 4.23: Índice de Estabilidad de Combustión vs Ancho de Llama ( $W_f$ )

La Figura 4.24 muestra la influencia del área de frente de llama ( $A_f$ ) al índice de estabilidad de combustión, mostrando una relación similar con la altura de llama (Figura 4.22), donde mayores valores de área dan mejor estabilidad del proceso de combustión, sin embargo, la aglomeración en la parte central de la gráfica nos indica que con áreas de frente de llama en un rango desde 325 mm<sup>2</sup> hasta 400 mm<sup>2</sup> mantendría una estabilidad constante a lo largo de la cámara de combustión.

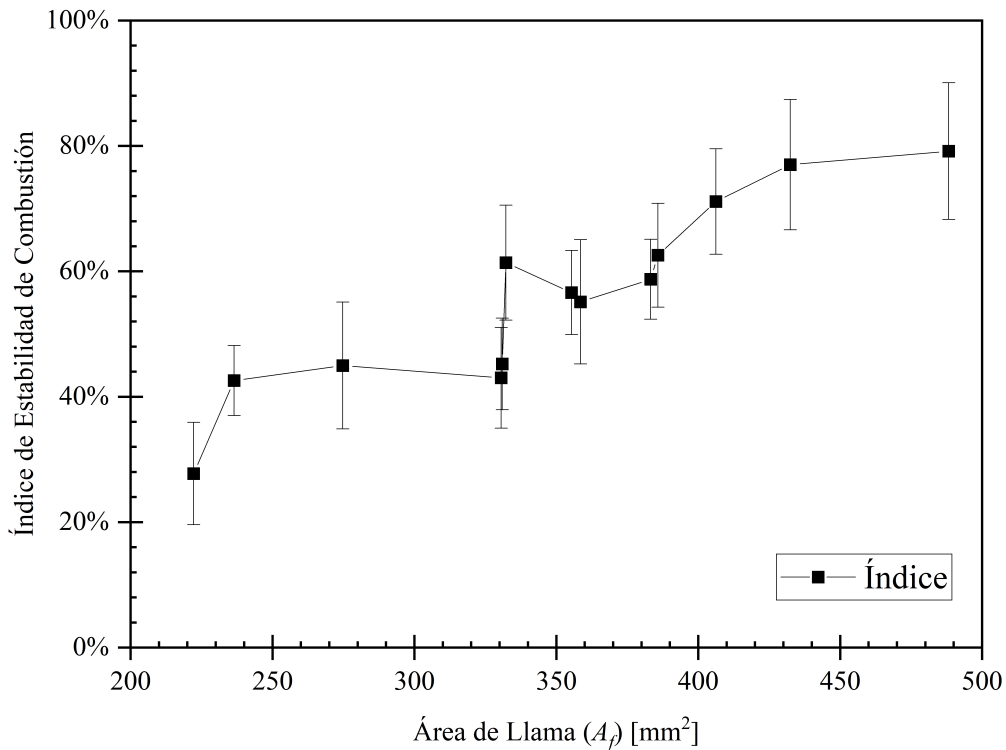


Figura 4.24: índice de Estabilidad de Combustión vs Área de Frente de Llama ( $A_f$ )

La Figura 4.25 representa el efecto de la presión operativa del reactor al índice de estabilidad de combustión, donde los valores máximos y mínimos de presión presentan una gran diferencia en términos de estabilidad, para los mínimos se tiene un decaimiento del  $\approx 50.0\%$ , por su parte, los máximos de presión disminuyen hasta en un  $\approx 43.19\%$  lo que indica inestabilidad en las crestas y valles de la presión oscilatoria, sin embargo, durante las fases de consumo y producción, la estabilidad tiene una dispersión máxima de  $\approx 8.41\%$  indicando un rango operativo óptimo de 90 kPa – 110 kPa.

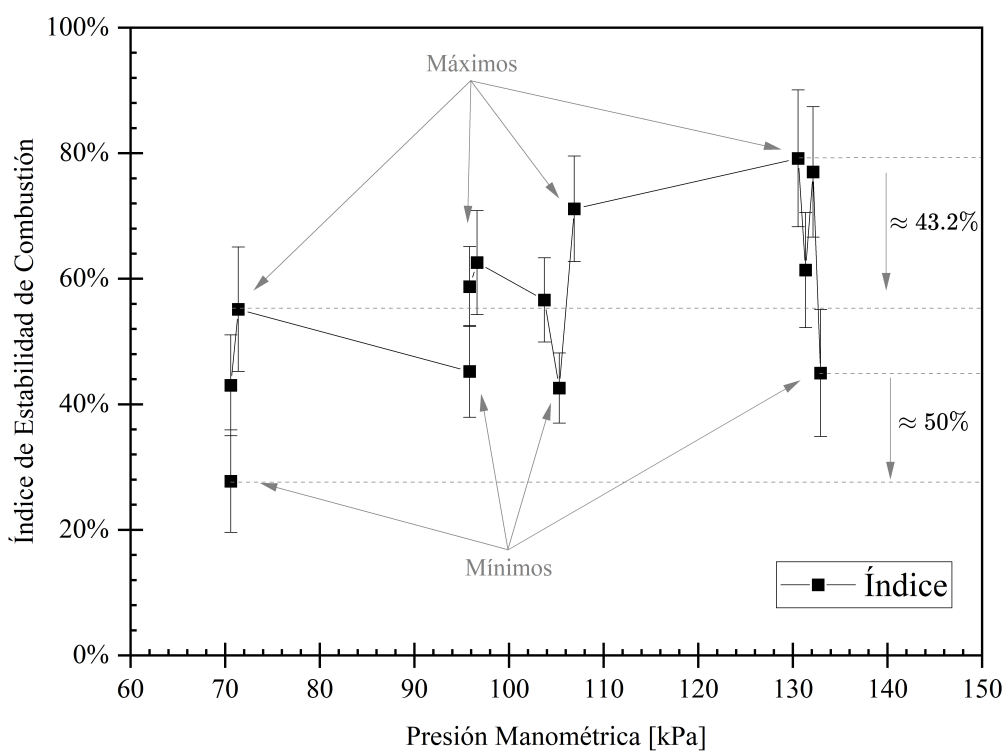


Figura 4.25: Índice de Estabilidad de Combustión vs Presión Manométrica

Finalmente la Figura 4.26 muestra la relación entre el sostenimiento del gradiente térmico con el índice de estabilidad, donde se puede observar que un mayor índice de estabilidad de combustión afecta al rendimiento de la cámara de combustión, esto puede indicar que, si se favoreciera las condiciones para un funcionamiento óptimo de la llama en la región de combustión, se tardaría más tiempo en alcanzar el estado estacionario a lo largo de la cámara de combustión. En cambio, si se busca mantener un sostenimiento del gradiente térmico bajo, se corre el riesgo de favorecer las condiciones de inestabilidad, provocando situaciones de riesgo, e incluso el apagado de la llama.

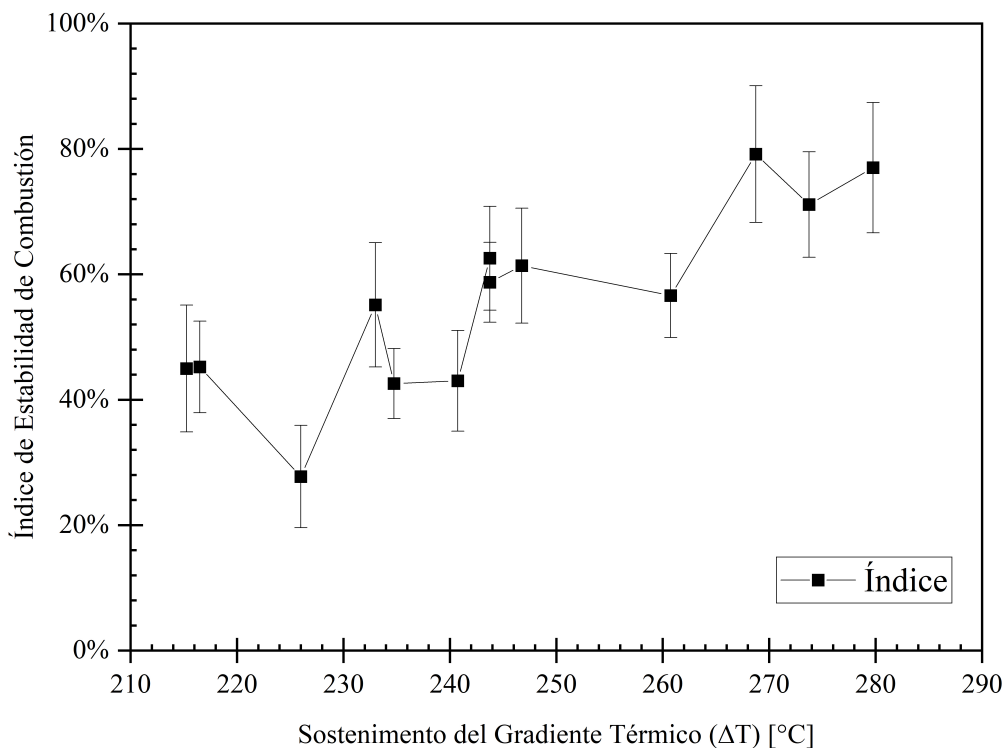


Figura 4.26: Índice de Estabilidad de Combustión vs Sostenimiento Térmico

# Capítulo 5

---

## Conclusiones

---

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se desarrolló la selección, programación e integración de los elementos de medición, microprocesadores, captura y procesamiento de imágenes en un sistema de monitoreo. Este sistema de monitoreo permite identificar parámetros térmicos y operativos, facilitando el seguimiento durante la operación, estableciendo escenarios óptimos y de riesgo considerando su posible aplicación. Debido al fácil acceso a los elementos de medición, el sistema permite trabajar en regiones térmicas elevadas sin tener que realizar mayores modificaciones para su implementación.
2. Se realizó el análisis térmico de la llama mediante la distribución de temperaturas en el espacio de trabajo del quemador, considerando tres aperturas de válvula y dos áreas de succión de aire, encontrando que las temperaturas máximas más elevadas ocurren con aperturas de válvula menores, sin embargo esto genera una mayor oscilación en la producción de gas  $H_2/O_2$ . Por otro lado, una mayor área de succión de aire contribuye a amortiguar los gradientes térmicos, reduciendo las rampas de calentamiento hasta en un 47 %.
3. Se determinó la eficiencia térmica en la cámara de combustión para las configuraciones previamente mencionadas, obteniendo rangos comparables con los reportados en la literatura para combustibles convencionales y emergentes. Esto confirma la viabilidad de integrar el sistema de producción-combustión en diversos sectores productivos. Asimismo, se evaluó el sostenimiento del gradiente térmico, demostrando que una menor área de succión de aire incrementa la intensidad y estabilidad térmica en la etapa inicial del proceso, independientemente del ángulo de apertura de válvula. Sin embargo, esta ventaja desaparece cuando todas las configuraciones convergen hacia gradientes moderados característicos del régimen estacionario.
4. Se caracterizó la morfología de la llama ante oscilaciones en el flujo del gas  $H_2/O_2$  durante tres ciclos de producción-combustión, evidenciándose que dichas oscilaciones no modifican de

manera significativa la propagación térmica. El índice de estabilidad permitió correlacionar las condiciones operativas con las características morfológicas de la llama, demostrando que mayores alturas de llama favorecen la estabilidad del proceso. Finalmente, la presión de producción se identificó como el parámetro dominante en el comportamiento estable del proceso de combustión, delimitando un intervalo óptimo de 90-110 kPa, dentro del cual se alcanzó el mayor rendimiento energético del quemador prototipo.

---

# Bibliografía

---

- Abdelhafez, A. (2024). Stability and Emission Characteristics of a Stratified Hydrogen-Enriched Oxy-Methane Flame on a Multihole Burner: An Experimental Study. *ACS Omega*, 9(17), 18882-18892. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08737>
- Ahmadi, A. A., Rahbari, A., & Mohamadi, M. (2022). Energy efficiency improvement and emission reduction potential of domestic gas burners through re-orientating the angle and position of burner holes: Experimental and numerical study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32, 101232. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2022.101232>
- Ajanovic, A., Sayer, M., & Haas, R. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 24136-24154. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.02.094>
- Ali, A., Houda, M., Waqar, A., Khan, M. B., Deifalla, A., & Benjeddou, O. (2024). A review on application of hydrogen in gas turbines with intercooler adjustments. *Results in Engineering*, 22, 101979. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101979>
- Alinejad, Z., Parham, N., Tawalbeh, M., Al-Othman, A., & Almomani, F. (2024). Progress in green hydrogen production and innovative materials for fuel cells: A pathway towards sustainable energy solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.09.153>
- Alonso, M. (2009). *Espacios de color RGB, HSI y sus generalizaciones a  $\eta$ -dimensiones* [Tesis doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica].

- Amin, M. A., Hu, Y., Guan, Y., & Amin, M. Z. (2024). Exploring varying color spaces through representative forgery learning to improve deepfake detection. *Digital Signal Processing*, *147*, 104426. <https://doi.org/10.1016/J.DSP.2024.104426>
- Ashari, P. A., Oh, H., & Koch, C. (2024). Pathways to the hydrogen economy: A multidimensional analysis of the technological innovation systems of Germany and South Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, *49*, 405-421. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.286>
- Ayub, H. M. U., Alnouri, S. Y., Stijepovic, M., Stijepovic, V., & Hussein, I. A. (2024). A cost comparison study for hydrogen production between conventional and renewable methods. *Process Safety and Environmental Protection*, *186*, 921-932. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.04.080>
- Badgett, A., Ruth, M., & Pivovar, B. (2022). Economic considerations for hydrogen production with a focus on polymer electrolyte membrane electrolysis. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications Hydrogen Production by Water Electrolysis*, 327-364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00005-7>
- Bai, X., Fei, L., Liu, W., Wu, H., Yan, Y., & Xu, W. (2025). Self-supervised combustion state diagnosis using a noise-augmented generative adversarial network and flame image sequences. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *149*, 110574. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2025.110574>
- Ballossier, Y., Boivin, P., & Almarcha, C. (2024). Three dimensional shapes of hydrogen-air flames within millimetric Hele Shaw cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *60*, 333-341. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.02.209>
- Bayramoğlu, K., Bahlekeh, A., & Masera, K. (2023). Numerical investigation of the hydrogen, ammonia and methane fuel blends on the combustion emissions and performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*, 39586-39598. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.06.079>

- 
- Bong, C., Ali, M. H., Im, S. k., Do, H., & Bak, M. S. (2024). Machine learning-based prediction of swirl combustor operation from flame imaging. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *138*, 109374. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAL.2024.109374>
- Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X., & Palacios, A. (2016). Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates. *Combustion and Flame*, *164*, 400-409. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.09.009>
- Brun, L., & Trémeau, A. (2002). Digital Color Imaging Handbook, ser. Electrical and Applied Signal Processing.
- Busin, L., Vandenbroucke, N., & Macaire, L. (2009). Color Spaces and Image Segmentation. [https://doi.org/10.1016/S1076-5670\(07\)00402-8](https://doi.org/10.1016/S1076-5670(07)00402-8)
- Cai, S., Yang, W., & Wan, J. (2024). Combustion and thermal performances of methane-air premixed flame in a novel preheated micro combustor with a flame holder. *International Journal of Thermal Sciences*, *197*, 108813. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHEMALSCI.2023.108813>
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*, 4901-4934. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.151>
- Celebi, M. E. (2011). Improving the performance of k-means for color quantization. *Image and Vision Computing*, *29*(4), 260-271. <https://doi.org/10.1016/J.IMAVIS.2010.10.002>
- Celebi, M. E., Wen, Q., & Hwang, S. (2015). An effective real-time color quantization method based on divisive hierarchical clustering. *Journal of Real-Time Image Processing*, *10*(2), 329-344. <https://doi.org/10.1007/s11554-012-0291-4>
- Chakraborty, N., & Cant, R. S. (2013). Turbulent Reynolds number dependence of flame surface density transport in the context of Reynolds averaged Navier-Stokes simulations. *Proceedings of the Combustion Institute*, *34*, 1347-1356. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.071>
- Chen, Y., Niu, J., Liu, W., Long, L., Huang, T., Sun, Y., Wan, Z., & Yu, B. (2024). Experimental analysis and modeling on the blending limit of domestic burner with porous media for
-

- 
- hydrogen enriched natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 88, 1321-1331. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.09.263>
- Cheng, H. D., Jiang, X. H., Sun, Y., & Wang, J. (2001). Color image segmentation: advances and prospects. *Pattern Recognition*, 34(12), 2259-2281. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(00\)00149-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00149-7)
- Compais, P., Arroyo, J., Castán-Lascorz, M. Á., Barrio, J., & Gil, A. (2023). Detection of slight variations in combustion conditions with machine learning and computer vision. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106772. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAL.2023.106772>
- Dahbi, S., Aziz, A., Yahyaoui, S., Blaacha, J., & Saldine, K. (2024). The effect of the electrodes shape in water electrolysis on the production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 84, 909-914. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.08.244>
- Daurer, G., Schwarz, S., Demuth, M., Gaber, C., & Hochenauer, C. (2024). Evaluation of numerical modeling and combustion characteristics of hydrogen oxy-fuel combustion in a semi-industrial furnace. *Fuel*, 369, 131690. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.131690>
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.12.059>
- De Giorgi, M. G., Sciolti, A., Campilongo, S., & Ficarella, A. (2016). Image processing for the characterization of flame stability in a non-premixed liquid fuel burner near lean blowout. *Aerospace Science and Technology*, 49, 41-51. <https://doi.org/10.1016/J.AST.2015.11.030>
- Deng, Y., & Manjunath, B. S. (2001). Unsupervised segmentation of color-texture regions in images and video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(8), 800-810. <https://doi.org/10.1109/34.946985>
- Deng, Y., Manjunath, B. S., Kenney, C., Moore, M. S., & Shin, H. (2001). An efficient color representation for image retrieval. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(1), 140-147. <https://doi.org/10.1109/83.892450>
-

- dos Santos, K. G., Eckert, C. T., De Rossi, E., Bariccatti, R. A., Frigo, E. P., Lindino, C. A., & Alves, H. J. (2017). Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 563-571. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.128>
- Du, W., Zhou, S., Qiu, H., Zhao, J., & Fan, Y. (2022). Experiment and numerical study of the combustion behavior of hydrogen-blended natural gas in swirl burners. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102468. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2022.102468>
- El-Mahallawy, F., & Habik, S. E.-D. (2002). Laminar Premixed Flames. *Fundamentals and Technology of Combustion*, 77-257. <https://doi.org/10.1016/B978-008044106-1/50004-8>
- El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. *Results in Engineering*, 20, 101426. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101426>
- Emam, A. S., Hamdan, M. O., Abu-Nabah, B. A., & Elnajjar, E. (2024). A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 599-625. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.03.238>
- Fahr, S., Engel, F. K., Rehfeldt, S., Peschel, A., & Klein, H. (2024). Overview and evaluation of crossover phenomena and mitigation measures in proton exchange membrane (PEM) electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 705-721. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.04.248>
- Fumey, B., Stoller, S., Fricker, R., Weber, R., Dorer, V., & Vogt, U. F. (2016). Development of a novel cooking stove based on catalytic hydrogen combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(18), 7494-7499. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.134>
- Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. (2015). Flame phenomena in premixed combustible gases. *Combustion*, 147-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407913-7.00004-9>
- Golgiyaz, S., Celtek, M. S., Daskin, M., Talu, M. F., & Onat, C. (2023). Flame stability measurement through image moments and texture analysis. *Measurement Science and Technology*, 34(4), 045404. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acb001>
- Gong, L., Mo, T., Han, Y., Zheng, X., Yang, S., Yao, Y., & Zhang, Y. (2024). Experimental investigation on the behaviors and temperature distribution of cryogenic hydrogen jet flames.

- 
- International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 1062-1074. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.09.031>
- Habib, M. A., Abdulrahman, G. A., Alqaity, A. B., & Qasem, N. A. (2024). Hydrogen combustion, production, and applications: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 100, 182-207. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2024.05.030>
- Hage, R., Anouti, Y., Elborai, S., & Kombargi, R. (2020). *The dawn of green hydrogen: Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world* (inf. téc.). Strategy&: PwC. <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen.html>
- Hamedani, E. A., Alenabi, S. A., & Talebi, S. (2024). Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles. *Energy Reports*, 12, 3778-3794. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2024.09.030>
- Han, Z., Li, J., Zhang, B., Hossain, M. M., & Xu, C. (2021). Prediction of combustion state through a semi-supervised learning model and flame imaging. *Fuel*, 289, 119745. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119745>
- Han, Z., Tang, X., Hossain, M. M., & Xu, C. (2023). Assessment of flame stability through a convolutional denoising autoencoder and statistical analysis. *Combustion and Flame*, 258, 113069. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2023.113069>
- Handique, A. J., Peer, R., Haas, J., Osorio-Aravena, J. C., & Reyes-Chamorro, L. (2024). Distributed hydrogen systems: A literature review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 85, 427-439. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.08.206>
- Haro-Zamora, I. (2023). *Efecto de la mezcla CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> en la temperatura adiabática de reacción en una turbina de gas* [Tesis doctoral, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/19158>
- Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Al-Musawi, T. J., Al-Jiboory, A. K., Salman, H. M., Ali, B. M., & Jaszczur, M. (2024). A comprehensive review of international renewable energy growth. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2023.12.002>
-

- 
- Hawthorne, W. R., Weddell, D. S., & Hottel, H. C. (1948). Mixing and combustion in turbulent gas jets. *Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena*, 3, 266-288. [https://doi.org/10.1016/S1062-2896\(49\)80035-3](https://doi.org/10.1016/S1062-2896(49)80035-3)
- Hemauer, J., Rehfeldt, S., Klein, H., & Peschel, A. (2023). Performance and cost modelling taking into account the uncertainties and sensitivities of current and next-generation PEM water electrolysis technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 25619-25634. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.050>
- Hou, S. S., & Chou, C. H. (2013). Parametric study of high-efficiency and low-emission gas burners. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/154957>
- Hu, L. H., Wang, Q., Tang, F., Delichatsios, M., & Zhang, X. C. (2013). Axial temperature profile in vertical buoyant turbulent jet fire in a reduced pressure atmosphere. *Fuel*, 106, 779-786. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.10.051>
- Huang, S. C. (2021). An efficient palette generation method for color image quantization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/app11031043>
- Huang, Y., Yan, Y., Lu, G., & Reed, A. (1999). On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis. *Measurement Science and Technology*, 10(8), 726-733. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/8/307>
- IEA. (2023a). *Global Hydrogen Review 2023* (inf. téc.). IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IEA. (2023b). *World Energy Outlook 2023* (inf. téc.). International Energy Agency. [www.iea.org/terms](https://www.iea.org/terms)
- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291, 117294. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2023.117294>
- Ismail, T. M., Ramzy, K., Abelwhab, M. N., Elnaghi, B. E., El-Salam, M. A., & Ismail, M. I. (2018). Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from
-

- 
- dry cell. *Energy Conversion and Management*, 155, 287-300. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.10.076>
- Jang, D., Kim, J., Kim, D., Han, W. B., & Kang, S. (2022). Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies. *Energy Conversion and Management*, 258, 115499. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115499>
- Jannasch, A. K., Silversand, F., Berger, M., Dupuis, D., & Tena, E. (2006). Development of a novel catalytic burner for natural gas combustion for gas stove and cooking plate applications. *Catalysis Today*, 117(4), 433-437. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2006.06.020>
- Jenkins, B., & Mullinger, P. (2023). Flames and burners for furnaces. *Industrial and Process Furnaces*, 151-225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91629-5.00010-0>
- Jonin, M., & Haussener, S. (2025). Design and energy assessment of non-premixed gas burners: Radiative and catalytic hydrogen combustion. *Applied Thermal Engineering*, 280, 127674. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.127674>
- Kahu, S. Y., Raut, R. B., & Bhurchandi, K. M. (2019, febrero). Review and evaluation of color spaces for image/video compression. <https://doi.org/10.1002/col.22291>
- Kamble, V., & Bhurchandi, K. M. (2015). No-reference image quality assessment algorithms: A survey. *Optik*, 126(11-12), 1090-1097. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2015.02.093>
- Kojima, H., Nagasawa, K., Todoroki, N., Ito, Y., Matsui, T., & Nakajima, R. (2023). Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4572-4593. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.11.018>
- Kumar, S. S., & Lim, H. (2022, noviembre). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>
- Kuo, C. T., & Cheng, S. C. (2007). Fusion of color edge detection and color quantization for color image watermarking using principal axes analysis. *Pattern Recognition*, 40(12), 3691-3704. <https://doi.org/10.1016/J.PATCOG.2007.03.025>
-

- Lahrichi, A., Issmaeli, Y. E., Kalanur, S. S., & Pollet, B. G. (2024). Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): Towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production. *Journal of Energy Chemistry*, *94*, 688-715. <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2024.03.020>
- León-Ruiz, J. E. D., Carvajal-Mariscal, I., Cruz-Ávila, M. D. L., Klapp, J., & Guzmán, J. E. V. (2022). Image convolution-based experimental technique for flame front detection and dimension estimation: a case study on laminar-to-transition jet diffusion flame height measurement. *Measurement Science and Technology*, *33*, 075406. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac65db>
- Lepcha, D. C., Goyal, B., Dogra, A., & Goyal, V. (2023, marzo). Image super-resolution: A comprehensive review, recent trends, challenges and applications. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.10.007>
- Li, Q., Zhang, Q., Zhang, L., Lang, J., Yuan, W., An, G., Lei, T., & JunhaoYan. (2026). A comprehensive review of advances and challenges of hydrogen production, purification, compression, transportation, storage and utilization technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *226*, 116196. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2025.116196>
- Liu, J., Zhang, X., & Xie, Q. (2019). Flame geometrical characteristics of downward sloping buoyant turbulent jet fires. *Fuel*, *257*, 116112. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.116112>
- Matthes, J., Waibel, P., Vogelbacher, M., Gehrman, H. J., & Keller, H. B. (2019). A new camera-based method for measuring the flame stability of non-oscillating and oscillating combustions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *105*, 27-34. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2019.03.008>
- Mittal, A., Soundararajan, R., & Bovik, A. C. (2013). Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, *20*(3), 209-212. <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726>
- Mu, Y., Li, Z., Luo, K., Fan, J., Xing, J., Zhang, B., & Shi, S. (2022). Analyzing the combustion oscillation of a gas turbine for syngas based on the characteristic time-scale theory. *Thermal*

- 
- Science and Engineering Progress*, 30, 101224. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2022.101224>
- Murphy, P. J., Alimohammadi, S., & O'Shaughnessy, S. M. (2024). Experimental investigation of dual jet flow past a heated surface: Effect of Reynolds number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 218, 124786. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2023.124786>
- Palacios, A., & Casal, J. (2011). Assessment of the shape of vertical jet fires. *Fuel*, 90(2), 824-833. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.09.048>
- Paparao, J., & Murugan, S. (2021, noviembre). Oxy-hydrogen gas as an alternative fuel for heat and power generation applications - A review. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.069>
- Pérez-Delgado, M.-L., & Celebi, M. E. (2024). A comparative study of color quantization methods using various image quality assessment indices. *Multimedia Systems*, 30(1), 40. <https://doi.org/10.1007/s00530-023-01206-7>
- Qi, S., Li, Y., Zhou, S., Jing, Q., Zhang, L., Zhou, R., Chen, W., & Li, T. (2024). The premixed flame structure and combustion mechanism of clean hydrogen mixed with multi-component natural gas. *Fuel*, 372, 132240. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.132240>
- Qiu, T., Liu, M., Zhou, G., Wang, L., & Gao, K. (2019). An unsupervised classification method for flame image of pulverized coal combustion based on convolutional auto-encoder and hidden Markov model. *Energies*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/en12132585>
- Reyes, M., Tinaut, F. V., Giménez, B., & Camaño, A. (2021). Combustion and flame front morphology characterization of H<sub>2</sub>-CO syngas blends in constant volume combustion bombs. *Energy and Fuels*, 35, 3497-3511. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03598>
- Reyes, M., Sastre, R., Giménez, B., & Sesma, C. (2022). Experimental, Kinetic Modeling and Morphologic Study of the Premixed Combustion of Hydrogen/Methane Mixtures. *Energies*, 15, 3722. <https://doi.org/10.3390/en15103722>
- Reynolds, O., & Launder, B. E. (1997). On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion [doi: 10.1098/rspa.1995.0116]. *Proceedings of the*
-

- 
- Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 451, 5-47. <https://doi.org/10.1098/rspa.1995.0116>
- Rodriguez-Castillo, E., García-Alvarado, M., Mayra, R., Perez, G. R., & Aguirre, F. P. (2023). Mathematical modeling for a monopolar-dry cell alkaline electrolyzer, an appraisal on electric and thermodynamics effects for laboratory scale. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s43153-023-00303-4>
- Rusman, N. A., & Dahari, M. (2016). A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 12108-12126. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.05.244>
- Sebbahi, S., Assila, A., Belghiti, A. A., Laasri, S., Kaya, S., Hlil, E. K., Rachidi, S., & Hajjaji, A. (2024). A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 82, 583-599. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.07.428>
- Sertel, O., Kong, J., Catalyurek, U. V., Lozanski, G., Saltz, J. H., & Gurcan, M. N. (2009). Histopathological image analysis using model-based intermediate representations and color texture: Follicular lymphoma grading. *Journal of Signal Processing Systems*, 55(1-3), 169-183. <https://doi.org/10.1007/s11265-008-0201-y>
- Sherkat, N., Allen, T., & Wong, W. S. (2005). Use of colour for hand-filled form analysis and recognition. *Pattern Analysis and Applications*, 8(1), 163-180. <https://doi.org/10.1007/s10044-005-0253-6>
- Shi, M., Song, X., Su, W., Wei, J., Lv, P., Yang, J., & Yu, G. (2023). Effect of the nozzle structure on the flame stability and OH\* chemiluminescence of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> inverse diffusion impinging flame. *Fuel*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129153>
- Sikiru, S., Oladosu, T. L., Amosa, T. I., Olutoki, J. O., Ansari, M. N., Abioye, K. J., Rehman, Z. U., & Soleimani, H. (2024). Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56, 1152-1182. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.12.186>
-

- 
- Simoes, W., & de Sá, M. (2024). PSNR and SSIM: Evaluation of the Imperceptibility Quality of Images Transmitted over Wireless Networks. *Procedia Computer Science*, 251, 463-470. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2024.11.134>
- Soly, A. K. E., Kady, M. A. E., Farrag, A. E. F., & Gad, M. S. (2021). Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 12639-12653. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.01.110>
- Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014, enero). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision* (H. Gowans, Ed.; 4.<sup>a</sup> ed.). 2008 Cengage Learning.
- Speckmann, F. W., Bintz, S., & Birke, K. P. (2019). Influence of rectifiers on the energy demand and gas quality of alkaline electrolysis systems in dynamic operation. *Applied Energy*, 250, 855-863. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.05.014>
- Subramanian, B., & Thangavel, V. (2020). Analysis of onsite HHO gas generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 14218-14231. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.03.159>
- Sujatha, K., Bhavani, N. P., Cao, S. Q., & Ram Kumar, K. S. (2018). Soft Sensor for Flame Temperature Measurement and IoT based Monitoring in Power Plants. *Materials Today: Proceedings*, 5(4), 10755-10762. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.359>
- Sun, D., Lu, G., Zhou, H., Yan, Y., & Liu, S. (2015). Quantitative Assessment of Flame Stability Through Image Processing and Spectral Analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(12), 3323-3333. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2444262>
- Sun, R., Yang, X., Wang, J., Chen, P., & Wu, L. (2021). Experimental study on axial temperature profile of jet fire of oil-filled equipment in substation. *Processes*, 9. <https://doi.org/10.3390/pr9081460>
- Sun, X., Jiang, Y. C., Zhao, P., Jing, G., & Ma, T. (2024). Effect of ammonia/hydrogen blending and injection modes on combustion emission and performance of marine engine. *Fuel*, 371, 131894. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2024.131894>
-

- 
- Sunderland, P. B., Haylett, J. E., Urban, D. L., & Nayagam, V. (2008). Lengths of laminar jet diffusion flames under elevated gravity. *Combustion and Flame*, *152*, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.08.011>
- Tello, A., Cataño, F. A., Arunachalam, A., Oyarzún, D., Henriquez, R., Valdivia, P., Viswanathan, M. R., & Gómez, H. (2025). Green hydrogen production by photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: A review on the conceptualization and advancements. *International Journal of Hydrogen Energy*, *107*, 378-395. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.04.333>
- Terlouw, T., Bauer, C., McKenna, R., & Mazzotti, M. (2022). Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. *Energy and Environmental Science*, *15*, 3583-3602. <https://doi.org/10.1039/d2ee01023b>
- Thompson, S., Celebi, M. E., & Buck, K. H. (2020). Fast color quantization using MacQueen's k-means algorithm. *Journal of Real-Time Image Processing*, *17*(5), 1609-1624. <https://doi.org/10.1007/s11554-019-00914-6>
- UNFCCC. (2015, noviembre). *Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-First Session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015* (inf. téc.). United Nations. [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agr%20eement\\_english.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agr%20eement_english.pdf)
- Venkatanath, F., Praneeth, Bh., M. C., Channappayya, S. S., & Medasani, S. S. (2015). Blind image quality evaluation using perception based features. *2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC)*, 1-6. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:6917137>
- Wang, S., Li, J., & Fan, A. (2024). Effects of channel height on the combustion efficiency and thermal performances of a micro Swiss-roll combustor. *Applied Thermal Engineering*, *238*, 121956. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.121956>
- Wang, Y., Yang, J., Xiao, C., & An, W. (2018). Fast Convergence Strategy for Multi-Image Super-resolution via Adaptive Line Search. *IEEE Access*, *6*, 9129-9139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2799161>
-

- 
- Wang, Y., Yu, Y., Zhu, X., & Zhang, Z. (2020). Pattern recognition for measuring the flame stability of gas-fired combustion based on the image processing technology. *Fuel*, 270, 117486. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.117486>
- Wang, Z., Jiang, K., Zhao, K., & Guo, P. (2021). Macroscopic characteristics and prediction model of horizontal extension length for syngas jet flame under inclined conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(44), 23091-23099. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.118>
- Wang, Z., Bovik, A., Sheikh, H., & Simoncelli, E. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Wang, Z., & Bovik, A. C. (2009). Mean squared error: Love it or leave it? A new look at Signal Fidelity Measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(1), 98-117. <https://doi.org/10.1109/MSP.2008.930649>
- Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W. (2006). *Combustion* (2nd Edition). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-45363-5>
- Woods, P., Bustamante, H., & Aguey-Zinsou, K. F. (2022). The hydrogen economy - Where is the water? *Energy Nexus*, 7, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.NEXUS.2022.100123>
- Xu, W., & Yan, Y. (2025). Quantitative measurement of burner flame stability through spectroscopic analysis. *Measurement: Sensors*, 38, 101713. <https://doi.org/10.1016/J.MEASEN.2024.101713>
- Xu, W., Yan, Y., Huang, X., & Hu, Y. (2023). Quantitative measurement of the stability of a pulverized coal fired flame through digital image processing and statistical analysis. *Measurement*, 206, 112328. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112328>
- Yang, C. K., & Tsai, W. H. (1998). Color image compression using quantization, thresholding, and edge detection techniques all based on the moment-preserving principle. *Pattern Recognition Letters*, 19(2), 205-215. [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(97\)00166-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(97)00166-9)
-

- Yang, Q., Zhao, L., Xiao, J., Wen, R., Zhang, F., & Zhang, D. (2024). Machine learning-assisted prediction and optimization of solid oxide electrolysis cell for green hydrogen production. *Green Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.GCE.2024.04.004>
- Yu, M., Wang, K., & Vredenburg, H. (2021). Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*, 21261-21273. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.016>
- Zhang, A., Zou, X., Shen, J., Li, Y., & Gao, W. (2024). Experimental investigation on hydrogen jet flame behavior and temperature distribution with different shapes of outlet. *International Journal of Hydrogen Energy*, *63*, 844-856. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2024.03.205>
- Zhang, L., Zhang, L., Mou, X., & Zhang, D. (2012). A comprehensive evaluation of full reference image quality assessment algorithms [2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012 ; Conference date: 30-09-2012 Through 03-10-2012]. *2012 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2012 - Proceedings*, 1477-1480. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2012.6467150>
- Zhang, Y., Li, Q., & Zhou, H. (2016). Heat Transfer Calculation in Furnaces. *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*, 131-172. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800966-6.00005-3>
- Zhao, C., Li, X., Wang, X., Li, M., & Xiao, H. (2023). An experimental study of the characteristics of blended hydrogen-methane non-premixed jet flames. *Process Safety and Environmental Protection*, *174*, 838-847. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.041>
- Zhao, D., Guan, Y., & Reinecke, A. (2019). Characterizing hydrogen-fuelled pulsating combustion on thermodynamic properties of a combustor. *Communications Physics*, *2*, 44. <https://doi.org/10.1038/s42005-019-0142-8>
- Zhou, L. (2018). Fundamentals of Combustion Theory. *Theory and Modeling of Dispersed Multiphase Turbulent Reacting Flows*, 15-70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813465-8.00003-X>

Zhou, Y., Zhang, C., Han, X., & Lin, Y. (2021). Monitoring combustion instabilities of stratified swirl flames by feature extractions of time-averaged flame images using deep learning method. *Aerospace Science and Technology*, *109*, 106443. <https://doi.org/10.1016/J.AST.2020.106443>

# **Apéndice A**

---

## **Parámetros Estadísticos (HSI)**

---

Tabla A.1: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (1° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	2.68	0.95	0.9781	0.0780	0.2387	0.0404	7.29
2	5.59	4.35	0.9892	0.0842	0.2557	0.0446	1.62
3	9.73	7.18	0.9910	0.0666	0.2471	0.0211	1.80
4	23.9	7.74	0.9950	0.0162	0.2373	0.0410	8.73
5	11.3	6.73	0.9955	0.0265	0.2460	0.0239	2.76
6	8.67	7.79	0.9887	0.1018	0.2471	0.0261	1.22
7	8.45	7.49	0.9887	0.1005	0.2550	0.0445	1.26
8	6.44	6.18	0.9917	0.0794	0.2540	0.0382	1.07
9	8.43	3.96	0.9931	0.0324	0.2434	0.0312	4.33
10	7.55	5.60	0.9845	0.1148	0.2567	0.0500	1.79
11	10.7	6.13	0.9857	0.0819	0.2451	0.0278	2.96
12	10.5	7.03	0.9923	0.0515	0.2467	0.0220	2.17
13	9.79	7.92	0.9881	0.0960	0.2473	0.0223	1.50
14	1.07	0.94	0.9922	0.0686	0.2549	0.0428	1.27
15	4.77	4.89	0.9935	0.0663	0.2534	0.0351	0.94
16	15.4	6.60	0.9873	0.0543	0.2421	0.0338	5.17
17	6.50	5.35	0.9917	0.0681	0.2476	0.0198	1.45
18	8.07	5.83	0.9822	0.1287	0.2636	0.0983	1.88
19	7.29	7.35	0.9910	0.0911	0.2555	0.0549	0.98
20	6.03	2.59	0.9909	0.0389	0.2418	0.0352	5.14
21	2.84	3.11	0.9923	0.0844	0.2556	0.0613	0.83
22	14.4	7.10	0.9932	0.0337	0.2441	0.0289	3.97
23	8.11	4.28	0.9956	0.0234	0.2448	0.0277	3.47
24	4.22	1.54	0.9829	0.0625	0.2384	0.0424	6.96
25	5.23	2.08	0.9849	0.0600	0.2402	0.0392	5.92
26	9.19	7.39	0.9902	0.0787	0.2475	0.0199	1.52
27	7.29	3.25	0.9938	0.0278	0.2426	0.0329	4.79
28	21.4	8.01	0.9902	0.0365	0.2402	0.0367	6.68
29	6.78	5.17	0.9877	0.0939	0.2470	0.0228	1.69
30	2.27	2.51	0.9933	0.0745	0.2531	0.0339	0.81
31	1.56	1.53	0.9927	0.0722	0.2538	0.0374	1.02
32	12.3	6.84	0.9876	0.0692	0.2451	0.0271	3.12
33	4.62	4.78	0.9913	0.0898	0.2563	0.0655	0.93
34	1.60	1.92	0.9961	0.0471	0.2524	0.0292	0.69
35	5.24	4.62	0.9918	0.0720	0.2545	0.0399	1.27
36	2.32	2.32	0.9910	0.0899	0.2569	0.0692	0.99

Tabla A.2: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (2° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	12.4	6.01	0.9987	0.0065	0.2444	0.0273	4.08
2	2.20	0.44	0.9990	0.0019	0.2244	0.0521	19.52
3	4.91	2.16	0.9980	0.0089	0.2419	0.0355	4.94
4	6.52	6.44	0.9926	0.0731	0.2484	0.0162	1.02
5	6.06	4.73	0.9891	0.0853	0.2558	0.0452	1.62
6	10.9	5.17	0.9986	0.0065	0.2440	0.0284	4.27
7	9.43	6.85	0.9957	0.0316	0.2475	0.0183	1.86
8	4.00	4.80	0.9944	0.0671	0.2526	0.0314	0.69
9	1.48	1.82	0.9939	0.0754	0.2536	0.0450	0.65
10	5.03	4.21	0.9923	0.0643	0.2480	0.0167	1.41
11	4.87	4.65	0.9896	0.0995	0.2573	0.0693	1.08
12	6.92	5.03	0.9995	0.0036	0.2474	0.0189	1.86
13	19.7	7.16	0.9980	0.0074	0.2401	0.0359	7.01
14	5.79	3.15	0.9986	0.0075	0.2451	0.0267	3.27
15	8.97	6.37	0.9996	0.0030	0.2474	0.0185	1.95
16	4.02	1.56	0.9971	0.0111	0.2394	0.0411	6.22
17	4.26	4.10	0.9903	0.0935	0.2541	0.0394	1.07
18	5.62	6.10	0.9921	0.0852	0.2535	0.0385	0.84
19	5.44	4.01	0.9947	0.0390	0.2476	0.0179	1.81
20	6.00	5.73	0.9959	0.0396	0.2485	0.0142	1.08
21	6.30	2.86	0.9984	0.0071	0.2428	0.0326	4.63
22	5.04	6.12	0.9937	0.0768	0.2540	0.0492	0.67
23	1.02	1.24	0.9953	0.0570	0.2525	0.0301	0.67
24	11.4	6.05	0.9988	0.0064	0.2452	0.0254	3.43
25	2.16	2.70	0.9947	0.0659	0.2489	0.0139	0.64
26	5.52	6.17	0.9929	0.0789	0.2484	0.0180	0.79
27	9.96	6.29	0.9986	0.0089	0.2466	0.0214	2.44
28	3.35	1.03	0.9939	0.0188	0.2341	0.0490	9.50
29	2.60	3.49	0.9967	0.0443	0.2491	0.0117	0.55
30	8.34	5.95	0.9996	0.0027	0.2474	0.0188	1.93
31	2.11	2.24	0.9949	0.0545	0.2486	0.0148	0.88
32	4.23	4.08	0.9915	0.0818	0.2482	0.0171	1.07
33	0.95	1.50	0.9976	0.0374	0.2514	0.0222	0.40
34	6.05	5.97	0.9944	0.0557	0.2485	0.0144	1.02
35	0.86	0.88	0.9920	0.0816	0.2539	0.0395	0.95
36	2.46	2.76	0.9928	0.0808	0.2532	0.0353	0.79
37	2.53	3.46	0.9962	0.0520	0.2520	0.0267	0.53
38	6.24	3.64	0.9982	0.0108	0.2458	0.0245	2.86

Tabla A.3: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (3° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	4.71	2.34	0.9984	0.0079	0.2436	0.0316	3.89
2	17.0	6.61	0.9987	0.0049	0.2412	0.0345	6.17
3	6.48	6.73	0.9913	0.0900	0.2556	0.0581	0.92
4	1.83	0.25	1.0000	0.0000	0.2062	0.0610	33.95
5	4.78	5.65	0.9942	0.0689	0.2487	0.0149	0.71
6	14.3	8.07	0.9995	0.0030	0.2460	0.0226	3.04
7	8.31	4.40	0.9992	0.0041	0.2450	0.0266	3.45
8	4.62	4.33	0.9913	0.0816	0.2481	0.0180	1.12
9	11.5	6.58	0.9990	0.0055	0.2458	0.0240	2.96
10	11.0	6.81	0.9995	0.0032	0.2464	0.0221	2.55
11	20.5	7.59	0.9989	0.0041	0.2404	0.0354	6.82
12	4.10	4.84	0.9968	0.0383	0.2490	0.0116	0.71
13	1.33	1.83	0.9956	0.0609	0.2520	0.0278	0.52
14	5.26	4.28	0.9937	0.0516	0.2479	0.0170	1.49
15	1.59	1.78	0.9930	0.0781	0.2482	0.0200	0.79
16	2.65	3.06	0.9930	0.0811	0.2552	0.0600	0.74
17	1.98	0.74	0.9971	0.0109	0.2380	0.0449	6.62
18	3.59	3.98	0.9923	0.0851	0.2547	0.0520	0.81
19	4.25	4.71	0.9978	0.0239	0.2489	0.0118	0.81
20	5.31	3.22	0.9991	0.0054	0.2460	0.0241	2.64
21	4.16	5.03	0.9957	0.0521	0.2490	0.0123	0.68
22	2.98	1.58	0.9996	0.0023	0.2440	0.0319	3.45
23	5.46	4.64	0.9889	0.0948	0.2551	0.0436	1.36
24	5.30	2.87	0.9988	0.0066	0.2449	0.0278	3.29
25	10.4	5.79	0.9996	0.0023	0.2455	0.0249	3.12
26	1.48	1.38	0.9898	0.0946	0.2561	0.0568	1.14
27	2.57	1.19	0.9969	0.0145	0.2419	0.0376	4.42
28	2.08	2.54	0.9947	0.0647	0.2488	0.0151	0.66
29	3.78	4.62	0.9938	0.0752	0.2527	0.0334	0.66
30	1.21	1.73	0.9979	0.0300	0.2493	0.0105	0.49

Tabla A.4: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (4° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	1.93	0.44	0.9984	0.0037	0.2287	0.0492	15.83
2	24.6	8.24	0.9977	0.0076	0.2384	0.0388	8.19
3	7.68	6.10	0.9964	0.0284	0.2478	0.0176	1.56
4	5.92	5.14	0.9876	0.1072	0.2560	0.0525	1.31
5	1.06	1.04	0.9936	0.0620	0.2539	0.0380	1.04
6	7.76	6.98	0.9911	0.0796	0.2480	0.0184	1.22
7	5.64	2.98	0.9978	0.0115	0.2447	0.0282	3.47
8	3.39	1.60	0.9981	0.0088	0.2426	0.0350	4.31
9	3.32	3.24	0.9917	0.0805	0.2482	0.0180	1.04
10	6.95	3.99	0.9980	0.0113	0.2456	0.0250	2.95
11	6.16	6.17	0.9916	0.0840	0.2538	0.0382	0.99
12	5.67	6.28	0.9925	0.0834	0.2536	0.0394	0.81
13	17.3	7.50	0.9993	0.0032	0.2428	0.0313	5.07
14	7.33	6.54	0.9928	0.0645	0.2481	0.0170	1.24
15	2.15	0.80	0.9941	0.0220	0.2384	0.0434	6.70
16	4.72	4.45	0.9955	0.0428	0.2483	0.0160	1.11
17	5.33	3.24	0.9978	0.0133	0.2460	0.0243	2.64
18	1.18	1.69	0.9962	0.0541	0.2491	0.0135	0.49
19	4.05	2.04	0.9980	0.0101	0.2438	0.0314	3.79
20	6.87	6.82	0.9912	0.0875	0.2479	0.0204	1.01
21	12.3	6.85	0.9994	0.0035	0.2456	0.0245	3.13
22	5.31	5.22	0.9925	0.0738	0.2538	0.0369	1.02
23	7.65	5.52	0.9867	0.0960	0.2568	0.0487	1.89
24	4.29	2.36	0.9973	0.0149	0.2449	0.0278	3.20
25	7.99	5.05	0.9889	0.0703	0.2464	0.0225	2.44
26	13.5	7.58	0.9989	0.0064	0.2457	0.0240	3.07
27	13.2	8.36	0.9898	0.0648	0.2465	0.0225	2.43
28	3.61	4.19	0.9938	0.0718	0.2486	0.0168	0.74
29	3.44	3.32	0.9931	0.0663	0.2538	0.0363	1.06
30	20.3	7.13	0.9971	0.0101	0.2392	0.0379	7.49
31	2.31	1.09	0.9987	0.0060	0.2423	0.0361	4.31
32	5.14	6.20	0.9936	0.0771	0.2545	0.0538	0.68
33	7.80	5.49	0.9846	0.1085	0.2466	0.0237	1.98
34	2.11	2.06	0.9930	0.0687	0.2538	0.0366	1.04
35	2.58	2.96	0.9930	0.0798	0.2533	0.0381	0.75

Tabla A.5: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (5° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	10.6	5.03	0.9982	0.0085	0.2436	0.0305	4.25
2	5.24	2.27	0.9962	0.0165	0.2415	0.0368	5.08
3	4.54	4.35	0.9963	0.0350	0.2484	0.0156	1.08
4	6.59	5.14	0.9888	0.0871	0.2557	0.0443	1.62
5	5.65	3.98	0.9890	0.0775	0.2469	0.0219	1.97
6	2.08	0.53	0.9805	0.0500	0.2299	0.0514	13.24
7	11.2	5.82	0.9887	0.0586	0.2447	0.0275	3.58
8	2.29	2.05	0.9915	0.0759	0.2544	0.0393	1.23
9	17.9	6.98	0.9972	0.0111	0.2412	0.0344	6.16
10	6.76	3.00	0.9931	0.0308	0.2423	0.0342	4.82
11	4.72	5.95	0.9942	0.0734	0.2540	0.0506	0.62
12	14.8	9.20	0.9847	0.0955	0.2459	0.0255	2.51
13	3.01	4.08	0.9950	0.0680	0.2528	0.0382	0.54
14	3.62	1.53	0.9972	0.0119	0.2406	0.0400	5.30
15	6.95	3.81	0.9962	0.0209	0.2451	0.0269	3.22
16	15.3	7.38	0.9987	0.0061	0.2440	0.0287	4.15
17	3.26	2.73	0.9879	0.1017	0.2470	0.0248	1.40
18	2.89	1.02	0.9951	0.0172	0.2367	0.0469	7.42
19	5.83	6.14	0.9923	0.0809	0.2534	0.0362	0.89
20	4.64	4.67	0.9931	0.0694	0.2535	0.0354	0.98
21	3.67	4.20	0.9951	0.0563	0.2487	0.0148	0.76
22	5.39	4.70	0.9887	0.0982	0.2474	0.0230	1.30
23	2.81	3.88	0.9954	0.0628	0.2489	0.0154	0.52
24	6.43	3.28	0.9966	0.0172	0.2443	0.0291	3.69
25	5.28	5.46	0.9930	0.0721	0.2534	0.0351	0.93
26	7.76	7.31	0.9898	0.0963	0.2474	0.0245	1.11
27	3.14	3.25	0.9940	0.0624	0.2533	0.0336	0.93
28	4.69	3.92	0.9867	0.1111	0.2604	0.0865	1.42
29	5.99	6.49	0.9921	0.0855	0.2537	0.0402	0.84
30	6.99	5.54	0.9851	0.1183	0.2567	0.0530	1.57
31	1.14	1.00	0.9927	0.0636	0.2547	0.0414	1.28
32	3.11	2.91	0.9912	0.0826	0.2541	0.0385	1.13
33	8.08	7.18	0.9903	0.0863	0.2477	0.0202	1.25
34	19.4	7.72	0.9966	0.0135	0.2414	0.0340	5.94
35	13.8	8.28	0.9897	0.0621	0.2459	0.0246	2.70
36	6.45	4.87	0.9896	0.0788	0.2472	0.0211	1.72
37	12.3	7.23	0.9961	0.0226	0.2459	0.0239	2.83

Tabla A.6: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (6° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	4.17	4.33	0.9913	0.0905	0.2543	0.0451	0.92
2	1.46	0.25	0.9999	0.0002	0.2172	0.0559	25.65
3	2.19	2.23	0.9912	0.0900	0.2540	0.0410	0.95
4	2.51	1.10	0.9959	0.0180	0.2408	0.0404	4.98
5	7.83	6.22	0.9966	0.0267	0.2479	0.0171	1.56
6	4.33	5.27	0.9938	0.0759	0.2530	0.0360	0.67
7	11.3	5.27	0.9988	0.0054	0.2435	0.0303	4.41
8	10.9	6.07	0.9995	0.0029	0.2455	0.0251	3.13
9	4.14	2.66	0.9987	0.0083	0.2463	0.0235	2.37
10	2.68	2.47	0.9937	0.0575	0.2481	0.0175	1.17
11	7.58	6.50	0.9937	0.0542	0.2481	0.0167	1.34
12	2.25	3.46	0.9966	0.0518	0.2492	0.0122	0.42
13	5.27	5.72	0.9943	0.0621	0.2487	0.0146	0.84
14	4.03	2.09	0.9988	0.0061	0.2440	0.0313	3.60
15	18.1	7.26	0.9989	0.0044	0.2416	0.0336	5.82
16	3.56	1.63	0.9992	0.0039	0.2419	0.0370	4.53
17	5.16	3.24	0.9992	0.0050	0.2462	0.0235	2.48
18	2.85	3.52	0.9950	0.0622	0.2489	0.0140	0.65
19	1.79	1.51	0.9879	0.1021	0.2561	0.0511	1.39
20	5.99	5.03	0.9894	0.0890	0.2551	0.0429	1.40
21	2.84	3.05	0.9932	0.0730	0.2532	0.0343	0.86
22	14.5	6.28	0.9981	0.0084	0.2427	0.0314	5.08
23	15.7	8.25	0.9993	0.0037	0.2451	0.0255	3.52
24	3.32	3.48	0.9921	0.0822	0.2482	0.0190	0.90
25	3.14	4.18	0.9952	0.0633	0.2522	0.0287	0.56
26	2.18	0.72	0.9903	0.0322	0.2350	0.0498	8.36
27	5.01	3.50	0.9964	0.0250	0.2471	0.0205	2.01
28	2.48	3.31	0.9980	0.0267	0.2492	0.0112	0.56
29	12.2	6.81	0.9996	0.0024	0.2456	0.0247	3.10
30	2.59	3.09	0.9970	0.0357	0.2490	0.0123	0.70
31	5.12	2.67	0.9978	0.0113	0.2444	0.0294	3.55
32	5.31	6.25	0.9933	0.0793	0.2545	0.0525	0.72
33	3.50	3.31	0.9943	0.0539	0.2484	0.0153	1.11
34	4.87	5.74	0.9938	0.0726	0.2486	0.0165	0.72

Tabla A.7: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (7° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	1.20	0.16	1.0000	0.0000	0.2174	0.0426	36.84
2	12.6	6.20	0.9996	0.0020	0.2442	0.0285	3.95
3	5.50	5.63	0.9950	0.0510	0.2486	0.0145	0.94
4	1.56	0.57	0.9996	0.0014	0.2376	0.0458	6.85
5	5.94	6.50	0.9922	0.0856	0.2561	0.0671	0.83
6	4.33	4.25	0.9914	0.0845	0.2539	0.0387	1.03
7	2.32	1.09	0.9978	0.0101	0.2419	0.0378	4.35
8	2.78	1.50	0.9995	0.0024	0.2440	0.0323	3.32
9	19.3	9.17	0.9990	0.0046	0.2441	0.0280	4.25
10	15.9	6.65	0.9993	0.0030	0.2421	0.0331	5.41
11	9.01	4.50	0.9988	0.0059	0.2442	0.0292	3.85
12	4.84	5.54	0.9943	0.0651	0.2487	0.0150	0.76
13	1.96	2.09	0.9920	0.0854	0.2547	0.0502	0.88
14	3.94	2.44	0.9992	0.0049	0.2458	0.0257	2.55
15	12.0	6.84	0.9994	0.0033	0.2457	0.0245	2.97
16	1.64	2.82	0.9977	0.0400	0.2494	0.0102	0.34
17	2.49	3.38	0.9948	0.0700	0.2539	0.0528	0.54
18	0.98	1.09	0.9930	0.0772	0.2547	0.0524	0.81
19	11.2	6.25	0.9993	0.0039	0.2454	0.0255	3.14
20	2.39	2.87	0.9936	0.0764	0.2529	0.0352	0.69
21	3.62	2.04	0.9989	0.0062	0.2448	0.0295	3.05
22	2.37	3.08	0.9954	0.0600	0.2489	0.0139	0.59
23	3.53	4.65	0.9946	0.0705	0.2534	0.0443	0.57
24	6.00	3.36	0.9990	0.0055	0.2452	0.0270	3.09
25	1.32	1.76	0.9975	0.0332	0.2491	0.0117	0.56
26	2.32	3.44	0.9958	0.0615	0.2519	0.0276	0.46
27	3.39	3.53	0.9960	0.0416	0.2486	0.0142	0.91
28	5.33	5.23	0.9971	0.0281	0.2486	0.0140	1.03
29	13.4	5.88	0.9971	0.0126	0.2427	0.0319	4.94
30	1.61	2.26	0.9965	0.0488	0.2492	0.0116	0.51

Tabla A.8: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (8° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	3.63	1.44	0.9976	0.0096	0.2392	0.0429	5.94
2	9.21	6.32	0.9964	0.0246	0.2470	0.0208	2.08
3	8.04	5.81	0.9864	0.0986	0.2568	0.0490	1.88
4	1.71	0.31	0.9996	0.0007	0.2214	0.0522	23.11
5	4.67	5.72	0.9939	0.0752	0.2528	0.0340	0.66
6	13.4	6.04	0.9954	0.0209	0.2432	0.0309	4.66
7	5.58	3.12	0.9966	0.0188	0.2452	0.0269	3.11
8	8.16	4.43	0.9979	0.0113	0.2450	0.0271	3.28
9	1.21	1.62	0.9970	0.0400	0.2519	0.0259	0.55
10	13.3	8.16	0.9896	0.0634	0.2460	0.0246	2.59
11	4.88	4.54	0.9913	0.0814	0.2479	0.0194	1.14
12	1.05	1.51	0.9955	0.0654	0.2524	0.0340	0.48
13	5.54	5.81	0.9923	0.0803	0.2535	0.0366	0.90
14	5.73	6.27	0.9928	0.0792	0.2482	0.0192	0.83
15	3.40	3.43	0.9937	0.0638	0.2535	0.0349	0.98
16	5.28	2.64	0.9984	0.0082	0.2437	0.0312	3.86
17	2.74	0.89	0.9907	0.0305	0.2345	0.0506	8.58
18	8.13	7.07	0.9905	0.0828	0.2477	0.0202	1.31
19	3.40	2.84	0.9922	0.0650	0.2478	0.0186	1.42
20	5.20	5.00	0.9900	0.0963	0.2567	0.0643	1.07
21	2.46	3.54	0.9967	0.0474	0.2492	0.0122	0.48
22	5.50	6.39	0.9932	0.0795	0.2546	0.0539	0.74
23	20.1	7.66	0.9959	0.0156	0.2407	0.0355	6.42
24	4.23	4.69	0.9938	0.0688	0.2530	0.0332	0.81
25	9.48	5.98	0.9989	0.0070	0.2465	0.0222	2.45
26	2.87	2.94	0.9919	0.0828	0.2536	0.0375	0.94
27	7.48	3.94	0.9976	0.0125	0.2447	0.0277	3.48
28	4.63	2.09	0.9972	0.0125	0.2419	0.0365	4.69
29	3.15	3.53	0.9926	0.0829	0.2545	0.0504	0.79
30	3.45	4.63	0.9949	0.0690	0.2538	0.0510	0.55
31	1.10	1.09	0.9944	0.0556	0.2537	0.0364	1.01
32	9.48	7.27	0.9907	0.0714	0.2473	0.0207	1.67
33	5.97	4.57	0.9917	0.0634	0.2474	0.0201	1.67
34	12.4	6.38	0.9993	0.0037	0.2448	0.0269	3.63
35	5.13	4.59	0.9950	0.0446	0.2481	0.0172	1.23
36	3.03	3.00	0.9917	0.0824	0.2480	0.0199	1.01

Tabla A.9: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (9° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	30.6	10.3	0.9688	0.1047	0.2369	0.0440	8.16
2	3.87	3.31	0.9881	0.1014	0.2553	0.0456	1.35
3	6.80	2.60	0.9534	0.1784	0.2379	0.0462	6.40
4	8.49	6.19	0.9855	0.1054	0.2568	0.0495	1.85
5	8.95	4.42	0.9760	0.1188	0.2430	0.0348	3.93
6	5.84	5.80	0.9908	0.0913	0.2569	0.0682	1.00
7	15.8	8.58	0.9864	0.0736	0.2447	0.0287	3.30
8	10.2	8.75	0.9878	0.1053	0.2582	0.0709	1.33
9	22.0	9.31	0.9818	0.0769	0.2416	0.0355	5.28
10	10.2	3.88	0.9596	0.1537	0.2384	0.0441	6.48
11	6.21	5.69	0.9913	0.0801	0.2477	0.0208	1.18
12	13.3	9.46	0.9830	0.1214	0.2456	0.0314	1.93
13	7.81	5.01	0.9965	0.0226	0.2465	0.0227	2.37
14	8.14	4.56	0.9847	0.0856	0.2448	0.0293	3.08
15	9.68	3.45	0.9477	0.1864	0.2363	0.0489	7.29
16	4.99	4.04	0.9868	0.1067	0.2466	0.0278	1.50
17	8.46	5.74	0.9874	0.0859	0.2463	0.0248	2.12
18	9.14	8.05	0.9882	0.1039	0.2555	0.0486	1.27
19	7.32	6.00	0.9865	0.1107	0.2590	0.0741	1.47
20	10.9	4.34	0.9687	0.1252	0.2397	0.0410	5.90
21	7.10	5.64	0.9875	0.0989	0.2468	0.0250	1.56
22	5.23	1.97	0.9493	0.1907	0.2371	0.0485	6.59
23	20.7	11.1	0.9760	0.1286	0.2438	0.0335	3.35
24	4.93	3.32	0.9986	0.0094	0.2468	0.0217	2.16
25	10.8	5.71	0.9834	0.0879	0.2442	0.0306	3.43
26	2.30	2.15	0.9906	0.0878	0.2544	0.0411	1.14
27	5.78	5.75	0.9919	0.0806	0.2538	0.0375	1.00
28	6.63	3.64	0.9900	0.0550	0.2448	0.0284	3.22
29	6.87	4.29	0.9991	0.0059	0.2463	0.0231	2.51
30	4.59	4.56	0.9943	0.0565	0.2483	0.0170	1.00
31	7.80	7.10	0.9897	0.0941	0.2547	0.0425	1.20
32	6.06	4.75	0.9862	0.1083	0.2562	0.0486	1.60
33	15.2	9.03	0.9844	0.0926	0.2453	0.0280	2.78
34	6.53	5.76	0.9898	0.0901	0.2547	0.0418	1.27

Tabla A.10: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (10° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	13.4	6.06	0.9940	0.0273	0.2428	0.0328	4.63
2	1.76	0.27	0.9982	0.0028	0.2113	0.0605	29.06
3	3.36	4.26	0.9948	0.0666	0.2524	0.0306	0.62
4	10.3	6.21	0.9987	0.0079	0.2459	0.0246	2.69
5	5.31	2.62	0.9976	0.0120	0.2431	0.0339	3.96
6	4.48	4.07	0.9948	0.0471	0.2480	0.0178	1.20
7	0.91	0.96	0.9928	0.0766	0.2539	0.0417	0.88
8	3.03	3.10	0.9917	0.0847	0.2538	0.0389	0.95
9	2.30	0.74	0.9958	0.0134	0.2341	0.0516	8.71
10	2.83	2.45	0.9970	0.0257	0.2479	0.0179	1.32
11	6.78	6.35	0.9925	0.0699	0.2481	0.0182	1.13
12	7.59	4.30	0.9978	0.0124	0.2452	0.0273	3.03
13	11.1	6.05	0.9989	0.0061	0.2451	0.0270	3.24
14	4.76	4.73	0.9907	0.0928	0.2561	0.0606	1.00
15	4.35	5.44	0.9947	0.0670	0.2487	0.0161	0.63
16	5.64	6.46	0.9930	0.0797	0.2547	0.0540	0.76
17	2.23	3.30	0.9971	0.0426	0.2492	0.0121	0.46
18	8.59	6.77	0.9926	0.0583	0.2475	0.0198	1.58
19	13.1	7.84	0.9930	0.0416	0.2458	0.0249	2.73
20	6.72	5.27	0.9877	0.0968	0.2559	0.0463	1.60
21	1.55	1.73	0.9935	0.0728	0.2531	0.0350	0.79
22	4.62	5.42	0.9934	0.0775	0.2534	0.0399	0.72
23	4.08	1.93	0.9980	0.0093	0.2421	0.0372	4.30
24	11.2	6.84	0.9986	0.0086	0.2461	0.0238	2.61
25	1.05	1.58	0.9960	0.0598	0.2533	0.0491	0.44
26	3.45	1.39	0.9964	0.0144	0.2389	0.0446	5.79
27	2.76	2.71	0.9940	0.0590	0.2483	0.0172	1.02
28	5.40	4.54	0.9887	0.0951	0.2472	0.0240	1.39
29	6.11	3.58	0.9993	0.0038	0.2454	0.0271	2.83
30	5.57	3.10	0.9979	0.0115	0.2448	0.0287	3.13
31	19.2	7.43	0.9976	0.0092	0.2404	0.0371	6.28
32	3.09	4.31	0.9955	0.0622	0.2489	0.0160	0.51

Tabla A.11: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (11° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	3.71	2.55	0.9960	0.0272	0.2465	0.0240	2.08
2	1.17	0.14	0.9998	0.0003	0.2484	0.0020	41.19
3	6.87	5.90	0.9942	0.0500	0.2478	0.0189	1.34
4	15.0	6.49	0.9972	0.0121	0.2422	0.0337	5.07
5	6.01	4.94	0.9877	0.1007	0.2556	0.0458	1.46
6	2.20	3.61	0.9966	0.0555	0.2528	0.0452	0.37
7	9.13	6.32	0.9960	0.0276	0.2468	0.0220	2.04
8	4.49	5.70	0.9943	0.0719	0.2541	0.0518	0.62
9	2.48	1.21	0.9977	0.0113	0.2422	0.0379	4.03
10	1.91	1.85	0.9906	0.0911	0.2551	0.0492	1.06
11	3.82	2.15	0.9941	0.0333	0.2446	0.0303	3.06
12	5.88	4.19	0.9953	0.0337	0.2469	0.0220	1.94
13	4.65	3.06	0.9984	0.0107	0.2462	0.0249	2.25
14	1.27	0.43	0.9952	0.0163	0.2365	0.0463	7.87
15	3.86	2.33	0.9974	0.0154	0.2455	0.0274	2.68
16	3.01	1.62	0.9978	0.0120	0.2437	0.0337	3.34
17	4.46	4.11	0.9933	0.0619	0.2480	0.0182	1.16
18	4.60	4.49	0.9904	0.0940	0.2474	0.0252	1.04
19	1.76	0.78	0.9957	0.0193	0.2409	0.0406	4.81
20	0.78	0.85	0.9932	0.0748	0.2535	0.0381	0.83
21	2.15	2.33	0.9942	0.0623	0.2485	0.0166	0.84
22	10.2	5.78	0.9971	0.0166	0.2453	0.0266	3.03
23	2.89	2.89	0.9910	0.0897	0.2543	0.0431	0.99
24	3.11	4.50	0.9957	0.0626	0.2523	0.0326	0.48
25	9.27	6.01	0.9954	0.0295	0.2464	0.0237	2.32
26	4.29	3.24	0.9983	0.0125	0.2472	0.0209	1.73
27	4.15	5.20	0.9949	0.0634	0.2487	0.0158	0.63
28	3.66	4.40	0.9937	0.0756	0.2529	0.0343	0.69
29	6.13	5.89	0.9931	0.0658	0.2481	0.0184	1.07

Tabla A.12: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (12° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Píxeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	9.41	2.38	0.8915	0.2739	0.2225	0.0695	13.57
2	18.2	8.31	0.9723	0.1265	0.2416	0.0383	4.58
3	4.55	5.28	0.9933	0.0777	0.2538	0.0444	0.74
4	13.2	8.22	0.9797	0.1266	0.2446	0.0337	2.50
5	12.0	4.62	0.9549	0.1739	0.2376	0.0479	6.30
6	4.99	3.73	0.9850	0.1117	0.2568	0.0504	1.76
7	13.2	7.87	0.9789	0.1257	0.2600	0.0599	2.73
8	8.08	6.44	0.9860	0.1120	0.2578	0.0623	1.55
9	7.79	6.07	0.9858	0.1103	0.2462	0.0298	1.62
10	7.03	6.75	0.9903	0.0932	0.2578	0.0749	1.07
11	10.7	4.80	0.9701	0.1342	0.2412	0.0395	4.74
12	6.56	4.90	0.9857	0.1072	0.2567	0.0497	1.76
13	2.82	2.37	0.9891	0.0922	0.2552	0.0436	1.39
14	9.10	3.29	0.9444	0.2009	0.2358	0.0514	7.11
15	9.30	8.10	0.9882	0.1024	0.2571	0.0615	1.30
16	9.67	4.78	0.9645	0.1755	0.2765	0.1313	3.93
17	7.84	4.99	0.9855	0.0925	0.2455	0.0284	2.41
18	19.5	9.18	0.9710	0.1364	0.2418	0.0385	4.33
19	5.74	1.49	0.9034	0.2502	0.2264	0.0612	12.97
20	9.13	2.83	0.9242	0.2350	0.2309	0.0592	9.43
21	8.73	3.60	0.9598	0.1655	0.2392	0.0447	5.56
22	4.06	3.80	0.9900	0.0939	0.2582	0.0767	1.13
23	8.16	4.63	0.9817	0.1039	0.2445	0.0315	3.01
24	8.41	7.03	0.9888	0.0940	0.2552	0.0439	1.41
25	8.85	7.76	0.9888	0.0979	0.2550	0.0437	1.28
26	10.6	7.81	0.9843	0.1154	0.2458	0.0310	1.81

Tabla A.13: Parámetros Estadísticos del Espacio de Color HSI (13° Llama)

No. de Color	Intensidad (I)		Saturación (S)		Tono (H)		Porcentaje de Pixeles
	$\bar{x}_I \times 10^3$	$\sigma_I \times 10^2$	$\bar{x}_S$	$\sigma_S$	$\bar{x}_H$	$\sigma_H$	
1	10.4	5.14	0.9779	0.1092	0.2430	0.0343	3.95
2	11.5	8.97	0.9850	0.1163	0.2568	0.0531	1.63
3	12.2	4.01	0.9397	0.1986	0.2345	0.0509	8.44
4	5.68	4.61	0.9889	0.0906	0.2554	0.0437	1.49
5	12.2	8.66	0.9827	0.1224	0.2454	0.0327	1.96
6	22.8	9.66	0.9652	0.1469	0.2402	0.0413	5.30
7	8.37	5.11	0.9859	0.0858	0.2454	0.0284	2.61
8	9.29	6.55	0.9826	0.1228	0.2454	0.0326	1.97
9	6.92	6.18	0.9907	0.0832	0.2545	0.0405	1.24
10	13.3	7.74	0.9782	0.1269	0.2604	0.0606	2.86
11	2.57	2.53	0.9926	0.0727	0.2536	0.0357	1.03
12	8.81	2.49	0.9136	0.2447	0.2298	0.0572	11.09
13	4.90	4.07	0.9885	0.0950	0.2469	0.0256	1.43
14	8.21	4.61	0.9719	0.1575	0.2725	0.1263	3.08
15	8.78	6.56	0.9840	0.1193	0.2587	0.0648	1.76
16	10.1	3.17	0.9280	0.2249	0.2327	0.0540	9.31
17	13.5	5.26	0.9642	0.1396	0.2392	0.0421	6.16
18	15.2	9.12	0.9776	0.1344	0.2442	0.0350	2.71
19	3.69	3.85	0.9918	0.0853	0.2557	0.0595	0.91
20	1.43	1.58	0.9932	0.0750	0.2531	0.0346	0.81
21	4.31	1.43	0.9398	0.1997	0.2354	0.0485	8.34
22	22.8	9.10	0.9661	0.1355	0.2395	0.0422	5.88
23	8.99	7.91	0.9885	0.1014	0.2581	0.0716	1.28
24	4.15	3.65	0.9884	0.1016	0.2552	0.0457	1.28
25	9.44	7.73	0.9881	0.0976	0.2555	0.0451	1.47
26	15.8	8.64	0.9774	0.1233	0.2439	0.0334	3.25
27	7.06	6.51	0.9895	0.0971	0.2556	0.0519	1.16
28	13.8	4.83	0.9493	0.1770	0.2362	0.0483	7.59