UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE

"IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE PROPENSIÓN DE HOLLÍN EN LLAMAS LAMINARES UTILIZANDO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES"

MAURICIO ALEXANDER ARAVENA CIFUENTES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO.

PROFESOR GUIA: DR. GONZALO CARVAJAL

PROFESOR CORREFERENTE: DR. JUAN JOSÉ CRUZ

Abril 2023

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

A mi madre, a Catalina, a Maxi, a mis amigos.

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Identificación del Estado de Propensión de Hollín en Llamas Laminares Utilizando Procesamiento de Imágenes

MAURICIO ALEXANDER ARAVENA CIFUENTES

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, mención Computadores, submención Telecomunicaciones.

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: Dr. Gonzalo Carvajal

Profesor Correferente: Dr. Juan José Cruz

Abril 2023

Resumen

El estándar ASTM-D1322 define una prueba manual para la caracterización de *smoke-point* en combustibles. Está técnica presenta problemas conocidos relacionados a la subjetividad intrínseca del operador. El presente trabajo analiza una técnica del estado del arte que busca eliminar esta subjetividad utilizando procesamiento de imágenes para analizar la relación entre regiones geométricas de la flama. Previo a la liberación de hollín estas regiones presentan una relación lineal, la cual puede ser utilizada para identificar cuando el comportamiento se aleja de esta recta al ocurrir el *smoke-point*, permitiendo así caracterizar la propensión del combustible de forma automática sin la intervención del operador. Como resultado de este análisis se genera un software que implementa el algoritmo descrito y se realiza una comparación entre las técnicas estándar y la propuesta sobre un diseño experimental basado en la lámpara estandarizada, para comprobar la factibilidad de su uso en tareas de caracterización de combustibles.

Palabras Clave: *smoke-point*, visión-por-computador, hollín, astm-d1322, propensión

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Identification of the Soot Propensity State in Laminar Flames Using Image Processing

MAURICIO ALEXANDER ARAVENA CIFUENTES

Thesis for the fulfillment of the B.S. in Electronic Engineering, major in Computer Electronics, minor in Telecomunications (6 year program).

Universidad Técnica Federico Santa María

Advisor: Dr. Gonzalo Carvajal

Co-Advisor: Dr. Juan José Cruz

April 2023

Abstract

ASTM-D1322 defines a manual test for the characterization of *smoke-point* in fuels. This technique presents known problems related to the intrinsic subjectivity of the operator. This paper discusses a state-of-the-art technique that seeks to eliminate this subjectivity by using image processing to analyze the relationship between geometric regions of the flame. Prior to soot release these regions present a linear relationship, which can be used to identify when the behavior deviates from this straight line at the soot release point, thus allowing to characterize the propensity of the fuel automatically without operator intervention. As a result of this analysis, software is generated that implements the described algorithm and a comparison is made between standard techniques and the proposed one on a standardized lamp-based experimental design, to check the feasibility of its use in fuel characterization tasks.

Keywords: smoke-point, computer-vision, soot, astm-d1322, propensity

Glosario

acino pulmonar Es la última porción de parénquima distal al bronquíolo terminal y por lo tanto está formada por bronquíolos respiratorios, conductos alveolares, sacos alveolares y por alvéolos. Mide aproximadamente 7.5 a 8.5 mm [1]. 11

diámetro aerodinámico El diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm^3 que tiene las mismas propiedades inerciales que la partícula de interés [2]. 10, 11

PM10 Partículas *gruesas* con un diámetro aerodinámico comprendido entre 10 μm a 2.5 μm. 10–12

PM2.5 Partículas *finas* con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm. 11, 12

repetibilidad Corresponde a la diferencia entre resultados obtenidos de manera exitosa mediante la prueba, por un mismo operador en condiciones de operación constante, utilizando material de prueba idéntico, en operación normal y correcta del método, a la largara excederá el valor definido en la Ecuación 2.5, en uno de veinte casos. viii, 1, 5–7, 9, 18, 20, 45, 51, 59, 60, 62, 64, 86, 87, 111, 114

reproducibilidad Corresponde a la diferencia entre dos resultados individuales e independientes obtenidos por diferentes operadores, trabajando en laboratorios diferentes utilizando equipo de medición nominalmente idéntico, en operación normal y correcta del método, a la larga excederá el valor definido en la Ecuación 2.6, en uno de veinte casos. viii, 1, 4, 7, 9, 18, 20, 111, 114

smoke point El punto crítico en la ingesta de combustible, donde una llama comienza a liberar hollín [3]. vi, x–xii, 1, 5, 6, 9, 10, 14, 15, 17, 19–24, 29, 30, 34, 35, 38, 39, 51, 52, 59, 64, 66, 68, 69, 71, 74, 77, 79, 81, 83, 85–87, 96, 97, 100–104, 112, 114

Acrónimos

EC^2G Energy Convertion & Combustion Group. 1, 5–7, 9, 23

checkerboard patrón de tablero. 47, 90

CNN Convolutional Neural Networks. viii, 22, 107, 108

DALYs Disability Adjusted Life Years. 11

EVM Eulerian Video Magnification. xii, 22, 101–105, 107

flame contour contorno de la flama. x, xi, 6, 32–34, 39, 52–54, 56, 58, 61, 71, 75, 87

flame core núcleo de la flama. x, xi, 6, 28, 32, 33, 39, 52–54, 56, 58, 61, 71, 75, 87

flame height altura de la flama. ix, 29, 33, 34

flame tip punta de la flama. 28, 29, 34

flame tip height altura de la punta de la flama. 33, 53

fps frames per second. 96

FURTI Fuel Uptake Rate measurement with Threshold Imaging. xii, 21, 95, 97, 99

LOSA Light of Sight Attenuation. 103

PCA Principal Component Analysis. 105

PM Particulate Matter. 2, 9–12

SPH Smoke Point Height. viii–x, 1, 3–10, 13, 14, 16, 18–23, 29–31, 34, 35, 39, 43, 44, 50, 51, 59–62, 64, 67, 69, 72, 75, 77, 79, 81, 83, 86, 87, 114

SVM Support Vector Machine. xii, 22, 104–108, 114

tip ratio razón de la punta. ix, 29

TSP Total Suspended Particules. 10

WHO World Health Organization. 2, 9, 11, 12

Índice de contenidos

1. Introducción **1**

1.1. Motivación y contexto 2

1.2. Definición del problema 5

1.3. Alcances y Contribuciones 7

2. Antecedentes **9**

2.1. El hollín como contaminante 10

2.2. Procedimiento estándar ASTM-D1322 13

2.2.1. Efectos de la subjetividad en la determinación del *smoke point* 19

2.3. Estado del arte 21

2.3.1. Vision Based Algorithm for Automated Determination of Smoke Point Height in Diesel Blends [4] 24

2.3.2. A novel device for automated determination of the smoke point with non invasive adaptation of ASTM D1322 normalized lamps [5] 31

3. Implementación de la propuesta **37**

3.1. Implementación de la alternativa seleccionada 37

3.2. Diseño experimental 41

3.2.1. Elección cámara 45

3.2.2. Conversión Píxeles a Milímetros 47

3.2.3. Mezclas de Combustible a Evaluar 50

3.2.4. Procedimiento experimental 50

3.2.5. Calibración Algoritmo 52

4. Resultados **59**

4.1. Prueba ASTM-D1322 59

4.2. Algoritmo replicado [5] 61

4.2.1. Mezcla 1, Ronda A, Trial I 64

4.2.2. Mezcla 1, Ronda A, Trial II 66

4.2.3. Mezcla 1, Ronda A, Trial III 69

4.2.4. Mezcla 1, Ronda B, Trial I 71
4.2.5. Mezcla 1, Ronda B, Trial II 75
4.2.6. Mezcla 1, Ronda B, Trial III 77
4.2.7. Mezcla 2, Ronda A, Trial I 79
4.2.8. Mezcla 2, Ronda A, Trial II 81
4.2.9. Mezcla 2, Ronda A, Trial III 83

5. Conclusiones y Trabajo Futuro **86**

Referencias **91**

6. Anexos **94**

6.1. Diagrama de la lámpara estandarizada 94
6.2. Técnicas del estado del arte analizadas 95
6.2.1. An improved methodology for dermining the threshold sooting indices from smoke point lamps [6]. 95
6.2.2. Advanced Methodology for the Detection of Smoke Point Height in Hydrocarbon Flames [7]. 97
6.2.3. Soot Propensity Detection by Eulerian Video Magnificaction [8]. 100
6.2.4. Soot propensity by image magnification and artificial intelligence [9] . . 104
6.2.5. Automatic Classification of Soot Propensity in Flames Using Image Processing and Machine Learning [3]. 106
6.3. Análisis comparativo técnicas evaluadas 109
6.3.1. Características de Comparación Alternativas Evaluadas 109
6.3.2. Evaluación alternativas 113
6.3.3. Selección 114

Índice de tablas

2.1. Valores típicos de precisión para la prueba manual según estándar [10]. 19
2.2. Valores de *repetibilidad* y *reproducibilidad* para tolueno [6]. 20
2.3. Pesos para el promedio móvil de la Ecuación (2.10) 30
3.4. Parámetros para la configuración de la cámara `Basler`. 46
3.5. Resultados para el análisis de ancho y largo de los recuadros del patrón de calibración 49
3.6. Mezclas de combustible a utilizar para los procedimientos sobre la lámpara estandarizada. 50
3.7. Umbrales obtenidos a partir de calibración para Mezcla #1, Ronda A. 56
3.8. Resumen de los cambios realizados sobre el algoritmo. 58
4.9. Resultados de *Smoke Point Height (SPH)* mediante prueba estandarizada, registrador por operador. 60
4.10. Resumen de las imágenes obtenidas para cada mezcla de prueba 61
4.11. Umbrales determinados para cada ronda de los combustibles probados. 61
4.12. Resumen de los resultados obtenidos por el algoritmo. 62
4.13. Diferencia absoluta entre pares de valores para las rondas evaluadas correspondientes a la mezcla #1. 63
4.14. Diferencia absoluta entre pares de valores para las rondas evaluadas correspondientes a la mezcla #2. 63
6.15. Arquitectura de las capas finales para las redes pre-entrenadas. 107
6.16. Arquitectura de la red *Convolutional Neural Networks (CNN)*: MiniNet-SP . . 108
6.17. Asignación de puntajes para el sub-criterio: Intervención de la lámpara. 110
6.18. Asignación de puntajes para el sub-criterio: Complejidad inherente de la propuesta. 111
6.19. Asignación de puntajes para el sub-criterio: Automatización de la prueba. . . . 112
6.20. Comparación de alternativas. 113
6.21. Propuestas destacables de cada trabajo. 114

Índice de figuras

1.1. Diagrama de la lámpara estandarizada definida para la prueba manual del estándar ASTM-D1322. 3
2.2. Lámpara estándar de medición de *SPH*. 13
2.3. Interior de la galería de la lámpara estandarizada. 14
2.4. Ejemplo de apariencia típica de una flama en cada una de las etapas de progresión definidas en el estándar ASTM-D1322 [10]. 15
2.5. Etapas de progresión para la flama durante prueba de *SPH*, según el estándar ASTM-D1322 [6]. 16
2.6. Ejemplo de la forma de medir la altura de la flama, según el estándar para evitar errores inducidos por paralelismo. La flama se refleja en una lámina de vidrio que recubre la escala de medición al interior de la galería de la lámpara . 17
2.7. Diseño experimental propuesto. Corresponde a una versión adaptada, sin modificaciones sobre la lámpara estandarizada. 24
2.8. Mecanismo para el control de la mecha de la lámpara mediante un servomotor. 25
2.9. Procesamiento realizado sobre cada *frame* previo a análisis. 26
2.10. Análisis de intensidad lumínica de diversas regiones de la flama durante la progresión realizada durante una prueba [4]. 27
2.11. Regiones definidas para la caracterización de la flama [4]. 28
2.12. Relación entre el *razón de la punta (tip ratio)* y la *altura de la flama (flame height)*, durante la progresión de la flama. El cambio de linealidad ocurre en el *SPH*. 29
2.13. Propuesta de instrumentalización para la determinación automática del *SPH*[5] 31
2.14. Regiones definidas para la flama [5]. 33
2.15. Validación de *frames* a partir de la diferencia horizontal de los centroides. . . . 33
2.16. Análisis de la información geométrica obtenida a partir de los *frames* de la progresión. 34
2.17. Diagrama de flujo que representa la metodología propuesta. 36
3.18. Lámpara estandarizada `SYA-382` utilizada para las mediciones. 42

3.19. Vista lateral de la propuesta para la medición del *SPH* mediante la metodología de [5]. Se demarca en rojo la alineación vertical entre la cámara y la lámpara. . 43
3.20. Vista aérea de la propuesta para la medición del *SPH* mediante la metodología de [5]. Se demarca en rojo la alineación horizontal entre la cámara y la lámpara. 44
3.21. Vista lateral de la posición relativa de la cámara al quemador interno de la lámpara. 45
3.22. Patrón diseñado para la obtención de la relación píxel a milímetros. 47
3.23. Ubicación del patrón al interior de la galería de la lámpara. En la vista frontal, un punto rojo es posicionado en la grilla que corresponde al centro de la cámara. En la vista lateral, una línea roja representa el eje vertical de alineación entre el patrón y el centro de la cámara. 48
3.24. Captura del patrón observado mediante la cámara 48
3.25. Resultados de análisis de recuadros del patrón utilizado. El ancho de cada cuadro se denota con rojo y el alto con azul. 49
3.26. Ejemplo del procesamiento de un *frame* analizado correspondiente a la mezcla #1. 52
3.27. Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* I, Ronda A, de la Mezcla #1. 54
3.28. Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* II, Ronda A, de la Mezcla #1. 55
3.29. Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* III, Ronda A, de la Mezcla #1. 55
3.30. Ejemplo del procesamiento con umbrales *núcleo de la flama (flame core)* = 3 y *contorno de la flama (flame contour)*=2 para un *frame* analizado correspondiente a la Ronda A, del *trial* I, para la Mezcla #1. 56
3.31. Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* I. 57
3.32. Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* II. 57
3.33. Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* III. 58
4.34. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 65
4.35. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 65
4.36. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 66
4.37. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 67

4.38. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 68
4.39. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 68
4.40. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 70
4.41. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 70
4.42. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 71
4.43. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 72
4.44. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 73
4.45. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 74
4.46. Análisis de la progresión para la mezcla #1, ronda B, *trial* I, utilizando valores umbral ajustados para la evolución rápida de la llama. *flame contour* = 2.5 %. *flame core*= 3 %. 75
4.47. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 76
4.48. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 76
4.49. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 77
4.50. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 78
4.51. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 78
4.52. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 79
4.53. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 80
4.54. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 80
4.55. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 81
4.56. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 82
4.57. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 82
4.58. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 83
4.59. Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H). 84
4.60. Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$. 84
4.61. Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*. 85
6.62. Diagrama de la lámpara estandarizada encontrada en el estándar ASTM-D1322 [10]. 94
6.63. Morfología de la flama en distintas alturas v/s tasa de consumo de combustible [6]. 95
6.64. Aparato para la determinación de la altura de la flama, como función de la tasa de consumo de combustible en una lámpara estandarizada [6]. 96

6.65. Análisis de imagen del método *Fuel Uptake Rate measurement with Threshold Imaging (FURTI)*, para dos llamas de isooctano [6]. **Izquierda:** Altura de llama de 41 *mm*. **Derecha:** Altura de llama de 60 *mm*. 97
6.66. Influencia de la elección del umbral en la morfología de una flama de isooctano [7]. En la parte superior se indica el umbral aplicado para cada caso. 98
6.67. Influencia de la elección de umbral en la altura de la flama [7]. De izquierda a derecha los umbrales aplicados son: 10, 15, 50 y 150. 98
6.68. Análisis de la intensidad de gradiente en el eje de simetría de una flama de isooctano [7]. 99
6.69. Gradiente de la imagen de la flama (a) e imagen original (b). El contorno estimado por el procesamiento se indica en una línea blanca por sobre la flama. [7] 100
6.70. "Alas" de la flama en el *smoke point*, para una llama de isooctano [6]. 101
6.71. Ejemplo de magnificación mediante *Eulerian Video Magnification (EVM)*. (a) Secuencia del vídeo original. (b) Secuencia amplificada por *EVM*. 102
6.72. Diseño Experimental [8]. 102
6.73. Diagrama de flujo para la propuesta. 103
6.74. Visualización de un clasificador *Support Vector Machine (SVM)* [11]. Se tiene un dominio con tres clases etiquetadas, a partir de procesos de optimización se ajusta el modelo para encontrar el hiperplano que permita separar las clases, manteniendo la máxima distancia entre el hiperplano y cada clase. 105
6.75. Representación en espacio de características para los distintos datos de entrenamiento utilizados en la adaptación del modelo *SVM*. 106

1. Introducción

En el presente documento se realiza el análisis, replicación y evaluación de una técnica del estado del arte basada en procesamiento de imágenes para determinar la altura a la que ocurre la liberación de hollín en una flama analizada utilizando una lámpara estandarizada definida en el estándar ASTM-D1322[10].

La metodología en la que se basa este trabajo, descrita en [5], propone utilizar un análisis geométrico de la flama para poder caracterizar el punto donde ocurre la liberación de hollín en relación a la altura que alcanza la llama, formalmente denominado *Smoke Point Height (SPH)*. La propuesta busca poder establecer criterios que permitan al algoritmo determinar el *SPH* de forma automatizada, reemplazando la necesidad de mediciones basadas en observaciones de un operador, las cuales dada su naturaleza, incluyen un elemento de subjetividad. La apuesta de los autores busca mejorar los índices de *repetibilidad*, que corresponde a la variación aceptable entre resultados obtenidas por un mismo operador en condiciones idénticas de medición y *reproducibilidad*, que corresponde a la variación aceptable entre resultados obtenidos por diferentes operadores en condiciones idénticas de medición.

Esta técnica ha sido seleccionada para su evaluación luego de un análisis comparativo frente a otras técnicas del estado del arte realizado en el contexto de la asignatura Proyecto de Titulación previo a esta memoria de título. El trabajo acá reportado se enmarca en un proyecto multidisciplinario entre el Departamento de Electrónica y el Departamento de Industrias de la UTFSM, y se centra en el desarrollo de herramientas computacionales que permitan la replicación de esta técnica, apuntando a evaluar su factibilidad de implementación en un entorno de medición basado en el diseño experimental estandarizado requerido por el laboratorio de investigación *Energy Convertion & Combustion Group (EC^2G)*. Con esto, se busca verificar la validez de la metodología, además de establecer los cambios o modificaciones necesarias para garantizar la funcionalidad del método en el diseño experimental propuesto en el presente trabajo.

Este capítulo presenta la motivación y contexto del trabajo, realiza una breve descripción de la forma en que el estándar ASTM-D1322 define el proceso de medición del *smoke point*, identificando los problemas asociados a la prueba e introduce la metodología que se analizará

y como esta intenta solventar algunos de los problemas encontrados en el estándar. En este capítulo también se expondrá los alcances y aportes de este trabajo sobre la problemática.

1.1. Motivación y contexto

Los procesos de combustión son una pieza clave para la forma en que nuestra sociedad funciona, cubriendo un gran rango de procesos industriales que dependen de los combustibles fósiles para funcionar. En Chile, este tipo de procesos se pueden encontrar masivamente en las industrias asociadas a la minería, procesado de metales, producción de papel y producción de energía, entre otras. Un subproducto no deseado de los procesos de combustión es la liberación de hollín, correspondientes a partículas de carbón impuro[1] resultado de la combustión incompleta de un hidrocarburo [12].

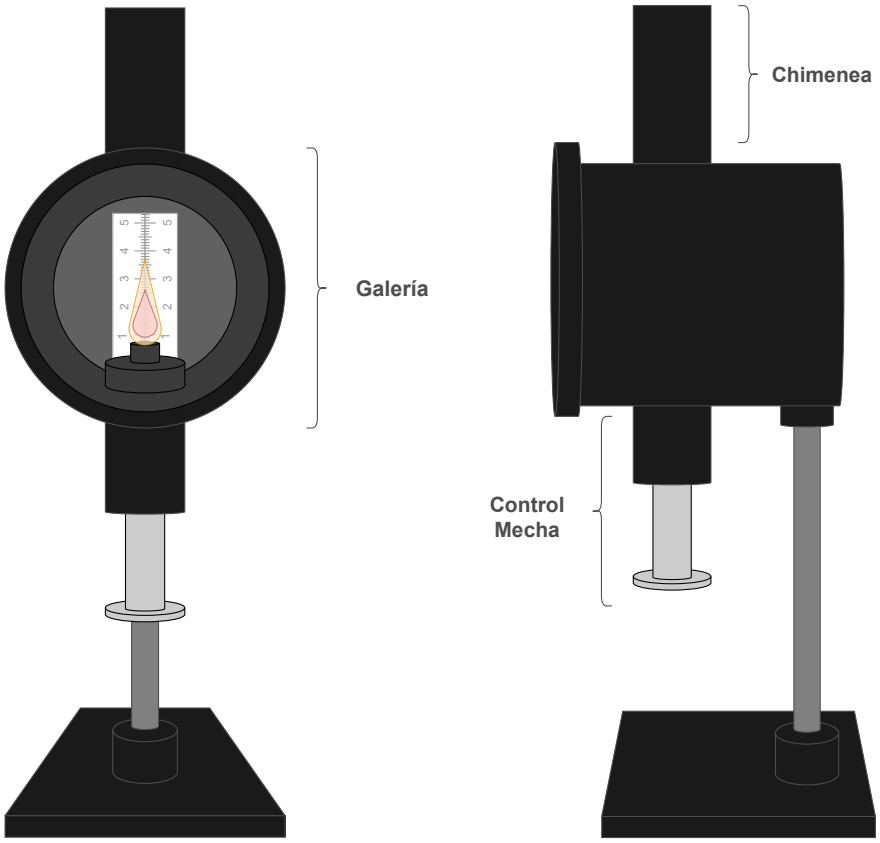
El hollín pertenece a un grupo de contaminantes denominado *Particulate Matter (PM)* que está comprendido por la mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en el aire. La liberación de hollín al ambiente tiene consecuencias acumulativas en el ámbito del cambio climático, estando asociada a la exacerbación del efecto invernadero. El hollín contribuye significativamente al aumento de temperatura de la atmósfera, siendo secundado únicamente por el dióxido de carbono [13]. A su vez, la presencia de partículas de hollín en el ambiente tiene efectos de corto plazo sobre la salud de las personas, ya que dado su pequeño tamaño, siete veces menor al diámetro de un cabello humano, puede ingresar al cuerpo por las vías respiratorias donde puede alojarse y/o ser transportadas por el torrente sanguíneo hacia otras partes del cuerpo [14]. Según la *World Health Organization (WHO)*, la exposición crónica a este tipo de contaminante contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como también cáncer de pulmón [15].

Los efectos nocivos de las partículas de hollín suspendidas en la atmósfera han motivado el aumento de la rigurosidad de normativas ambientales, generando incentivos para la reducción de las emisiones de hollín asociadas a los procesos industriales dependientes de combustibles fósiles. Una forma de reducir estas emisiones es utilizar combustibles que tengan intrínsecamente una baja propensión a liberar hollín. Para cada combustible se puede obtener una métrica

[1] Carbón asociado a otras partículas y átomos distintos al carbono.

denominada *sooting tendency*, que corresponde a un parámetro cuantitativo que describe la propensión relativa con la que un hidrocarburo produce hollín [16].

Una forma de determinar la propensión de un combustible a liberar hollín se define en el estándar ASTM-D1322 [10]. Este estándar especifica dos pruebas, una manual y una automática, que permiten obtener la altura crítica a la que ocurre la liberación de partículas de carbón (SPH), dentro de una lámpara estandarizada de medición.



(a) Vista Frontal. **(b)** Vista Lateral.

Figura 1.1: Diagrama de la lámpara estandarizada definida para la prueba manual del estándar ASTM-D1322.

El método manual del estándar indica que para realizar la caracterización de un combustible se debe utilizar una lámpara estandarizada como la que se observa en la Figura 1.1. Esta lámpara es alimentada por una mecha en la que se impregna el combustible a evaluar. Un operador realiza ajustes en el mecanismo de control de la mecha, alterando la altura de la flama de forma que pase por etapas definidas por el estándar de acuerdo a la forma de la

punta de la llama, hasta que el operador puede confirmar visualmente la aparición de hollín por la chimenea del aparato. A este proceso de control de la altura de la flama se le denomina "progresar la flama/llama". Utilizando una graduación provista en la galería de la lámpara, el operador verifica la altura de la flama y registra la altura a la que ocurre esta liberación de hollín y la prueba es repetida dos veces más, evaluando que los resultado no presenten una variación por sobre un rango aceptable definido de un milímetro (la prueba y los pasos a realizar son definidos y analizados en más detalle en el Capítulo 2.2).

La prueba manual estandarizada tiene problemas conocidos, siendo uno de los principales la existencia de un nivel de subjetividad intrínseco al hecho de que se determine la altura de flama de manera visual y se registra acorde a lo observado por el operador en la escala de medición. Más aún, dos operadores pueden tener percepciones distintas que pueden llevar a resultados que presenten una diferencia que comprometa la *reproducibilidad* de la prueba. El estándar intenta compensar los efectos de la subjetividad en las observaciones, estableciendo límites máximos de variación aceptable entre mediciones realizadas tanto por un mismo observador como por otros operadores, sin embargo, esto conlleva a una clasificación incorrecta o al menos laxa de la tendencia a liberar hollín del combustible probado (un ejemplo para este error de clasificación es analizado en el Capítulo 2.2.1).

Una versión automatizada de la prueba se introdujo al estándar en la revisión de 2012 [10]. En esta prueba se utiliza una lámpara estandarizada modificada que permite realizar el análisis visual y progresión de forma automática, de esta forma removiendo al operador de la prueba. Si bien esta es una opción viable entregada por el estándar para intentar solventar el principal problema encontrado para el método manual, su alto costo comparado con la lámpara estandarizada y la falta de literatura asociada a las mezclas de calibración utilizadas [5], hacen que su adopción no se haya generalizado y la prueba manual siga prefiriéndose en tareas de investigación, manteniéndose el desarrollo de instrumental para automatizar la prueba como una línea de investigación abierta.

En el presente trabajo se realizó el análisis y evaluación de una de la propuestas de instrumentalización, definida en [5], la cual mediante un análisis geométrico realizado sobre imágenes obtenidas de la progresión de la flama permite obtener una caracterización del *SPH* desde el método manual. Los autores además realizan una propuesta de encapsulación de la técnica,

utilizando como base la lámpara estandarizada y componentes de fácil fabricación y/o bajo costo de adquisición, de modo de desarrollar un instrumental de costo accesible (estimándose el valor en aproximadamente 550 USD). Si bien los resultados presentados en el artículo son promisorios, no existen reportes sobre una verificación independiente acerca de las propuestas de los autores.

El desarrollo de esta memoria de título busca entregar aportes en pos de sentar las bases para la futura definición de un instrumental que pueda apoyar en las tareas de caracterización de propensión de liberación de hollín requeridas por el EC^2G. Para esto, se evaluaron los aportes realizados por [5], en el ámbito de la precisión y *repetibilidad* de los resultados de *SPH* obtenidos mediante la lámpara estandarizada, en comparación con resultados obtenidos mediante la prueba estandarizada manual.

1.2. Definición del problema

Se establece como problemática del presente trabajo de título, la evaluación de una técnica del estado del arte [5] como una forma para caracterizar el *smoke point* de un combustible durante su progresión en un ambiente de medición basado en la lámpara estandarizada. Se busca evaluar como la propuesta de los autores permitiría disminuir la subjetividad asociada a las mediciones de *SPH* en contraste con la metodología manual definida en el estándar y como esto se traduce, de acuerdo a los autores, en una reducción de la variabilidad de las mediciones de *SPH* obtenidas y en consecuencia, un aumento *repetibilidad* de la prueba propuesta en el trabajo escogido.

La reducción de la subjetividad de las mediciones tiene como objetivo, poder caracterizar de forma más acotada la altura a la que se desarrolla el *smoke point* de un combustible, en contraste con los mecanismos actualmente encontrados en el estándar para estos mismos efectos. De esta forma la evaluación del trabajo escogido se realiza de manera comparativa frente a la prueba manual definida en el estándar.

Se espera que a partir de los resultados de esta evaluación se pueda establecer una base de conocimiento acerca de la técnica [5], que contenga las valoraciones, apreciaciones, dificultades y discrepancias, encontradas durante el análisis realizado. En esta misma línea, se espera

que los resultados obtenidos, asociados a la adopción de las propuestas encontradas en la metodología escogida [5] permitan aportar hacia una posible implementación de la técnica en un instrumental que permita apoyar en las tareas de medición y caracterización de *smoke point* realizadas por el laboratorio EC^2G.

De esta forma se pueden definir los siguientes objetivos para el trabajo:

Replicación del algoritmo: La funcionalidad de la propuesta de los autores será replicada mediante una implementación en `Python`, utilizando la biblioteca de procesamiento de imágenes `OpenCV`.

Verificación directa de la funcionalidad: Se verificará el funcionamiento del algoritmo replicado, utilizando los valores de umbral definidos por los autores (utilizados para la definición de las regiones *núcleo de la flama (flame core)* y *contorno de la flama (flame contour)*, como también para determinar la zona lineal en el análisis de alturas), para el diseño experimental propuesto en el Capítulo 3.2. Se evaluará los resultados obtenidos a partir de estas pruebas preliminares y se determinará si es necesario ajustar alguno de los parámetros definidos por los autores para el correcto funcionamiento del algoritmo en este entorno de prueba. En el caso de requerir ajustes a los valores umbral, se definirán rutinas de calibración que permitan replicar los valores hallados.

Evaluación de la propuesta de medición: Se realizará una evaluación comparativa de los resultados obtenidos mediante la prueba manual definida en el estándar [10] y los resultados obtenidos mediante el algoritmo replicado [5], para la caracterización del *smoke point* de combustibles. La prueba será realizada en una variación del entorno experimental definido por los autores considerando los recursos y requisitos del laboratorio EC^2G. Mezclas de combustibles cuyo *SPH* se encuentra indicado en la literatura son evaluadas para ambos procedimientos. Para cada uno de los resultados, se computará el error porcentual en relación al valor nominal, la variabilidad entre resultados y en los casos posibles, se obtendrá la *repetibilidad* de las mediciones para su comparación.

1.3. Alcances y Contribuciones

Se limitan los alcances del presente trabajo bajo las siguientes condiciones:

- Para el análisis de propuestas de instrumentalización se analizaron únicamente trabajos que construyeran sobre la lámpara estandarizada o cuya metodología pudiese ser adaptada para ser utilizada en esta, como es el caso de los trabajos [8] y [9]. Esta decisión se sustenta en los recursos disponibles en el laboratorio EC^2G, el cual cuenta con una lámpara estandarizada para la realización de mediciones de SPH. Por otro lado el uso de un instrumento estandarizado permite disminuir los factores asociados al diseño experimental que puedan afectar los resultados o introducir nuevas fuentes de error. La simpleza de la prueba manual definida en el estándar, junto con la abundancia de literatura relacionada, principalmente valores de SPH previamente tabulados, hace que la lámpara sea ideal para obtener un punto de comparación entre los resultados obtenidos mediante el algoritmo propuesto y los valores normalizados.

- Las mezclas de combustibles evaluados corresponden a un subconjunto de mezclas de calibración de la lampara estandarizada, basadas en tolueno e isooctano. Se toma esta decisión dada la cantidad de literatura y registros, como el propio estándar, para los valores nominales de SPH asociados a las mezclas, De esta forma se puede sentar un *groundtruth* que sea fácilmente obtenible y verificable. Esto restringe la generalización de resultados a mezclas que no hayan sido evaluadas.

- Durante la campaña de medición existían restricciones a nivel recursos disponibles en el laboratorio EC^2G (mechas) para la utilización de la lámpara estandarizada, esto limitó severamente el número de pruebas a realizar y la cantidad de mezclas que se evaluaron. De esta forma los resultados obtenidos deben ser considerados como una guía más que una conclusión final y cabal.

- La evaluación realizada solo permite evaluar los efectos sobre la métrica de *repetibilidad*. Para poder evaluar la *reproducibilidad* una campaña de medición con diversos laboratorios, utilizando una lámpara estandarizada y una copia del algoritmo debiese ser establecida, a modo de poder comparar resultados entre distintos operadores en distintos laboratorios.

- La mecanización de la lámpara estandarizada propuesta en [5] se ha omitido, en pos de poder realizar una evaluación paralela del algoritmo replicado y la prueba manual definida en el estándar [10]. Esta decisión se justicia debido a que el estándar define que el operador sea quién realice el control de la mecha para la progresión de la flama.

A partir de los resultados obtenidos se puede reconocer las siguientes contribuciones:

- Replicación en `Python` del algoritmo propuesto en [5]. Los resultados de esta replicación, junto con documentación asociada a su uso e implementación se alojan en un repositorio `Github` [17].
- Una evaluación a pequeña escala del algoritmo propuesto en [5] para la determinación del *SPH* mediante una lámpara estandarizada en contraste con la metodología manual definida en el estándar.
- Identificación y registro de posibles problemas asociados a la funcionalidad de la implementación del algoritmo en las condiciones definidas para este trabajo.
- Se establece una rutina de calibración para los umbrales de las regiones geométricas a analizar, la cual puede ser generalizable a distintas cámaras. La implementación de esta rutina se realiza en lenguaje `Python` y se aloja junto al algoritmo replicado en un repositorio en `Github` [17].
- Se establece una rutina de calibración para la conversión de píxeles a milímetros la cual permite generalizar esta operación a distintas cámaras utilizadas.

2. Antecedentes

En este capítulo se realiza una contextualización de la problemática sobre la que se trabaja. En primer lugar, se analiza el rol del hollín como integrante de los contaminantes categorizados como material particulado (PM). Se establece las características asociadas a este tipo de contaminante y se realiza un recuento de los efectos sobre la salud asociados a la exposición frente a este contaminante. Se analizan métricas entregadas por la *WHO* acerca de los efectos sobre la mortalidad y morbilidad en la población y cómo nueva evidencia acerca de los efectos de la exposición de PM ha provocado una evolución de las recomendaciones realizadas por esta organización en torno a los niveles considerados seguros. Estos cambios en las directrices entregadas por la *WHO* se traducen en un aumento de las regulaciones, que motivan una caracterización más rigurosa de la tendencia a liberar hollín de los combustibles.

Posteriormente, se presenta el procedimiento estandarizado para la evaluación de *smoke point* [10]. Se entrega un resumen de la metodología de prueba realizada por el operador, que comprende la forma de obtener las mediciones de SPH y las tolerancias asociadas a la variabilidad de estas mediciones, el cálculo del valor de *smoke point* obtenido, la forma de calcular los valores de diferencia entre mediciones para *repetibilidad* de la prueba, y la forma de calcular los valores de diferencia entre mediciones para la *reproducibilidad*. Al finalizar el recuento del procedimiento definido en el estándar, se analiza un ejemplo que evidencia como los mecanismos que buscan reducir los efectos de la subjetividad de las mediciones inherentes al operador, tienen un efecto en el valor estimado para el SPH mediante la metodología, lo que conlleva a una caracterización incorrecta o laxa de la propensión a liberar hollín del combustible analizado.

Finalmente, se hace un resumen de las técnicas para la caracterización de SPH encontradas en el estado de arte, explicando brevemente la base de la metodología propuesta. Junto con este resumen, se va analizando las desventajas de adoptar estas metodologías como una posible solución al problema propuesto de disminuir la subjetividad de las mediciones realizadas en la lámpara estandarizada en términos de la variabilidad de los valores SPH obtenidos y su *repetibilidad*, esto en pos de establecer una base sobre la cual se podría derivar a la implementación de un instrumento de medición que apoye en las tareas de caracterización de *smoke point* de combustible en el laboratorio EC^2G. Este análisis deriva en la elección de dos

técnicas no invasivas para la caracterización del *SPH* mediante la lámpara estandarizada, [4] y [5]. Estas técnicas proponen la utilización de criterios geométricos y morfológicos de la flama, durante su progresión en la lampara, que permiten determinar la ocurrencia del *SPH*. Hacia el final del capítulo se realiza un análisis mas detallado de ambas técnicas. La técnica descrita en [5] construye directamente sobre los planteamientos de [4], por lo que se utiliza como un antecedente para la metodología descrita en [5]. Se escoge la propuesta definida en [5] para su análisis y evaluación frente a la problemática planteada, dadas sus características, como el uso de la lámpara estandarizada como base para su diseño experimental, el carácter no invasivo de la forma de determinar el *smoke point* mediante análisis geométrico de un registro visual de la progresión de la flama, el cual permite prescindir de la necesidad de una estimación por parte del operador de la altura de la flama, junto con propuestas realizadas por los autores para la encapsulación de la metodología en un instrumental que permita realizar la prueba de forma automática.

2.1. El hollín como contaminante

Se define el *PM*[14] (grupo de contaminantes al que el hollín pertenece) como la mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en el aire. Estas pueden variar en número, tamaño, área, composición química, solubilidad y origen. La distribución del tamaño de las partículas presentes en el aire denominada *Total Suspended Particules (TSP)* es trimodal, es decir, incluye partículas gruesas, partículas finas y ultrafinas.

Para la clasificación de las partículas, filtros de distinto tamaño son utilizados en estaciones de monitorio de la calidad del aire, que permiten establecer rangos de pertenencia sobre el *diámetro aerodinámico* mediante el cual se puede encasillar a las partículas. De esta forma, las partículas gruesas se definen como concentraciones de partículas sobre un *diámetro aerodinámico* de 2.5 μm. El origen de estas partículas puede provenir de suspensión de partículas de polvo, suelo y caminos, resultados de actividades agrícolas, minería, tormentas de viento, volcanes entre otros. Dentro de esta clasificación se encuentran sales, polen, moho, esporas y otros derivados vegetales. En general cuando se habla de partículas gruesas, se trabaja bajo la convención de *PM10*, donde se define como partículas gruesas al rango de partículas que tienen un *diámetro aerodinámico* comprendido entre 10 μm y 2.5 μm. Esta distinción se realiza

debido a que desde la cota de los 10 μm las partículas tienen la capacidad de ingresar a la cavidad torácica mediante las vías respiratorias [18].

Las partículas finas, *PM2.5* comprenden a partículas de un *diámetro aerodinámico* inferior o igual a 2.5 μm. El origen de estas partículas se puede rastrear principalmente a emisiones asociadas a procesos de combustión, como el encontrado en vehículos de gasolina y diesel, uso de madera y carbón en procesos de generación de energía, procesos industriales como fundiciones, plantas de procesamiento de cemento, fabricación de papel y plantas metalúrgicas.

Las partículas ultrafinas corresponden a partículas con un *diámetro aerodinámico* inferior a 0.1 μm. Principalmente son encontradas en urbes e industrias, siendo derivadas de procesos de combustión, como los asociados a vehículos. Estas partículas tienen un *tiempo de vida* bastante corto, dado que tienden a crecer y aglutinarse para formar compuestos de mayor tamaño que terminan formando partículas finas.

Análisis realizados por la *WHO*, determinaron que en países en desarrollo al menos dos tercios del *PM* puede ser atribuible a actividades humanas, las principales fuentes siendo los procesos de combustión [18]. Mediciones realizadas en California (Estados Unidos), Sao Paulo (Brasil) y Dhaka (Bangladesh), determinaron que porcentualmente el hollín contribuye en mayor medida a la masa total de *PM* encontrado en los puntos de medición, entregando porcentajes de participación de la masa total de *PM* del 50 %-70 % [19], 41 %[20] y 50 %[21], respectivamente.

La exposición al *PM* tiene efectos nocivos sobre la salud de las personas. En el año 2000, un reporte de la *WHO*, estimó que anualmente se atribuían 0.8 millones de muertes y 7.9 millones de *Disability Adjusted Life Years (DALYs)* por contaminación urbana del aire[22]. En el año 2016, el número de muertes atribuidas a este tipo de polución ascendía a 13.7 millones y 602 millones de *DALYs* [23].

La forma de ingreso del *PM* es mediante las vías respiratorias, de aquí la utilidad de la definición *PM10*. Las partículas de este tamaño tienen la capacidad de ingresar al *acino pulmonar* [24], las partículas *PM2.5* pueden penetrar más profundo y las partículas ultrafinas podrían ser transportadas desde el acino hacia el torrente sanguíneo, hacia otras partes del cuerpo [14]. Según la *WHO*[15] la exposición crónica a este tipo de partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias y cardiovasculares, como también cáncer de pulmón.

El *PM* también puede exacerbar condiciones preexistentes, como condiciones cardíacas [25] o pulmonares, incluso afectando la forma en la que la sangre coagula en estas áreas, aumentando la susceptibilidad para enfermedades cardiacas [24].

La relación entre la presencia de *PM* y la morbilidad y mortalidad de la población, junto nueva evidencia que establecía que la exposición a este tipo de polución sigue una curva lineal, es decir que para cualquier nivel de exposición existe un riesgo asociado y que los niveles considerados *seguros* donde los efectos sobre la salud son mínimos, son muy cercanos a las concentraciones de fondo (*background concentrations)*, llevó en 2005 a la *WHO* a establecer nuevos estándares para la protección de las personas, admitiendo que dada la ausencia de umbrales seguros, estos estándares no llevan a una protección completa [18]. La *WHO* recomendaba a los países, incrementar de forma paulatina sus regulaciones sobre las concentraciones de *PM* y mediante el monitoreo y reducción de emisiones, tratar de disminuir [2] las concentraciones a un nivel que se definía, para una concentración *PM10* anual de 20 $\mu g/m^3$ y *PM2.5* de 10 $\mu g/m^3$, siendo esto los niveles mas bajos en donde la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón han mostrado un mostrado un incremento de 95 % de confianza en respuesta a partículas *PM2.5*. Nueva evidencia ha hecho que la *WHO* nuevamente replantee esto estándares, llegando a valores recomendados, en 2021, para concentraciones anuales de *PM10* de 15 $\mu g/m^3$ y *PM2.5* de 5 $\mu g/m^3$[26].

Según los datos de la *WHO*, en 2016 Chile presentaba concentraciones anuales de *PM2.5* de 23.92 $\mu g/m^3$[27]. Literatura acerca de los efectos de emisiones contaminantes sobre la morbilidad y mortalidad en el país [28], señalan principalmente a las grandes actividades industriales, asociadas a los procesos de minería, procesado de metales, producción de papel y energía, siendo esta última, dada su dependencia a los combustibles fósiles como petróleo y carbón, una de las principales responsables de la emanación de hollín. Se establecen métricas que indican que la presencia de este tipo de actividades industriales, aumentan la morbilidad y mortalidad del área de operación en un rango entre 10 % y 100 %.

[2] Se definen niveles de progreso, de forma de alcanzar paulatinamente estas métricas.

2.2. Procedimiento estándar ASTM-D1322

El estándar ASTM-D1322 [29], define una prueba experimental para caracterizar el *SPH* de queroseno y combustibles utilizados en aviación. Para ello se utiliza un lámpara de prueba estandarizada, como la que se puede observar en la Figura 2.2[3].

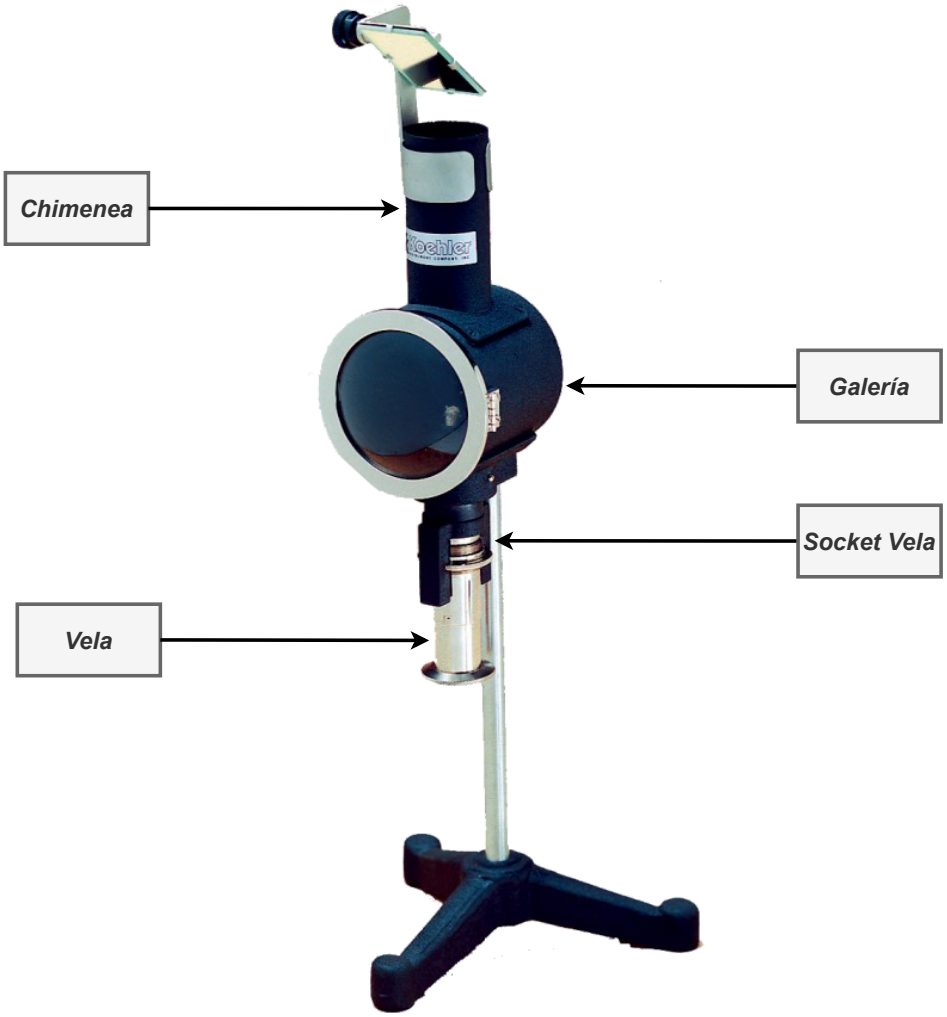


Figura 2.2: Lámpara estándar de medición de *SPH*.

El combustible de prueba debe ser cargado junto con la mecha, en la *vela*. En torno al *socket*

[3]Las Figuras 2.2 y 2.3 corresponde a una traducción del diagrama de la Figura 6.62 que corresponde al entregado por el estándar, este se encuentra en el Apéndice 6.1

de la vela, existe un mecanismo que permite controlar la cantidad de mecha y por ende cuanto combustible recibirá la llama. La combustión ocurre dentro de la galería de la lámpara. En el interior de la galería se encuentra una escala graduada en milímetros, en un intervalo de 0-50 *mm*, como se aprecia en la Figura 2.3, esta es usada para registrar la altura de la flama durante la prueba.

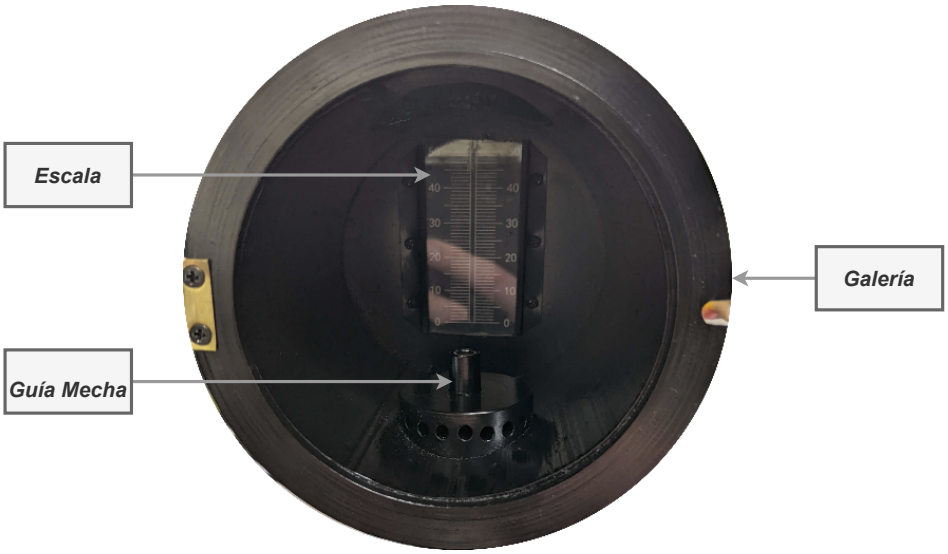


Figura 2.3: Interior de la galería de la lámpara estandarizada.

El procedimiento de prueba define las siguientes etapas[4]:

Preparación aparato: La lámpara debe ser posicionada de manera vertical, en una habitación sin corrientes de aire. En el caso de que la habitación no pueda cumplir este requisito, la lámpara debe ser colocada dentro de una caja de material resistente al calor, cuya cara frontal debe estar abierta y el lado superior debe dejar una distancia de 150 *mm* por sobre la chimenea. Se debe inspeccionar la lámpara para verificar que todas las entradas y salidas de aire no estén restringidas o sucias.

Calibración del aparato: La lámpara debe ser calibrada utilizando dos mezclas de combustibles de prueba, cuyo *SPH* se encuentra caracterizado por el estándar, para condiciones de presión de 101.3 *kPa*. En lo posible se deben escoger dos mezclas cuyo *smoke point*

[4]El estándar ASTM-D1322 [29] define también métodos de preparación para la mecha, esta etapa será omitida en la explicación y se consideraran como aplicada sin perjuicio de la explicación del procedimiento central.

acote por ambos lados al del combustible a probar. En el caso de no ser posible, se deben utilizar las mezclas que tengan el *smoke point* más cercano. A partir de la calibración se debe obtener el factor de corrección para el aparato, definido de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = \frac{(As/Ad) + (Bs/Bd)}{2} \tag{2.1}$$

Donde `As` y `Bs` corresponden al *smoke point* indicado por el estándar para la primera y segunda mezcla respectivamente. `Ad` y `Bd` corresponden al *smoke point* determinado experimentalmente para la primera mezcla y segunda mezcla, respectivamente.La calibración debe ser realizada cada vez que exista un cambio de operador o un cambio en el aparato. También debe ser realizada si se registra un cambio en la presión de más de 0.7 kPa.

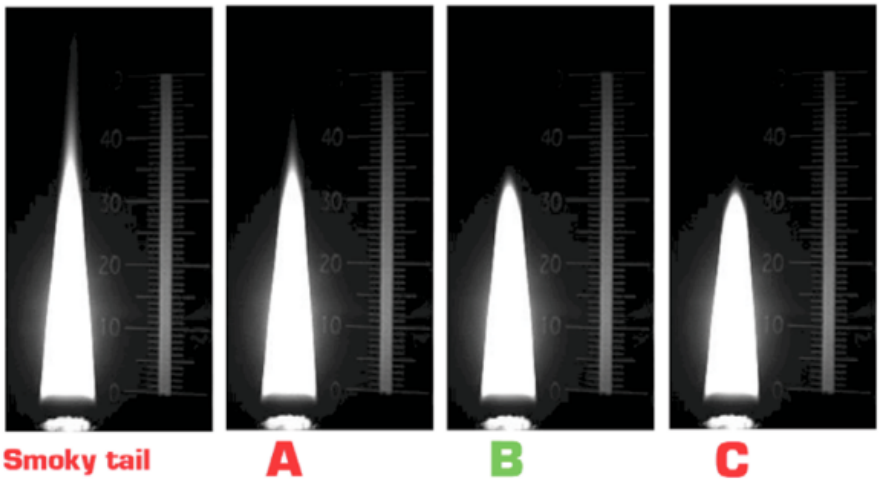


Figura 2.4: Ejemplo de apariencia típica de una flama en cada una de las etapas de progresión definidas en el estándar ASTM-D1322 [10].

Procedimiento de medición: El operador carga el combustible en la lámpara, enciende y ajusta la mecha, para que la llama resultante tenga una altura aproximada de 10 mm. Se mantiene esta etapa por un período de cinco minutos. Luego de este tiempo la flama debe ser aumentada hasta que comience a verse un rastro de humo (*smoky-tail*) en torno a la punta como se observa en la Figura 2.4, a partir de esta punto se debe comenzar a disminuir la flama para que pase por las siguientes etapas:

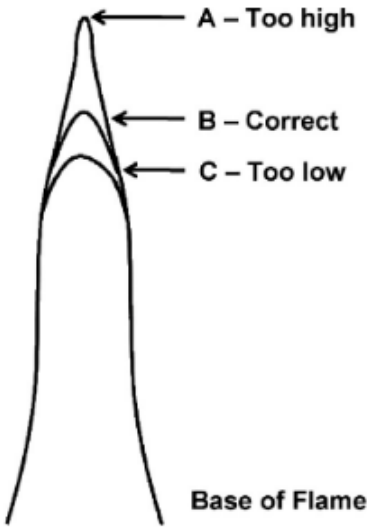


Figura 2.5: Etapas de progresión para la flama durante prueba de *SPH*, según el estándar ASTM-D1322 [6].

- La flama presenta una punta alargada y puntiaguda, los lados de la punta aparecen cóncavos hacia arriba, como se observa en la Figura 2.4-A).
- La punta de la flama deja de ser puntiaguda, pasa a ser levemente redondeada como en la Figura 2.4-B. Ocasionalmente se observan llamas irregulares y luminosas cerca de la punta de la llama verdadera, estas no deben ser consideradas.
- La llama presenta una punta definida y redonda, de acuerdo a la Figura 2.4-C.

La altura de la flama en el punto B de la Figura 2.4 es registrada por el operador al 0.5 mm más cercano en la escala de medición al interior de la galería de la lámpara estandarizada. Para evitar errores en la estimación debido a paralelismo, el ojo del observador debe posicionarse levemente hacia uno de los lados definidos por la línea central de la escala de medición, de esta forma la imagen reflejada de la flama debe aparecer a un lado de la línea central de la escala (línea blanca), mientras que la llama verdadera debe ser visto al otro lado de esta línea. La lectura de altura para ambos casos debe ser idéntica. La Figura 2.6 ejemplifica esta situación.

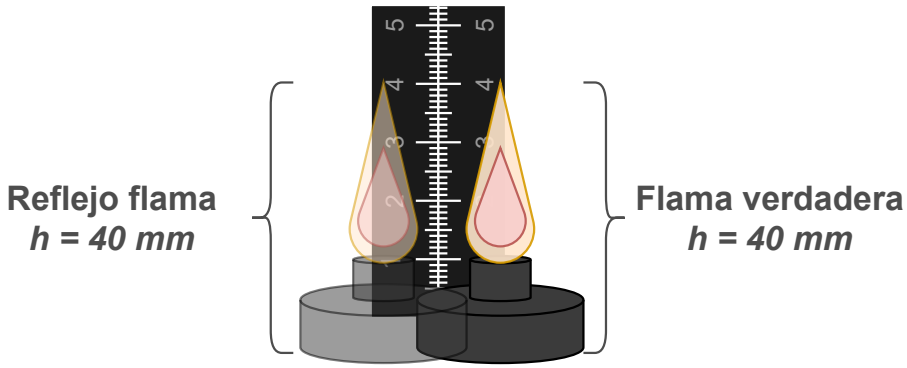


Figura 2.6: Ejemplo de la forma de medir la altura de la flama, según el estándar para evitar errores inducidos por paralelismo. La flama se refleja en una lámina de vidrio que recubre la escala de medición al interior de la galería de la lámpara

Tres observaciones separadas de la altura de la llama en la etapa B deben ser realizadas. Cada observación debe realizarse comenzando con una llama de altura aproximada 10 mm que se mantiene por cinco minutos. Si la variación entre estas observaciones es mayor a un milímetro se debe repetir la prueba con una nueva mecha y muestra de la mezcla de combustible. La condición definida para las mediciones puede ser definida de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta SPH = \text{máx}\,(SPH_1, SPH_2, SPH_3) - \text{mín}\,(SPH_1, SPH_2, SPH_3) \leq 1.0\ mm \quad (2.2)$$

Donde ΔSPH corresponde a la máxima variación entre las mediciones y SPH_i corresponde a la i-ésima medición de altura realizada.

Cálculo del *Smoke point* El valor del *smoke point* es calculado y aproximado al 0.1 mm más cercano a partir de la siguiente expresión:

$$L = \left[\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^{3} SPH_i\right]_{0.1} \quad (2.3)$$

$$SPH = L \cdot f \quad (2.4)$$

Donde `L` corresponde al promedio de la altura para las tres mediciones individuales. Se

debe aproximar al 0.1 *mm* más cercano. `f` corresponde al factor de corrección definido en la Ecuación (2.1), aproximado al 0.01 más cercano.

Registro: El valor obtenido mediante la Ecuación (2.4), debe ser aproximada al 0.5 *mm* más cercano. Se debe informar que la medición ha sido obtenida mediante la prueba definida por este estándar.

Precisión: Para definir la precisión de la prueba se definen dos criterios. En primer lugar, la *repetibilidad*, simbolizado por `r`, corresponde a la diferencia entre resultados obtenidos de manera exitosa mediante la prueba, por un mismo operador en condiciones de operación constante, utilizando material de prueba idéntico, en operación normal y correcta del método, a la larga excederá en uno de veinte casos, el valor definido en la siguiente expresión:

$$r = 0.06840 \cdot (x + 16) \tag{2.5}$$

Donde `r` corresponde a la *repetibilidad* y `x` corresponde al promedio de *SPH* entre los distintos resultados a verificar, en *mm*.

En segundo lugar, se define la *reproducibilidad*, simbolizado por `R`, es la diferencia entre dos resultados individuales e independientes obtenidos por diferentes operadores, trabajando en laboratorios diferentes utilizando equipo de medición nominalmente idéntico, en operación normal y correcta del método, a la larga excederá en uno de veinte casos el valor definido en la siguiente expresión:

$$R = 0.09363 \cdot (x + 16) \tag{2.6}$$

Donde `R` es la *reproducibilidad* y `x` corresponde al promedio de las mediciones de *SPH* a comparar, en *mm*. Valores típicos para la *repetibilidad* y la *reproducibilidad* tabulados por el estándar se indican en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores típicos de precisión para la prueba manual según estándar [10].

Resultado promedio X	r	R
15	2.12	2.90
20	2.46	3.37
25	2.80	3.94
30	3.15	4.31
35	3.49	4.78
40	3.83	5.24
42	3.97	5.43

2.2.1. Efectos de la subjetividad en la determinación del *smoke point*

A continuación se realiza un breve análisis de los efectos derivados de la subjetividad de las mediciones realizadas por el operador, sobre la caractrerización de *smoke point*, específicamente sobre combustibles con una baja propensión a la liberación de hollín.

La aplicación de la condición definida por el estándar en la Ecuación (2.2) busca acotar la variabilidad de las mediciones realizadas por un observador durante el proceso de prueba. Estas diferencias para la altura de la flama pueden deber su origen principalmente a la percepción del observador, la posición de este en relación a la escala, el paralelismo asociado a esta posición y el ojo del observador, limitaciones en la resolución de la escala de medición y movimientos asociados a la flama, ya sea propios del proceso de combustión o derivados de movimientos ocurridos en las cercanías de la lámpara. Se puede notar que en casi todos los casos estas fuentes de error son atribuidas al operador, de esta forma se puede definir la subjetividad de la medición como las fuentes de error atribuidas al operador.

La cota definida en la Ecuación (2.2) para la variabilidad asociada a la subjetividad de las mediciones, tiene efectos directos en la determinación del SPH de combustibles con una baja propensión a liberar hollín, como es el caso del tolueno. Este combustible tiene un SPH caracterizado normalmente en 6 mm[6].

Considere la realización de una prueba manual estandarizada para la caracterización del *smoke point* del tolueno, que por simplicidad fue realizada en una lámpara estandarizada con factor de corrección unitario y donde las tres mediciones de SPH arrojaron el mismo valor, 7 mm. Comparando los valores de altura obtenidos para cada iteración, se puede comprobar que la

condición de la Ecuación (2.2) se cumple para las mediciones. Calculando el *smoke point* para el combustible a partir de las mediciones se obtiene el siguiente resultado:

$$SPH_{\text{tolueno}} = 7\ mm \tag{2.7}$$

Si se calcula el error porcentual relativo que esto representan en relación al valor tabulado para el *smoke point* del combustible, corresponde a un error de aproximadamente el 17 %. De esta forma, debido a la existencia de este valor máximo de variabilidad para reducir la subjetividad de las mediciones, una prueba de evaluación de *SPH* para tolueno, donde el observador registre valores iguales para las estimaciones de altura de la flama, con una lámpara con factor de corrección unitario, podría presentar un error aproximado de 17 %, conllevando una caracterización incorrecta del combustible.

El mecanismo expuesto corresponde a una de las formas en la que el estándar maneja la variabilidad de los resultados, debido a la subjetividad, obtenidos durante la realización de la prueba manual. Sin embargo, el estándar también define mecanismos para manejar la variabilidad entre resultados obtenidos durante pruebas diferentes para un mismo operario (*repetibilidad*) y para manejar la variabilidad de resultados obtenidas por diferentes operarios (*reproducibilidad*).

Para considerar los efectos de los umbrales de *repetibilidad* y *reproducibilidad* en la caracterización del *SPH* para tolueno se calculan los umbrales para r de acuerdo a la Ecuación (2.5) y R de acuerdo a la Ecuación (2.6), los valores obtenidos se reportan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores de *repetibilidad* y *reproducibilidad* para tolueno [6].

SPH *mm*	r	R
6	1.50	2.06

Esto implica que para un mismo operador, caracterizando el *SPH* del tolueno en un segundo procedimiento, un valor de diferencia entre los resultados de 1.50, equivalente a un error porcentual del 25 % sería considerado válido, dando como resultado un *SPH* igual a 7.5 *mm*.

En el caso de operadores distintos, se aceptaría una diferencia de 2.06, equivalente a un error porcentual aproximado de 34 %, dando como resultado un *SPH* igual a 8.06 *mm*.

De esta forma, los mecanismos con los que el estándar maneja la subjetividad de mediciones, permite que errores asociados a la estimación del *SPH* del tolueno, correspondientes a un 17 % durante la realización de la prueba, 25 % durante una segunda iteración de la prueba o 34 % en el caso de una evaluación por otro laboratorio, sean considerados como la altura crítica donde ocurre la liberación de hollín para el combustible.

2.3. Estado del arte

En este capítulo se realiza una breve caracterización de las técnicas que fueron analizadas durante el proceso de investigación del presente trabajo, un análisis más detallado de las técnicas no seleccionadas puede ser encontrado en el Anexo 6.2.

Entre las técnicas que se pueden reconocer para el análisis y caracterización de *SPH* se encuentra *Fuel Uptake Rate measurement with Threshold Imaging (FURTI)* [6]. Esta técnica basada en el diseño experimental de la prueba manual del estándar ASTM-D1322 [10], utiliza la relación entre el consumo de combustible y la altura de la flama, las cuales se comportan de manera lineal hasta la ocurrencia del *smoke point* donde ocurre una discontinuidad, la cual es utilizada para identificar el *SPH*. Esta metodología presenta desventajas como la pérdida del carácter normalizado de la lámpara debido a las adaptaciones necesarias para incluir una balanza analítica que permita medir el consumo de combustible, una baja robustez en la forma en que se determina la altura de la llama mediante el uso de umbrales y una complejidad de medición mayor que la establecida en la prueba estandarizada.

Los autores de [7] intenta solventar algunas de las problemáticas del método *FURTI*, utilizando un nuevo diseño experimental, con una balanza analítica que permite realizar mediciones sobre la lámpara estandarizada sin requerir modificaciones. Por otro lado establecen un metodología para la caracterización de la llama, mediante el uso del gradiente vertical de la imagen, lo que elimina la necesidad de utilizar el proceso de umbralización original. Sin embargo, sigue suponiendo un nivel de complejidad mayor al correspondiente a la prueba estandarizada, asociado a la inclusión de la balanza analítica necesaria para obtener las mediciones de consumo

de combustible.

De esta forma, metodologías que priorizan el uso de información netamente visual obtenida de la flama para la determinación del *SPH* fueron exploradas. En esta categoría se encuentra el trabajo [8], que propone analizar la progresión de la llama en un quemador Gülder[5] utilizando *Eulerian Video Magnification (EVM)*, que permite analizar micromovimientos que ocurren en torno al *smoke point* debido a cambios morfológicos en la punta de la flama. Uno de los problemas de la utilización de *EVM* es la susceptibilidad al ruido y cambios en la escena que no están relacionados a la flama, dado que el análisis se basa en la magnificación de las diferencias entre *frames*.

La metodología descrita en [9] propone utilizar *machine-learning* para caracterizar el estado de una flama de acuerdo a si está antes (*USP - Under Smoke Point*), en (*SP-Smoke point* o después de su *smoke point* (*ASP- Above Smoke Point*) en un quemador Gülder. Utilizando una técnica clásica de aprendizaje de máquinas, *Support Vector Machine (SVM)*, se puede entrenar un modelo a partir de un *dataset* de imágenes de flamas pertenecientes a los tres estados definidos, que permita encontrar el hiperplano que separa y maximiza la distancia de las etiquetas (estados). En una línea similar, [3] propone realizar la misma caracterización, pero utilizando un enfoque de *deep-learning*. Una red *Convolutional Neural Networks (CNN)* es entrenada a partir de un *dataset* etiquetado con las tres clases identificadas para la llama, *USP, SP y ASP*. De esta forma analizando *frames* de la flama en un quemador Gülder es posible identificar su estado. Para ambos propuestas, el *dataset* es generado utilizando *frames* de flamas en diversos estados de progresión de *smoke point*, para distintos combustibles, que han sido analizadas y etiquetadas utilizando *EVM* [8]. Estos métodos comparten la misma problemática asociadas a la formación de un *dataset* lo suficientemente amplio, que incluya diversas mezclas de combustible, con alteraciones a la altura de cada caso, para forzar una buena generalización a elementos fuera del conjunto de entrenamiento.

Dos técnicas basadas en el análisis geométrico de la morfología de la flama durante su *smoke point* son encontradas en la literatura. El trabajo [4] analiza los cambios cercanos a la punta de la flama en relación al cambio en la altura total (contorno) de la misma, estas variables exhiben

[5]Es un tipo de quemador que permite obtener flamas laminares. Principalmente utilizado para combustibles gaseosos.

un comportamiento lineal hasta la ocurrencia del *smoke point*, de esta forma se establece un criterio para la estimación de SPH. La metodología trabaja directamente sobre la prueba manual definida en el estándar, realizando adaptaciones no invasivas que permite preservar el carácter normalizado del instrumento de medición. Estas adaptaciones consisten en la inclusión de un mecanismo de control, basado en un *servomotor*, que permite controlar el mecanismo de ajuste de la mecha de forma precisa y cuantificable, además de la adición de una cámara web para el registro de la progresión de la flama.

Los autores de [5] construyen directamente sobre [4], refinando el criterio geométrico, definiendo zonas de interés en la flama, núcleo y contorno. Mediante el análisis de estas regiones de interés se puede obtener tanto la altura de la flama, como la altura de la punta, permitiendo establecer una relación geométrica similar a la encontrada en el trabajo previo. El diseño experimental propuesto se mantiene consistente con el encontrado en [4], incluyendo nuevas adaptaciones no invasivas, que buscan incorporar la propuesta en el instrumento de medición. Se añade una computadora capaz de controlar la mecanización de la mecha junto con registrar la progresión de etapas de la llama mediante una cámara web, además de implementar el algoritmo de análisis propuesto, de forma de encapsular la metodología entregando un instrumental automatizado que entregue resultados *in situ*, comparable con la alternativa automática encontrada en el estándar.

Dadas las características presentes en el trabajo [5], como la utilización de un criterio visual basado en la geometría de la flama, un diseño experimental no invasivo basado en la prueba manual e instrumental normalizado definido en el estándar, además de la incorporación de elementos en pos de la encapsulación de la metodología, aportes que se alinean con los requisitos definidos por el EC^2G, se escoge esta técnica para su análisis y replicación. Un análisis comparativo más detallado junto a los criterios de comparación entre las diversas técnicas analizadas puede ser encontrado en el Anexo 6.3.

En las siguientes secciones se procede a realizar una descripción más detallada tanto del trabajo [5], como también de [4], dado que el primero construye sobre este último, por lo que se realiza su análisis a modo de contextualización y de definir las bases sobre la que construye [5]

2.3.1. Vision Based Algorithm for Automated Determination of Smoke Point Height in Diesel Blends [4]

El trabajo plantea una nueva metodología para poder determinar si una flama se encuentra en su *smoke point* de forma netamente visual, sin requerir información acerca del consumo de combustible de ésta, a partir de la deformación morfológica de la punta de la llama que ocurre durante la transición de la flama hacia su *smoke point*. Los autores proponen utilizar una versión automatizada y modificada de la lámpara estandarizada junto a este algoritmo basado en la morfología de la flama, para determinar el *smoke point*.

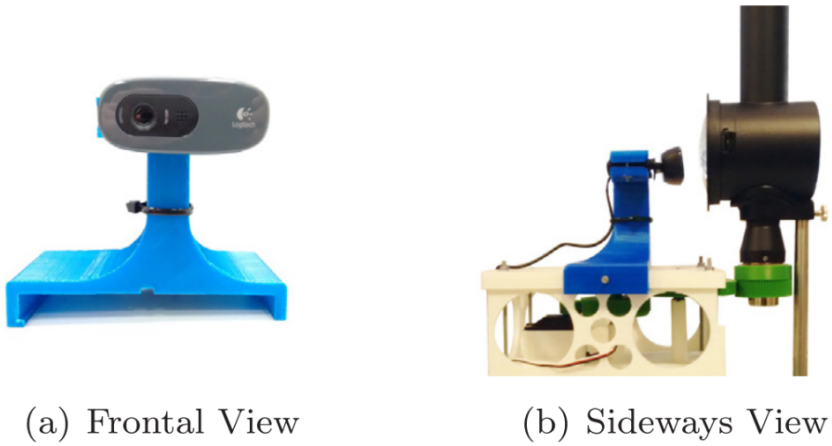


Figura 2.7: Diseño experimental propuesto. Corresponde a una versión adaptada, sin modificaciones sobre la lámpara estandarizada.

La metodología construye directamente sobre la prueba definida en el estándar. Un combustible de prueba es cargado en la lámpara estandarizada y se realiza una progresión de la flama. Los autores proponen realizar adaptaciones para la mecanización de la lámpara, sin intervenciones que puedan dañar el carácter normalizado y calibrado del instrumento de medición, como se observa en la Figura 2.7. La adaptaciones se manifiestan en la inclusión una cámara para poder registrar la progresión de la flama y de un mecanismo que permite regular de manera precisa, constante y controlada la mecha de la lámpara y por ende el flujo de combustible, evitando irregularidades en la velocidad con la que se ajusta, que se traduzcan en variaciones de la flama que puedan entorpecer la determinación de su altura.

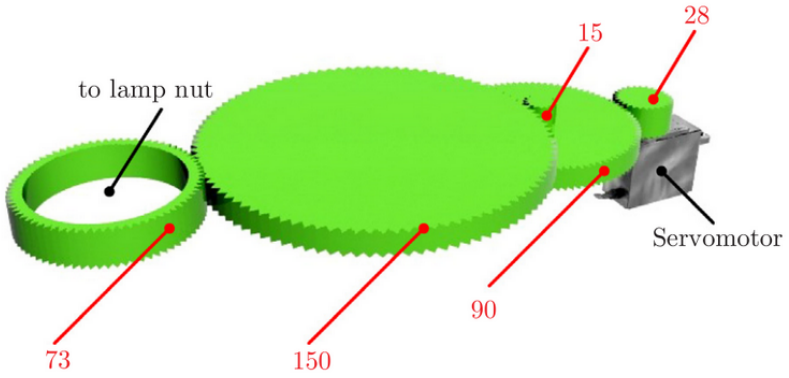
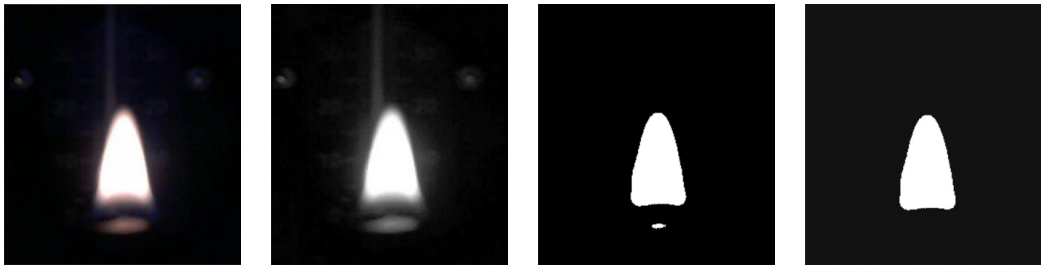


Figura 2.8: Mecanismo para el control de la mecha de la lámpara mediante un servomotor.

Para conseguir este control automatizado, se propone utilizar un servomotor junto con una caja de reducción detallada en la Figura 2.8, de manera de poder tener un rango de velocidades entre 1 y 3 *rpm*, junto con un torque aproximado de 3 *Nm*. Estos parámetros fueron determinados de manera experimental por los autores para la correcta operación del mecanismo incluido en la lámpara estandarizada. Dadas estas características un *servomotor* en conjunto con la caja de reducción, controlado mediante un microcontrolador `Arduino Mega 2560`, son utilizados en conjunto para cumplir con estos requisitos. Para la cámara, los autores consideran que una cámara web (Logitech C270) es suficiente en términos de resolución de imagen, considerando la permisividad de 0.5 *mm* de resolución dadas para el operador en la determinación de la altura de la flama. La cámara es posicionada lo más cerca posible de la flama, que corresponde a una distancia de 20 *mm*. La cámara es configurada con el tiempo de exposición más bajo permitido para poder evitar la saturación debido a la intensidad luminosa emanada desde la flama. Se configura la resolución a 1280×960 y se registra la progresión con una tasa de captura de 30 *fps*.



(a) Frame capturado. **(b)** *Grayscale*. **(c)** Aplicación umbral 35 %. **(d)** Filtrado final.

Figura 2.9: Procesamiento realizado sobre cada *frame* previo a análisis.

Luego de que una prueba ha sido realizada, el vídeo capturado es analizado *frame* por *frame*. En primer lugar se realiza una etapa de pre-procesamiento, descrita en la Figura 2.9. En primer lugar el *frame* es convertido a escala de grises mediante la suma ponderada de sus canales RGB[6] definida de la siguiente forma:

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B \tag{2.8}$$

Obteniéndose como resultado la Figura 2.9b. En segundo lugar, se aplica un umbral sobre la imagen. Esta operación corresponde a escoger un valor, entre 0-255, que representa la luminosidad mínima que se espera tenga un píxel. La imagen es revisada píxel a píxel y si el valor individual del píxel es mayor o igual al umbral, este es evaluado como un valor alto (255), en caso contrario, se evalúa como un valor bajo (0). De esta forma se obtiene una imagen binaria, donde los valores asociados a los píxeles serán 0 o 255. Los autores escogen un umbral de 90 (correspondiente al 35 % del máximo de 255), determinado de forma experimental entregando una "buena representación" de la forma de la llama, indicando que este umbral puede ser aplicado a todos los *frames* de la prueba, dado que acorde a sus resultados la flama tendría un comportamiento lumínico plano durante la evaluación como se registra en la Figura 2.10. Luego de la aplicación del proceso de umbralización se obtiene como resultado la Figura 2.9c.

[6]Este tipo de conversión es estándar y corresponde a la empleada por la biblioteca de procesamiento de imágenes: OpenCV[30].

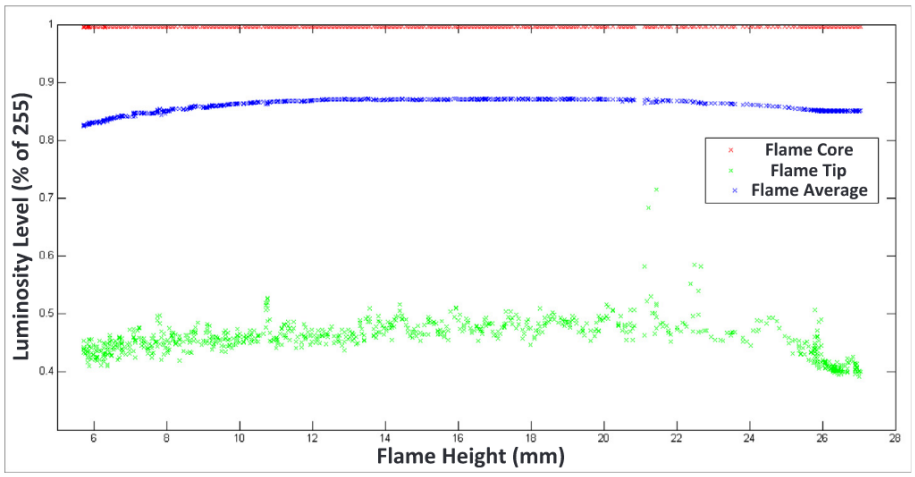


Figura 2.10: Análisis de intensidad lumínica de diversas regiones de la flama durante la progresión realizada durante una prueba [4].

Se aplica un último proceso de filtrado sobre la imagen, cuya finalidad es dejar únicamente el conglomerado de píxeles cuya área sea mayor, eliminando reflexiones y elementos no deseados que no corresponden a la flama. Luego de esto, se realiza una operación encargada de rellenar espacios vacíos dentro de la máscara binaria que representa a la flama, entregando como resultado la Figura 2.9d. Con este resultado, se procede a realizar el análisis de la morfología de la flama, para ello es necesario parámetros que permitan caracterizar los cambios registrados principalmente en la punta.

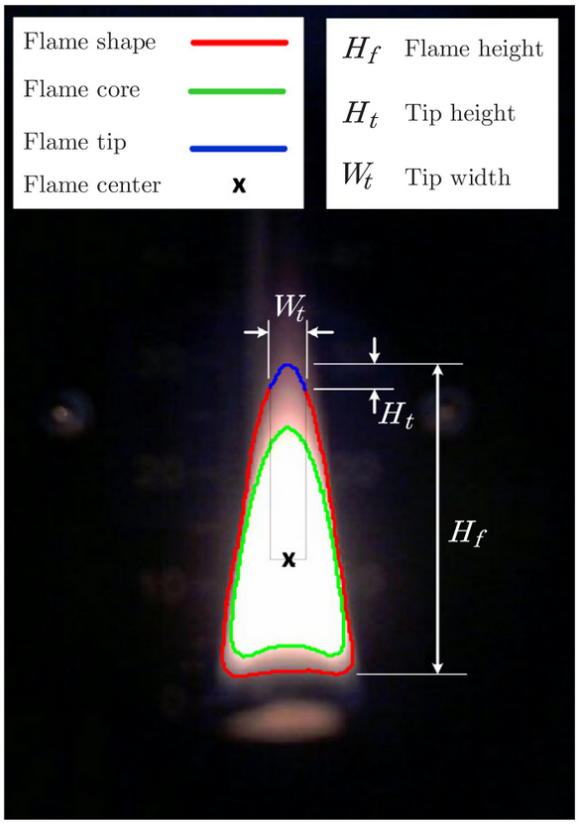


Figura 2.11: Regiones definidas para la caracterización de la flama [4].

Se define:

- ***Flame core*** como la región obtenida a partir de la aplicación de un umbral correspondiente a un valor de 230 (90 % del total de 255) aplicado sobre el *frame grayscale*, lo que entrega el área con mayor intensidad lumínica de la llama y coincide con centro geométrico de la flama (*flame center*). En la Figura 2.11 el *flame core* aparece delimitado en verde.

- ***Punta de la flama (flame tip)***, corresponde a la región del borde de la flama (el borde fue determinado en el pre-procesamiento), ubicada directamente sobre el centroide dado por el *flame core*, con un ancho determinado de manera experimental como el 40 % del ancho de la base del contorno de la llama. En la Figura 2.11 la *flame tip* aparece delimitada en azul.

- ***Razón de la punta (tip ratio)*** se define como la relación entre la altura de la *flame tip*, definida como H_t y su ancho definido como W_t, expresado de la siguiente forma:

$$R_t = \frac{H_t}{W_t} \tag{2.9}$$

- ***Altura de la flama (flame height)***, H_f, que corresponde a la altura total del área definida como parte de la llama.

Los autores determinaron de manera experimental, que existiría una relación entre el *tip ratio* y la *flame height*, la cual se comporta de manera lineal durante la progresión de la flama, hasta cierto punto donde la pendiente cambia como se aprecia en la Figura 2.12, este cambio en la linealidad correspondería al *smoke point*.

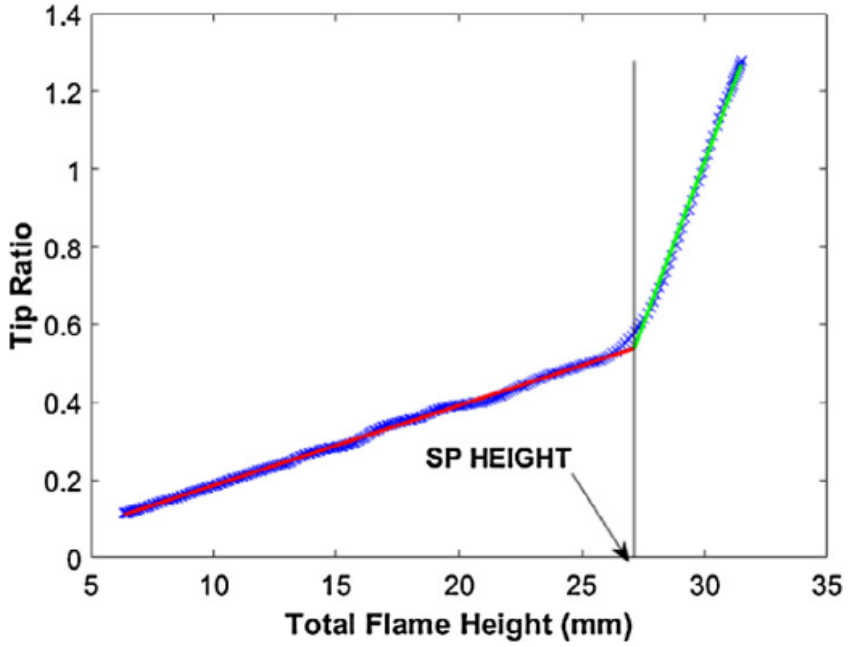


Figura 2.12: Relación entre el *tip ratio* y la *flame height*, durante la progresión de la flama. El cambio de linealidad ocurre en el *SPH*.

Para cada *frame* se obtiene el *tip ratio* y la *flame height*. A partir de los valores obtenido, se filtran los que estén distanciados a más de una desviación estándar del promedio. Posteriormente, se calcula un promedio móvil de los datos resultantes, que corresponde a evaluar cada

punto como una suma ponderada de el mismos y sus vecinos. Los autores indican que para cada punto obtenido se computan 9 vecinos, con pesos determinados para minimizar el error de detección, resultando en la siguiente expresión:

$$H_f(k) = \sum_{n=-4}^{4} a_n \cdot H_f(k-n) \tag{2.10}$$

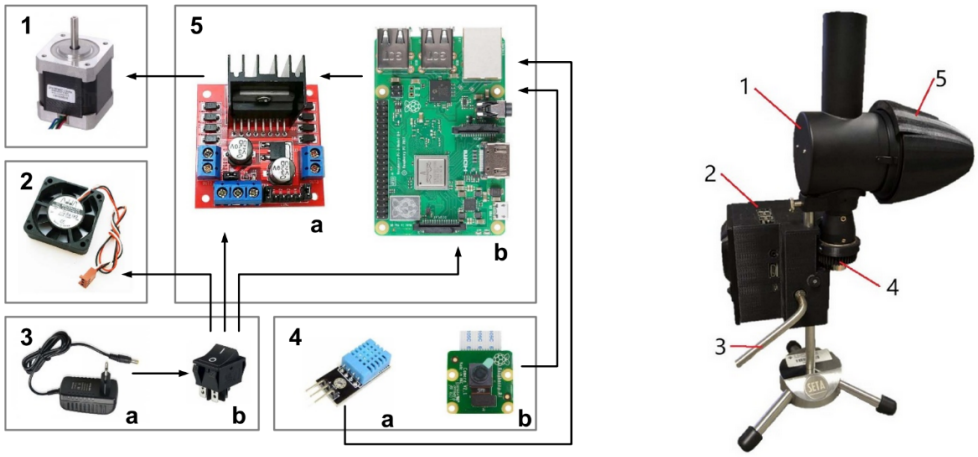
Tabla 2.3: Pesos para el promedio móvil de la Ecuación (2.10)

i	a_i
-4,4	0.16
-3,3	0.08
-2,2	0.12
-1,1	0.16
0	0.2
$\sum_{-4}^{4} a_i$	1

Luego de este procesamiento de los datos, dos curvas de primer orden son ajustadas a los puntos que muestran linealidad, correspondiendo a la progresión previa y posterior a la ocurrencia del *smoke point*. El punto donde ambas curvas se interceptan corresponde al *SPH*.

2.3.2. A novel device for automated determination of the smoke point with non invasive adaptation of ASTM D1322 normalized lamps [5]

El trabajo construye directamente sobre el analizado en el Capítulo 2.3.1 [4], estableciendo principalmente una revisión al análisis geométrico realizado sobre la flama de forma de reducir errores de medición y aumentar la robustez a perturbaciones ambientales. También en esta revisión, se hace una propuesta de instrumentalización para la prueba en un entorno autocontenido, incluido con la lámpara estandarizada.



(a) Esquema funcional del instrumental propuesto. **(b)** Dispositivo de medición integrado a la lámpara estandarizada.

Figura 2.13: Propuesta de instrumentalización para la determinación automática del *SPH* [5]

Los autores proponen diseñar un instrumento de medición, basado en la lámpara estandarizada sin intervención, como en la propuesta [4], se toma un enfoque que permita mantener el carácter normalizado de la lámpara. Para ello, se toman elementos del trabajo previo como la forma de controlar la mecha mediante un *servomotor* en conjunto con una caja de reducción. Se propone reemplazar el `Arduino Mega` utilizado en la revisión previa, por una `Raspberry PI` que sea capaz de correr el algoritmo de forma independiente, controlando tanto el flujo de combustible de la llama, mediante la mecha, como también el registro de la progresión y el posterior análisis, permitiendo obtener resultado del *SPH in situ*. La cámara web ha sido reemplazada por una *Raspberry PI CAM V.21*. Un sensor que permita registrar condiciones de humedad y temperatura ha sido incluido. La propuesta instrumental puede ser observada

en la Figura 2.13.

Se establece una relación para la conversión de píxeles a milímetros, obtenida de forma experimental, que indica que existe una relación lineal entre los píxeles de la imagen y su representación en milímetros determinada por la expresión:

$$d = 0.1038 \cdot p_x + 3.55 \tag{2.11}$$

Donde d corresponde a la distancia en milímetros medida y p_x la distancia representada en píxeles.

El procedimiento de prueba se mantiene como el definido en [4], la llama asociada a una mezcla de combustible es progresada de forma automática, se captura un vídeo del procedimiento para luego ser analizado, *frame* a *frame*. En términos del análisis de la morfología de la flama, dos zonas son definidas como se muestra en la Figura 2.14. En primer lugar, se define el *flame core*, como la representación de la parte más brillante de la flama. Definida como el área cuyos valores de intensidad superan el umbral de 191 (75 % del máximo valor de 255). La zona resultante es procesada para rellenar cualquier vacío (píxeles con valor cero) que hayan quedado en su interior, en el caso luego de la aplicación del umbral más de una sección sea detecta (mediante componentes conectadas), se considerará únicamente la más grande. En segundo lugar, se define el *flame contour*, como el área cuyos valores de intensidad superen el umbral de 89 (35 % del máximo valor de 255). Este valor fue obtenido de forma experimental para varios combustibles, su funcionalidad es permitir encontrar la forma de la flama. Se repite el proceso para rellenar vacíos al interior de la región y considerar únicamente la componente conectada de mayor área.

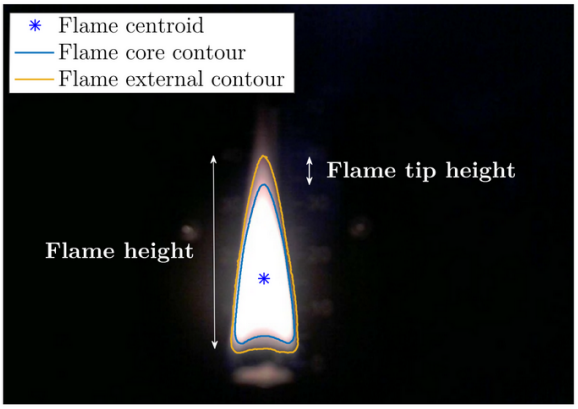


Figura 2.14: Regiones definidas para la flama [5].

Para cada *frame* se obtienen dos propiedades geométricas de la flama:

- ***Flame height***, h, definida como la altura de la región *flame contour*.
- ***Altura de la punta de la flama (flame tip height)***, H, calculado como la diferencia vertical del píxel superior de la región *flame contour* y el *flame core*.

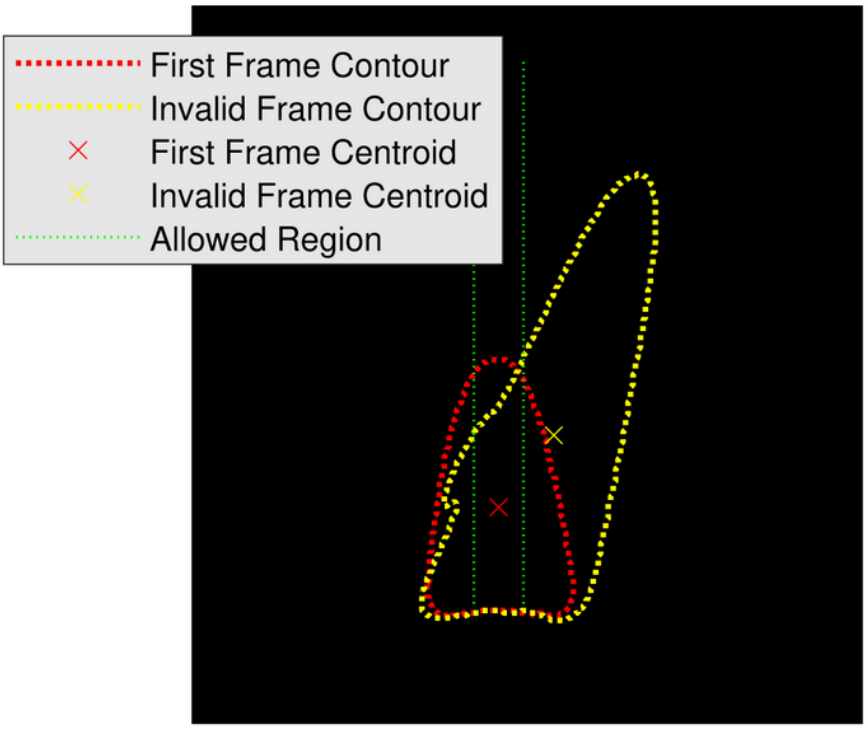
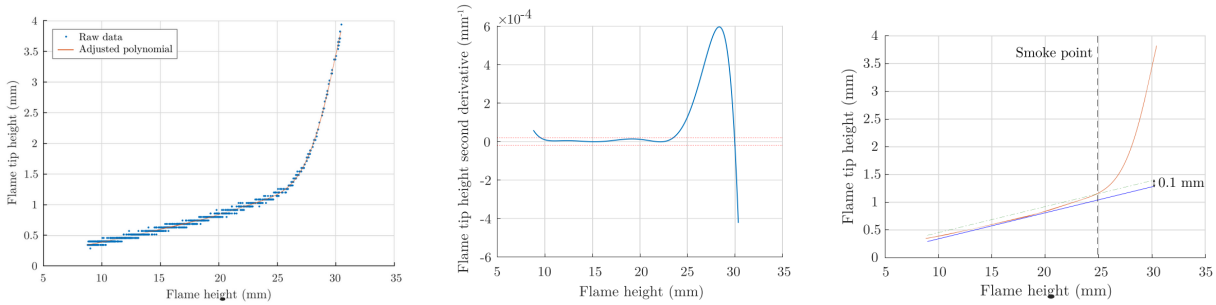


Figura 2.15: Validación de *frames* a partir de la diferencia horizontal de los centroides.

Para mejorar la robustez de las mediciones, los autores proponen una condición para detectar perturbaciones de la flama que pudieran tener un efecto negativo en el análisis geométrico. Para ello, la coordenada X del centroide de la región *flame contour* del primer *frame* es registrada como referencia. Para *frames* posteriores, la coordenada X del centroide de la región *flame contour* también es calculada y comparada con la referencia, si la diferencia entre ambas, es mayor a 1 *mm*, se considera como inválido al *frame* y cualquier métrica proveniente de este es descartada. La Figura 2.15 muestra el proceso de análisis de validez para un *frame*.



(a) Relación entre altura de *flame tip* y *flame height*

(b) Análisis de la segunda derivada.

(c) Determinación *SPH* a partir zona lineal.

Figura 2.16: Análisis de la información geométrica obtenida a partir de los *frames* de la progresión.

A partir de los *frames* analizados, se obtienen un conjunto de valores para h y H, se procede a realizar el ajuste un polinomio de décimo orden que permite representar los datos de la forma $H(h)$). Los autores determinaron de manera experimental que el grado mínimo requerido para poder representar los datos, cuyo error es menor a la precisión de la cámara utilizada, corresponde a un polinomio de grado diez. En la Figura 2.16a, se puede observar la información obtenida y el polinomio ajustado. Se puede notar la relación lineal entre H y h previo a la ocurrencia del *smoke point*. Para detectar esta zona lineal, se computa la segunda derivada del polinomio obtenido $\frac{\partial^2 H(h)}{\partial h^2}$. Dado que si existe una zona que presenta relación lineal entre las variables, la primera derivada entregaría un valor constante de pendiente para esta zona, la segunda derivada entregará un valor cercano a cero, cuando se evalúa sobre los h pertenecientes a esta sección como se ve en la Figura 2.16b. De esta forma se puede formalizar la definición de la zona lineal, como todos los valores de h que cumplan la siguiente condición:

$$h : \left| \frac{\partial^2 H(h)}{\partial h^2} \right| \leq 2 \cdot 10^{-5} \tag{2.12}$$

Una regresión lineal es ajustada a los puntos determinados mediante la condición de zona lineal, $L(h)$. Se define la condición de *smoke point* como el primer punto h evaluado en $H(h)$ en superar su valor en $L(h)$ por un umbral de 0.1 mm, Figura 2.16c. De esta forma se puede formalizar el SPH en la siguiente expresión:

$$h_{sp} := |H(h - L(h)| > 0.1 \ mm \tag{2.13}$$

El umbral de 0.1 mm fue determinado de forma experimental, utilizando como referencia un conjunto de veinte combustibles, evaluados mediante la prueba estandarizada ASTM-D1322, como el umbral que permite obtener el mismo *smoke point* para cada combustible del conjunto. La densidad de probabilidad de los resultados fue obtenida permitiendo determinar la elección de umbral· El procedimiento de análisis realizado por el algoritmo es resumido en el diagrama de flujo de la Figura 2.17.

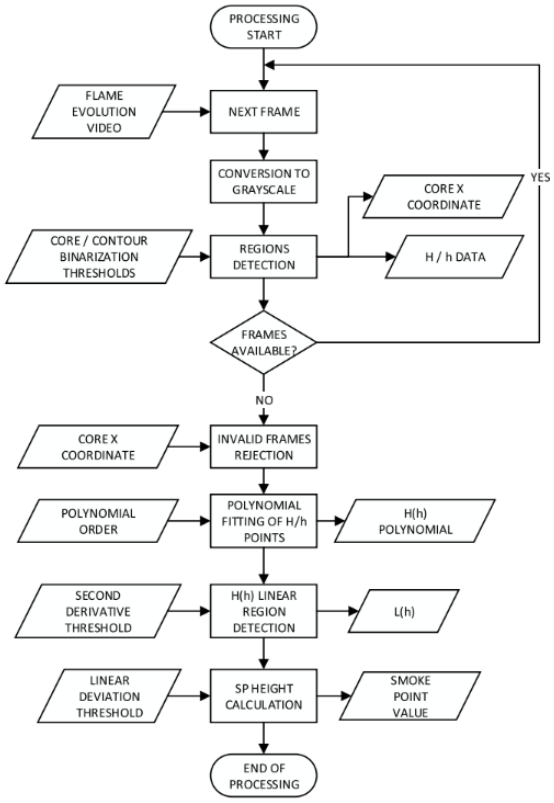


Figura 2.17: Diagrama de flujo que representa la metodología propuesta.

3. Implementación de la propuesta

En este capítulo se introducen las consideraciones y decisiones de diseño que se realizaron durante la replicación del algoritmo definido en la propuesta [5]. Estas decisiones derivan del estudio realizado en el Capítulo 2.3.2 sobre la metodología seleccionada y evaluaciones preeliminares del funcionamiento del algoritmo en el diseño experimental propuesto. Los resultados a nivel de código y documentación derivados de este proceso se almacenan en un repositorio alojado en `Github` [17].

En secciones posteriores de este capítulo, se define el diseño experimental a utilizar para la evaluación del algoritmo replicado [5] frente a la metodología manual definida en el estándar [10]. El diseño experimental comprende la definición del experimento a realizar en el entorno de laboratorio, la definición de configuraciones para la cámara utilizada, las mezclas de combustible definidas a ser evaluadas en el experimento, el procedimiento a realizar para la prueba comparativa entre las metodologías, algoritmo replicado y método manual estandarizado, además de las rutinas asociadas a la obtención de la relación entre píxeles y milímetros, como también los valores umbral de las regiones geométricas asociadas a la calibración del algoritmo para la cámara utilizada.

3.1. Implementación de la alternativa seleccionada

El algoritmo definido en la propuesta [5], es replicado utilizando como base el lenguaje de programación `Python`. Se utiliza en conjunto la biblioteca de visión por computador `OpenCV`, dado que dentro de los recursos que entrega, se encuentran todas las funciones de análisis y procesamiento requeridas para la caracterización visual de la geometría de la flama. Para el análisis numérico se escoge utilizar la biblioteca de análisis matemático `Numpy`. Los archivos asociados al algoritmo implementado se alojan en el siguiente repositorio de `Github` [17].

La replicación se realiza a partir del diagrama de flujo de la Figura 2.17, estableciendo como base los pasos indicados por éste. Se realizan las siguientes consideraciones de diseño durante la replicación del algoritmo:

I. **Todas las constantes utilizadas y definidas en [5] se convierten de su valor en milímetros a píxeles.** Esta decisión se justifica debido a la definición de la conversión de píxeles a milímetros definida por los autores de la propuesta en la Ecuación (2.11), esta se comporta como una transformación lineal, por lo que su aplicación no afecta el resultado del procesamiento, y la utilización de valores en píxeles es más sencilla de trabajar a nivel de código. Para realizar la conversión de milímetros a píxeles se utiliza la relación entre estas unidades definida en la Ecuación (3.16) para la cámara específica a utilizarse en el diseño experimental (la obtención de esta relación para la cámara utilizada será analizada en el Capítulo 3.2.2). Las siguientes constantes son afectadas por esta decisión de diseño:

- **Tolerancia *frames* inválidos**: Los autores definen que si la diferencia entre la coordenada X, del centroide obtenida para el *frame* que está siendo procesado y el *frame* de referencia es mayor a 1 *mm* el *frame* debe descartarse. Utilizando la conversión de la Ecuación (3.16), se definir la condición para la coordenada del centroide, en píxeles, como:

$$D_{CX} = 1 \text{ mm} \equiv 10 \text{ px} \tag{3.14}$$

- **Condición de *smoke point*:** Luego de encontrar la zona lineal, para los datos analizados asociados a una progresión realizada en la lámpara, se establece que el primer valor de altura (h), que tenga asociado un valor de altura de punta (H), mayor que su valor en la recta $L(h)$, por un valor de 0.1 *mm* será considerador el *smoke point*. Utilizando la conversión de la Ecuación (3.16), se puede redefinir la condición en términos de píxeles como:

$$D_{H-L} = 0.1 \text{ m} \equiv 1 \text{ px} \tag{3.15}$$

II. Se establece una nueva relación para la conversión de píxeles a milímetros. Debido a cambios asociados al diseño experimental propuesto en este capítulo, principalmente el uso de una cámara distinta a la encontrada en el trabajo [5] y una posición relativa de la cámara a la lámpara distinta a la utilizada por los autores, es que es necesario establecer una metodología que permita obtener la relación entre píxeles y milímetros para la cámara utilizada en el diseño experimental. Esto se materializa en una rutina para la estimación de la conversión de píxeles a milímetros, que se define en el Capítulo 3.2.2. El uso de esta nueva relación de unidades para la cámara utilizada, no debiese impactar en los resultados obtenidos por el algoritmo, debido a que se comporta de la misma manera que la relación propuesta originalmente en [5], como una transformación lineal.

III. Valores umbrales para la caracterización de las regiones geométricas de la flama. Mediante la realización de pruebas del funcionamiento del algoritmo en el diseño experimental propuesto, se determinó que la utilización de una cámara diferente a la definida originalmente en la propuesta [5], tiene un impacto directo en la estimación de las áreas geométricas definidas para la flama, cuya relación permite obtener el valor de *SPH* asociado a la progresión a analizar. De esta forma, si se utiliza los valores originales, establecidos por los autores, para los umbrales que definen estas regiones de interés, el algoritmo es incapaz de funcionar. A partir de este resultado, se establece una rutina de calibración para el algoritmo, definida en el Capítulo 3.2.5. Esta rutina utiliza como base la definición entregada por los autores para las regiones geométricas y un análisis de histograma de intensidades promedio, aplicado sobre el total de *frames* pertenecientes a una progresión de un combustible de prueba, para obtener de forma automática los valores umbral asociados a la región de *flame core* y *flame contour* para la cámara utilizada en el diseño experimental.

Esta decisión de diseño tiene un impacto directo sobre los resultados dado que afecta la relación existente entre las áreas geométricas que permiten determinar la ocurrencia del *smoke point*. Los valores umbral asociados a cada área, indican el valor de intensidad mínimo que debe tener un píxel para pertenecer a una determinada región. Variaciones en los valores umbral, implican un cambio en la cantidad de píxeles que representa el

área, por lo que la estimación de altura para el contorno y para la punta de la flama se ven afectadas. De esta forma, los efectos asociados a esta decisión de diseño serán considerados durante el análisis de resultados.

IV. Se omite la propuesta de mecanización del control de la mecha definida en [5]. Como se busca realizar una evaluación comparativa entre los resultados del algoritmo replicado a partir de [5] y la metodología manual definida en el estándar. Esta última requiere que el operador sea quién realiza el control de la mecha durante la progresión de la flama por las etapas definidas, debido a esto se omite la propuesta de mecanización, de esta forma obteniendo una comparación más directa entre las metodologías evaluadas. Los efectos de esta decisión sobre el funcionamiento del algoritmo serán analizados durante la discusión de resultados en el Capítulo 4.

3.2. Diseño experimental

Para poder realizar la evaluación comparativa entre la metodología [5] y la prueba manual definida en el estándar, se propone realizar una evaluación en paralelo de las metodologías, utilizando como base la lámpara estandarizada que se observa en la Figura 3.18. De esta forma, un operador realiza la metodología manual para un combustible de prueba sobre la lámpara, mientras esto ocurre, una cámara registra la progresión de la flama asociada al procedimiento. Esta información es posteriormente procesada mediante el algoritmo replicado[5]. Obteniendo dos conjuntos de mediciones, uno asociada al estándar y otro al algoritmo, que permiten realizar una comparación directas entre ambos resultados y los valores encontrados en la literatura. Para este propósito se diseña el experimento definido en las Figuras 3.19 y 3.20.

Figura 3.18: Lámpara estandarizada `SYA-382` utilizada para las mediciones.

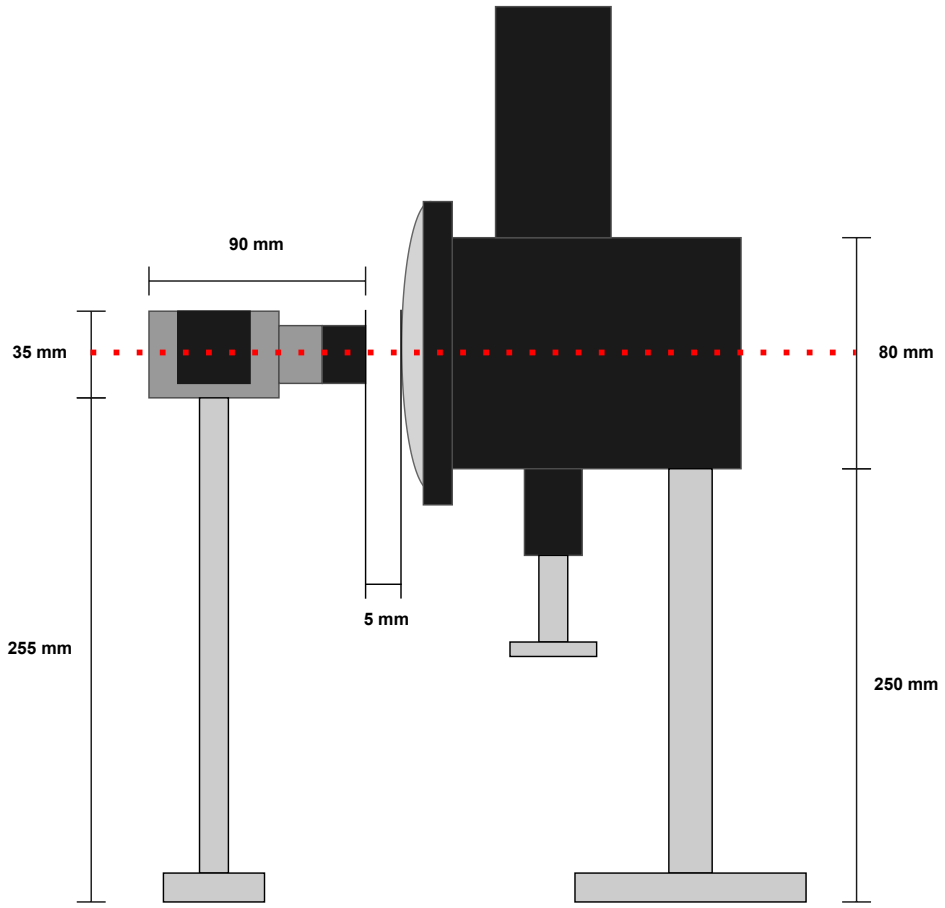


Figura 3.19: Vista lateral de la propuesta para la medición del *SPH* mediante la metodología de [5]. Se demarca en rojo la alineación vertical entre la cámara y la lámpara.

En la Figura 3.19 se puede observar la vista lateral del experimento. La cámara debe ser posicionada a una altura de 255 *mm* desde el plano hasta la base de la cámara, de forma que el punto medio del lente de la cámara se encuentre alineado con el plano definido por el punto medio de la galería de la lámpara en el eje vertical. En la Figura se demarca esta alineación con una línea punteada roja. La separación entre la lámpara y el extremo del lente de la cámara corresponde a una distancia de 5 *mm*.

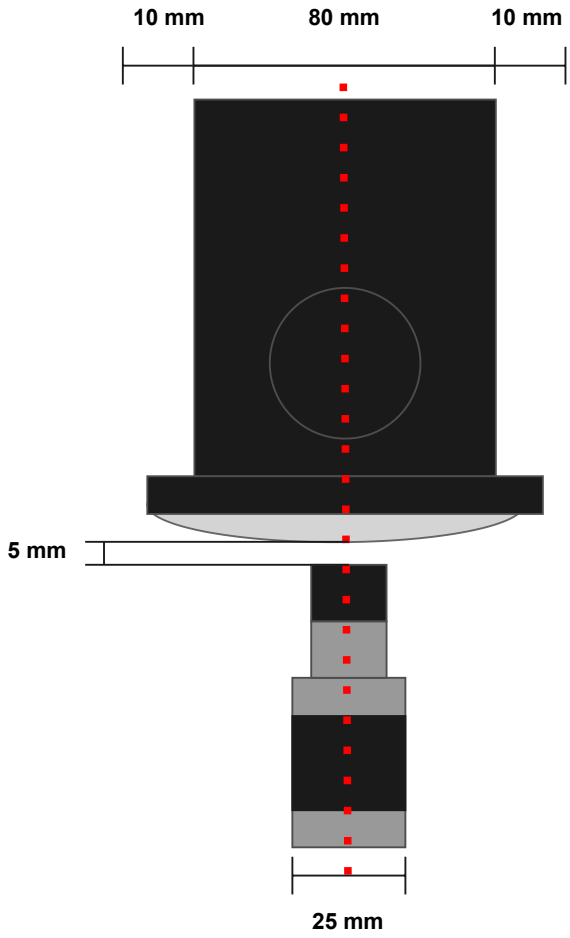


Figura 3.20: Vista aérea de la propuesta para la medición del *SPH* mediante la metodología de [5]. Se demarca en rojo la alineación horizontal entre la cámara y la lámpara.

En la Figura 3.20 se muestra una vista aérea del experimento. La cámara debe ser posicionada de forma que el punto medio de ésta, se encuentre alineado con el plano definido por el punto medio de la galería en el eje horizontal. Esta punto corresponde a 40 *mm* desde el extremo lateral de la lámpara.

A partir de las alineaciones definidas en las Figuras 3.19 y 3.20, se posiciona la cámara de forma que su centro quede alineado con el centro de la galería de la lámpara. De acuerdo al diseño experimental propuesto por los autores [5], la cámara debiese posicionarse a una distancia de 20 *mm* de la flama, sin embargo, esto no es factible debido a las características de la lámpara que se aprecian en la Figura 3.21.

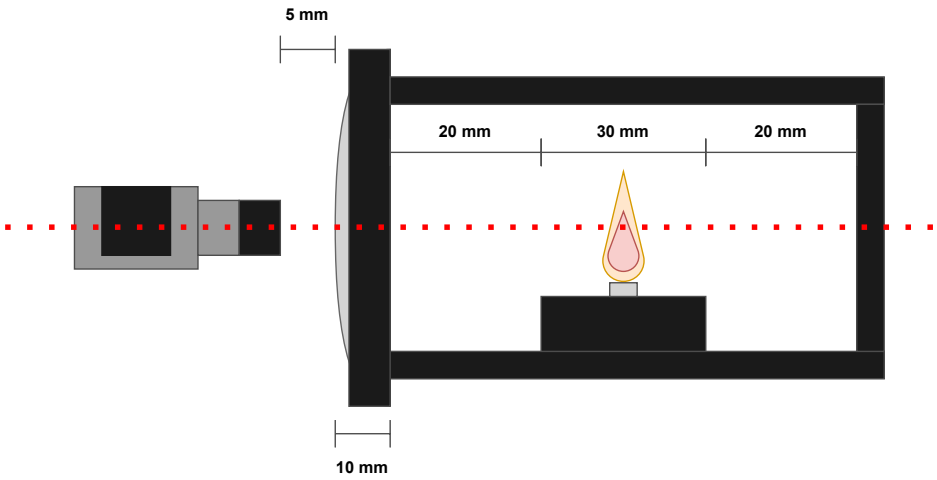


Figura 3.21: Vista lateral de la posición relativa de la cámara al quemador interno de la lámpara.

La distancia entre el quemador al interior de la galería y la parte externa de la lámpara están a una distancia de 45 *mm*, por lo que incluso si se posicionará la cámara con el lente contra el vidrio externo de la galería, la distancia recomendada por los autores del trabajo no sería realizable. De esta forma se fija la distancia entre el lente de la cámara y el plano donde se encuentra la flama, en 50 *mm*, lo que permite dejar un espacio de 5 *mm* entre el lente y la galería de la lámpara. El impacto de este cambio sobre la metodología original es analizado en el Capítulo 3.2.2

3.2.1. Elección cámara

Se propone utilizar una cámara `Basler`, modelo `acA 1920-50gc` para realizar el registro de la progresión de la prueba. Se toma esta decisión debido a que estas cámaras permiten un control amplio de los parámetros asociados a la imagen resultante, permitiendo desactivar funciones como autobrillo y tiempo de exposición automático, las cuales permiten garantizar la *repetibilidad* e invariabilidad de las condiciones en las que se registran los *frames* para una misma prueba. La cámara se configura utilizando los parámetros informados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros para la configuración de la cámara `Basler`.

Parámetro	Valor
Width	1920 *px*
Height	1200 *px*
Exposure Time	100 μs
Exposure Auto	*Off*
Gain(Raw)	0
Gain Auto	*Off*
White Balance	*Off*
Frame rate	20 *fps*
Output Format	Tiff
Configuration Set Selector	*Color RAW*

El *Exposure Time* es determinado de manera experimental, se hace una progresión de prueba con los combustibles a utilizar, iterativamente se va ajustando el valor del tiempo de exposición a uno que permita que la cámara no se encuentre saturada. Esta saturación se analiza mediante el histograma provisto por el *software* de la cámara, `Pylon Viewer`. De esta forma para las mezclas evaluadas el valor se fijo en 100 μs.

Se utiliza la configuración *Color RAW*, dado que permite desactivar procesamientos de corrección [31] realizados sobre los *frames* capturados. De esta forma se desactiva *LightSourceSelector*, impidiendo que se realice correcciones de color dependiendo de la fuente de luz que es utilizada, *BalanceRatioAbs* apagando el balance de blancos que altera la intensidad de los canales RGB de la imagen y *GammaEnable/GammaSelector*, evitando que se realice una corrección Gamma sobre la imagen.

Para la configuración de la cámara y la captura de imágenes durante los procedimientos de medición se utiliza el *software* provisto por el fabricante de la cámara, `Pylon Viewer`.

3.2.2. Conversión Píxeles a Milímetros

El cambio realizado sobre la distancia entre el plano de la flama y la cámara tiene un impacto directo sobre la conversión de píxeles a milímetros, en relación a la transformación propuesta por los autores, la cual ya se veía afectada por el cambio en el modelo de cámara. Se propone una nueva metodología para obtener la relación entre píxeles y milímetros, basada en el uso de un *patrón de tablero (checkerboard)*. Este patrón corresponde a un grilla de cuadrados alternados de blanco y negro, similar a un tablero de ajedrez o damas, donde cada recuadro es de un tamaño conocido. Para este experimento se define una grilla donde cada recuadro tiene un lado de 10 *mm*. El patrón definido se muestra en la Figura 3.22.

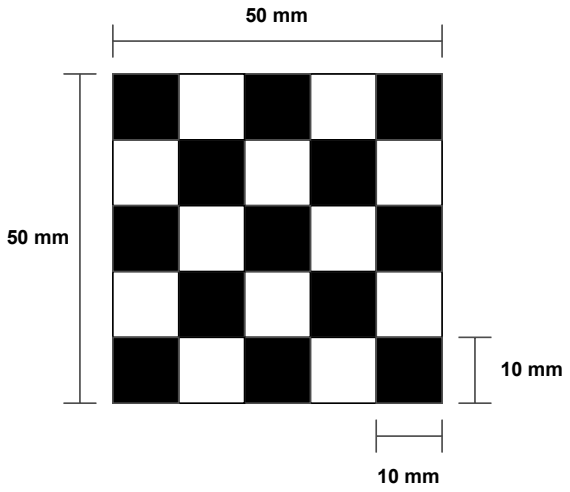


Figura 3.22: Patrón diseñado para la obtención de la relación píxel a milímetros.

El patrón es posicionado en el plano donde normalmente estaría la flama al interior de la galería, como se muestra en la Figura 3.23. Mediante una captura realizada por la cámara, se obtiene la vista del patrón, la cual es analizada para obtener la relación entre el tamaño en píxeles de cada uno de los recuadros y su tamaño real.

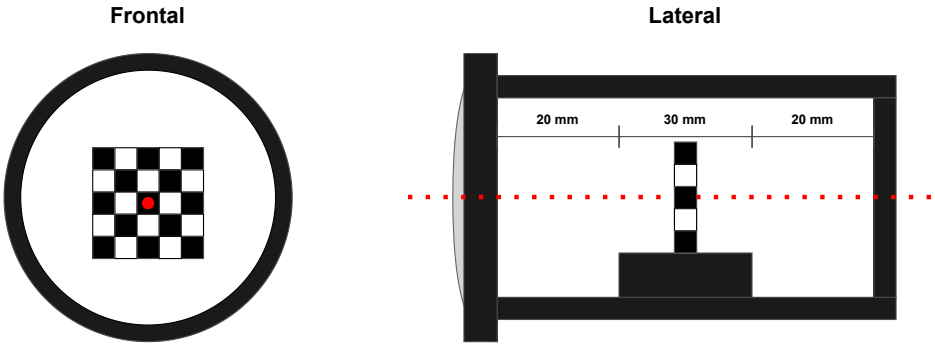


Figura 3.23: Ubicación del patrón al interior de la galería de la lámpara. En la vista frontal, un punto rojo es posicionado en la grilla que corresponde al centro de la cámara. En la vista lateral, una línea roja representa el eje vertical de alineación entre el patrón y el centro de la cámara.

En la Figura 3.24 se muestra el resultado de la captura obtenida para el patrón al interior de la lámpara, utilizando esta imagen se mide cada uno de los recuadros para obtener su alto y ancho en píxeles. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 3.25.

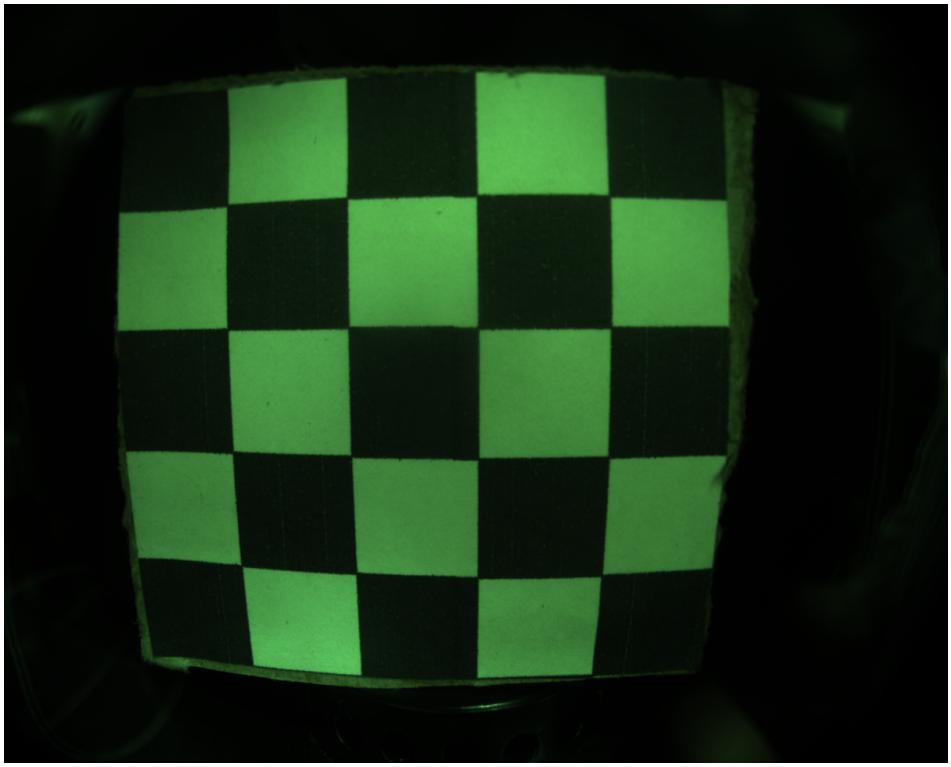


Figura 3.24: Captura del patrón observado mediante la cámara

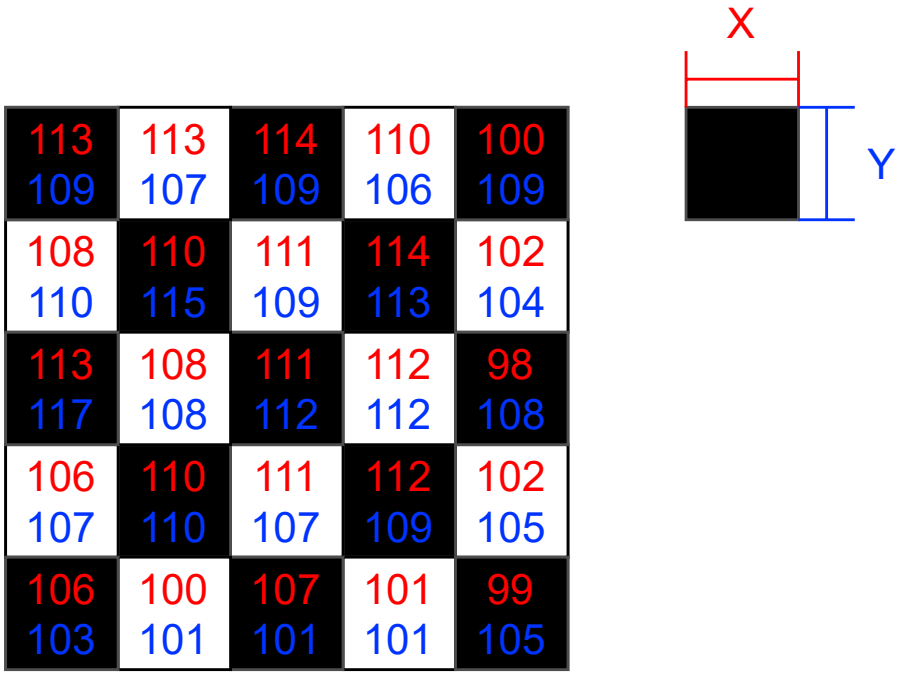


Figura 3.25: Resultados de análisis de recuadros del patrón utilizado. El ancho de cada cuadro se denota con rojo y el alto con azul.

Con los resultados de ancho y alto para cada recuadro del patrón, se calcula el promedio y la desviación estándar, de forma de obtener la relación de conversión entre píxeles y milímetros. Los resultados de este análisis se registran en la Tabla 3.5 y en la relación expresada en la Ecuación (3.16).

Tabla 3.5: Resultados para el análisis de ancho y largo de los recuadros del patrón de calibración

Promedio px	Desviación Estándar px
107.76	4.62

$$h \text{ mm} = \frac{10 \text{ mm}}{107.76 \text{ px}} \cdot h \text{ px} \tag{3.16}$$

3.2.3. Mezclas de Combustible a Evaluar

Para la prueba se utilizan dos mezclas de combustibles compuestas de tolueno e isooctano (2,2,4-trimethylpentane), cuyo *SPH* se encuentra tabulado en el estándar[7]. De esta forma se tendrán valores de referencia con los que comparar los resultados obtenidos mediante el algoritmo y de forma visual. Las mezclas se detallan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Mezclas de combustible a utilizar para los procedimientos sobre la lámpara estandarizada.

Mezcla #	Tolueno (% V/V)	Isooctano (% V/V)	*SPH* *mm* a 101.3 *kPa*
1	20	80	22.7
2	15	85	25.8

3.2.4. Procedimiento experimental

El procedimiento a realizar, para cada muestra, consiste de los siguientes pasos:

1. La muestra de prueba es cargada en la lámpara de acuerdo a las indicaciones del estándar. Se enciende la mecha y se ajusta de forma de establecer una flama con altura de aproximadamente 10 *mm*. Se espera un tiempo de 5 minutos.

2. Al cabo de este tiempo, mediante el *software* `Pylon Viewer` se procede a iniciar la captura de imágenes.

3. Se realiza la progresión de la flama como está definido en el estándar, pasando por las etapas definidas en la Figura 2.5.

4. Una vez que se ha realizado la progresión de la flama y el operador ha identificado y registrado el *SPH* desde su perspectiva se da por finalizada la toma de imágenes mediante el *software* `Pylon Viewer`.

5. La flama es vuelta a su altura inicial de aproximadamente 10 *mm*.

[7] Corresponden a mezclas de calibración

6. El procedimiento, comenzando desde el primer punto es repetido otras dos veces, para obtener un total de tres mediciones de SPH realizadas por el operador, así como también tres conjuntos de *frames* asociado a cada una de las iteraciones del procedimiento.

Para las mediciones obtenidas a partir de la prueba manual estandarizada, se obtiene las siguientes métricas:

- Se comprobará que la condición de variabilidad ΔSPH definida en la Ecuación (2.2), se cumpla entre mediciones para la ronda de medición.
- El valor de *smoke point* (SPH) será obtenido para cada ronda de medición, de acuerdo a la definición del estándar expresado en la Ecuación (2.4), considerando un factor de corrección unitario para la lámpara. Se computa el error porcentual entre el valor encontrado y el definido en el estándar para el SPH.
- Para los casos posibles de las mezclas analizadas (que posean más de una ronda de medición), la *repetibilidad* (r) entre iteraciones de la prueba estandarizada será calculada de acuerdo a la Ecuación (2.5) y comparada con el valor obtenido a partir del estándar.

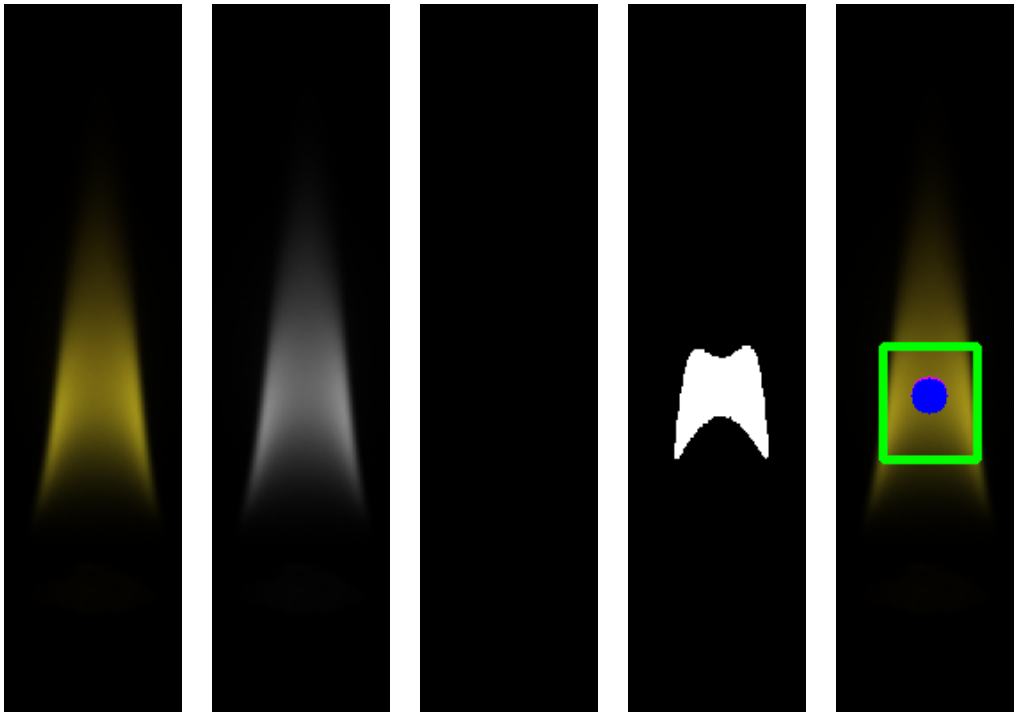
A partir de las mediciones obtenidas mediante el algoritmo replicado y considerando que el algoritmo solo requiere una única progresión para caracterizar el valor del SPH, cada medición puede ser considerada como independiente, se obtienen las siguientes métricas:

- El valor del *smoke point* (SPH) corresponde al valor entregado por el algoritmo replicado. Se computa el error porcentual entre el valor obtenido y el recuperado en el estándar.
- La variabilidad ΔSPH para una misma ronda de medición es calculada, a modo de tener una comparación más directa con la metodología manual definida en el estándar.
- La métrica de *repetibilidad* (r) es caracterizada para cada medición independiente que corresponde a una misma ronda de una mezcla, de acuerdo a su desviación estándar-

3.2.5. Calibración Algoritmo

Evaluaciones preeliminares sobre el algoritmo replicado en imágenes obtenidas de los combustibles de prueba dan cuenta de una problemática asociada a los umbrales utilizados en la caracterización de las regiones de interés de la flama, así como también para la condición de identificación de la zona lineal, utilizada para encontrar explícitamente el *smoke point*.

Al utilizar los umbrales definidos por los autores para el análisis geométrico: 75 % del total de 255 para definir la región *flame core* y 35 % del total de 255 para definir la región *flame contour*. El algoritmo es incapaz de entregar resultados. La razón tras de esta falla aparente del procesamiento, se puede observar en la Figura 3.26.



(a) *Frame* original. **(b)** *grayscale*. **(c)** *flame core*. **(d)** *flame contour*. **(e)** Regiones resaltadas.

Figura 3.26: Ejemplo del procesamiento de un *frame* analizado correspondiente a la mezcla #1.

Recordando los pasos que realiza el algoritmo, el *frame* a analizar es convertido a escala de grises (Figura 3.26b), posteriormente se realiza la aplicación de los umbrales para separar cada región (Figura 3.26c y 3.26d). Es en este punto que ocurre el problema, para el valor de umbral

seleccionado para el *flame core*, no se encuentra ningún píxel cuya intensidad este por sobre esta cota, entregando como resultado una región vacía para el núcleo de la flama, como se observa en la Figura 3.26c. En el caso de la región *flame contour*, que debiese representar el contorno de la flama, aparece como una región pequeña en torno al centro de la llama. Esta caracterización incorrecta impide que el algoritmo realice el análisis de la geometría de la flama, por lo que no se puede determinar la *flame tip height*.

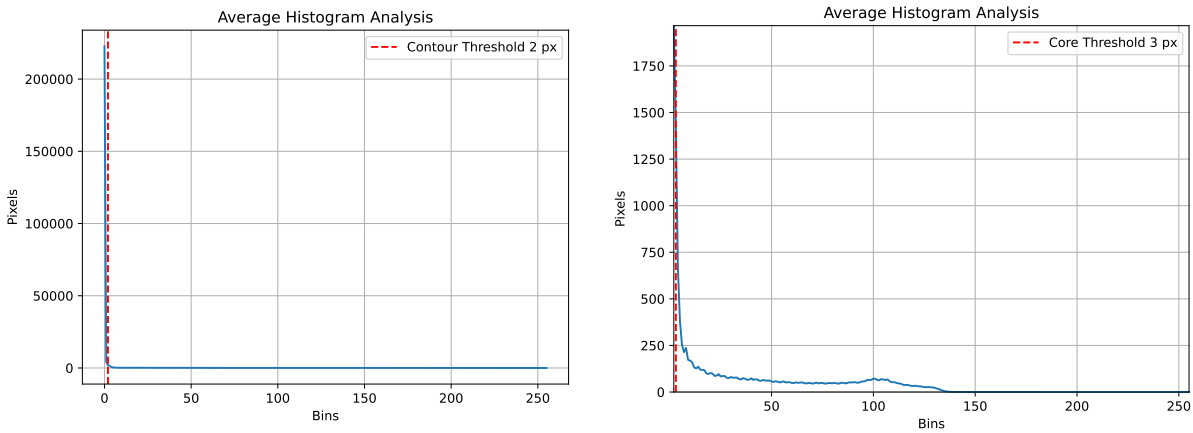
Estos resultados coinciden con las inquietudes encontradas durante el análisis del trabajo [5], que apuntaban a que dado el carácter experimental de los valores umbral y la falta de una rutina de calibración que permitiese generalizar los valores para otro tipo de cámaras, la elección utilizada por los autores podría no definir de forma correcta las regiones de interés. Estos resultados se replican para todas las mezclas analizadas. Como una posible solución a la incorrecta caracterización de las regiones de la flama, se propone definir un procedimiento de calibración, que será realizado para cada medición de las mezclas a analizar.

Este procedimiento se define mediante los siguientes pasos:

- **Calibración umbrales geométricos**: Para cada ronda de medición de una mezcla de combustible, los umbrales de las regiones de interés serán determinados mediante el análisis de histograma de intensidades promedio de todos los *frames* asociados a cada *trial* de la prueba. Esto significa que para cada imagen obtenida de un *trial* se obtiene el histograma de intensidad del *frame* especifico y este se suma al resultado para los otros *frames*, finalmente dividiendo por el total de imágenes asociadas a la medición. Se analiza los histogramas resultantes para cada *trial* para poder caracterizar
  - ***flame contour***: La región representa el contorno de la flama, en otras palabras tiene la tarea de separar lo que se considera fondo de lo que corresponde efectivamente al cuerpo de la llama. Considerando que en su mayoría la imagen corresponderá a píxeles cuya intensidad esté cercana a cero y que corresponde al *background*, se determina de manera experimental que se puede definir un criterio que fije el umbral para el contorno de un *trial*, en el primer *bin* del histograma promedio donde el incremento en la participación de los píxeles en relación al total de la imagen sea menor al 1 %.

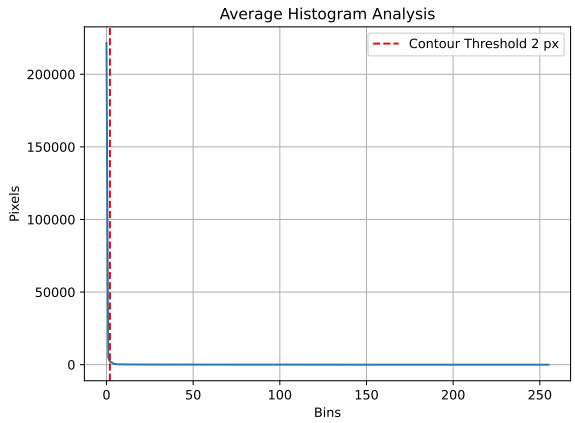
– ***flame core***: La región representa el área que concentra la mayor intensidad lumínica de la flama. Para determinar el umbral de esta región, a partir de los histogramas obtenidos previamente, se analiza el porcentaje de representación de cada *bin*, sobre el total de píxeles que representan el *flame contour*, se determina de manera experimental que la región se puede caracterizar utilizando un 70 % de los píxeles que conforman el contorno.

Como para cada ronda de medición se tienen tres *trial*, el umbral seleccionado corresponderá al promedio entre los tres valores resultantes. Se procede a analizar como ejemplo, el procedimiento de determinación de umbrales por histograma sobre la Ronda A de la Mezcla #1. Para cada uno de los *trials* de la ronda, se obtienen los histogramas asociados al contorno y núcleo, estos se registran en las Figuras 3.27, 3.28 y 3.29.

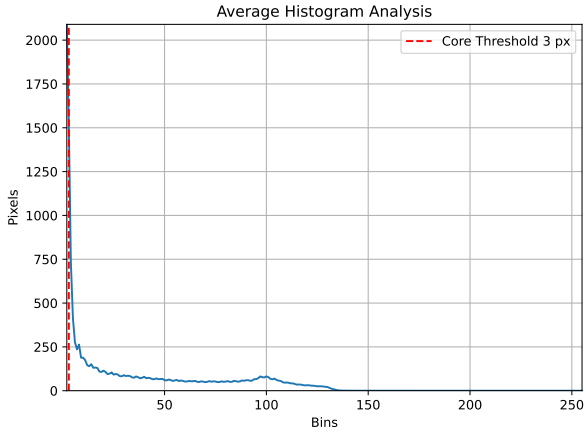


(a) Histograma promedio asociado al contorno. **(b)** Histograma promedio asociado al núcleo.

Figura 3.27: Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* I, Ronda A, de la Mezcla #1.

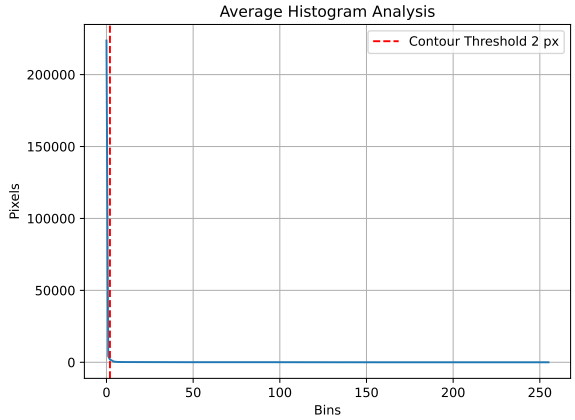


(a) Histograma promedio asociado al contorno.

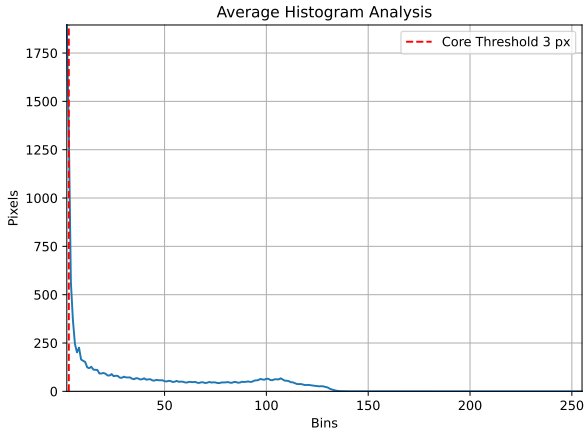


(b) Histograma promedio asociado al núcleo.

Figura 3.28: Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* II, Ronda A, de la Mezcla #1.



(a) Histograma promedio asociado al contorno.



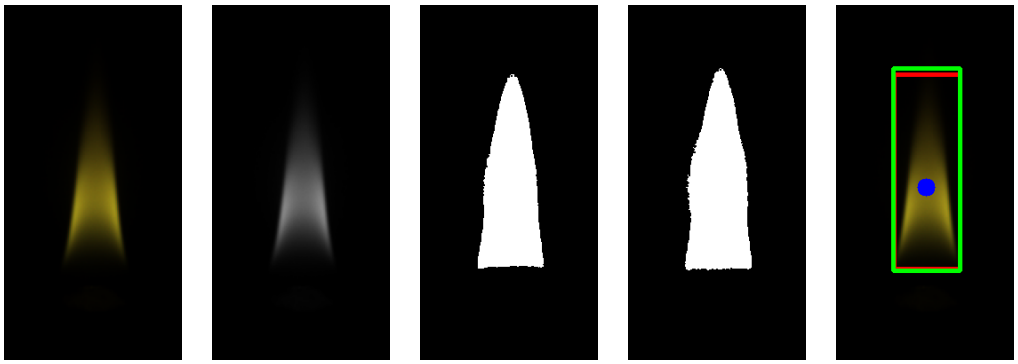
(b) Histograma promedio asociado al núcleo.

Figura 3.29: Histograma promedio obtenido para la progresión correspondiente al *trial* III, Ronda A, de la Mezcla #1.

Se registran los umbrales obtenidos para cada *trial* así como el promedio final, en la Tabla 3.7. Se procede a analizar un caso de ejemplo mediante el procesamiento realizado por el algoritmo con los nuevos umbrales, en comparación al erróneo obtenido originalmente en la Figura 3.26. El resultado de la aplicación de los nuevos valores umbral se puede observar en la Figura 3.30.

Tabla 3.7: Umbrales obtenidos a partir de calibración para Mezcla #1, Ronda A.

Trial	*flame core px*	Promedio *px*	*flame contour px*	Promedio *px*
I	3		2	
II	3	3	2	2
II	3		2	



(a) *Frame* original. **(b)** *grayscale*. **(c)** *flame core*. **(d)** *flame contour*. **(e)** Regiones resaltadas.

Figura 3.30: Ejemplo del procesamiento con umbrales *flame core* = 3 y *flame contour*=2 para un *frame* analizado correspondiente a la Ronda A, del *trial* I, para la Mezcla #1.

- **Calibración condición zona lineal:** El siguiente problema encontrado al momento de procesar las imágenes, es la condición para definir la zona lineal. Esta zona es obtenida a partir de la segunda derivada del polinomio que relaciona la altura del contorno de la flama con la altura de su punta, formalmente definida en la Ecuación (2.12). Al realizar el análisis gráfico para la Ronda A de la Mezcla #1, como se denota en las Figuras 3.31, 3.32 y 3.33, se puede comprobar que existe una zona que muestra una relación lineal entre las variables h y H, sin embargo, la segunda derivada de esta zona está muy por sobre el umbral definido en la Ecuación (2.12).

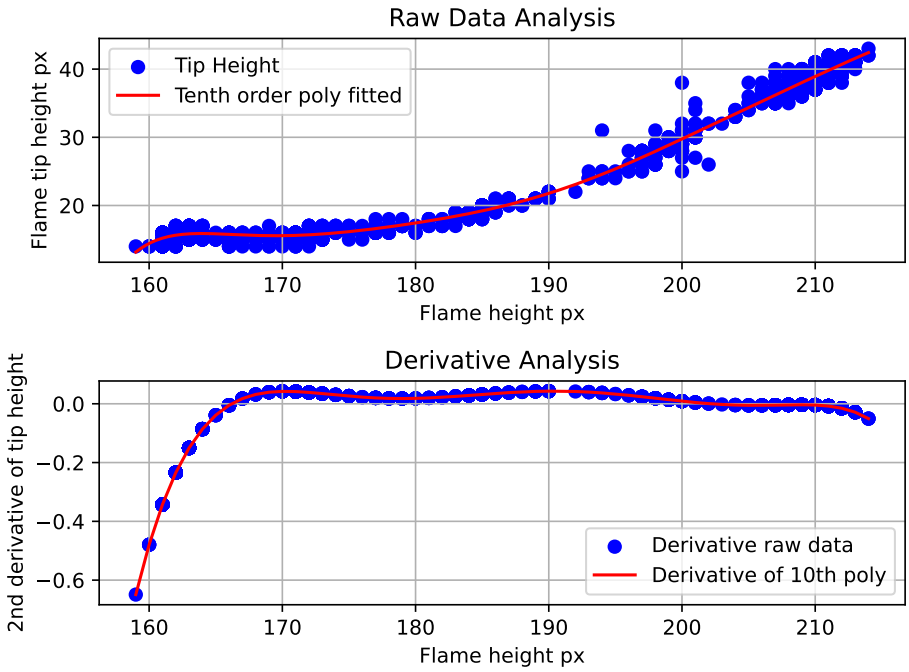


Figura 3.31: Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* I.

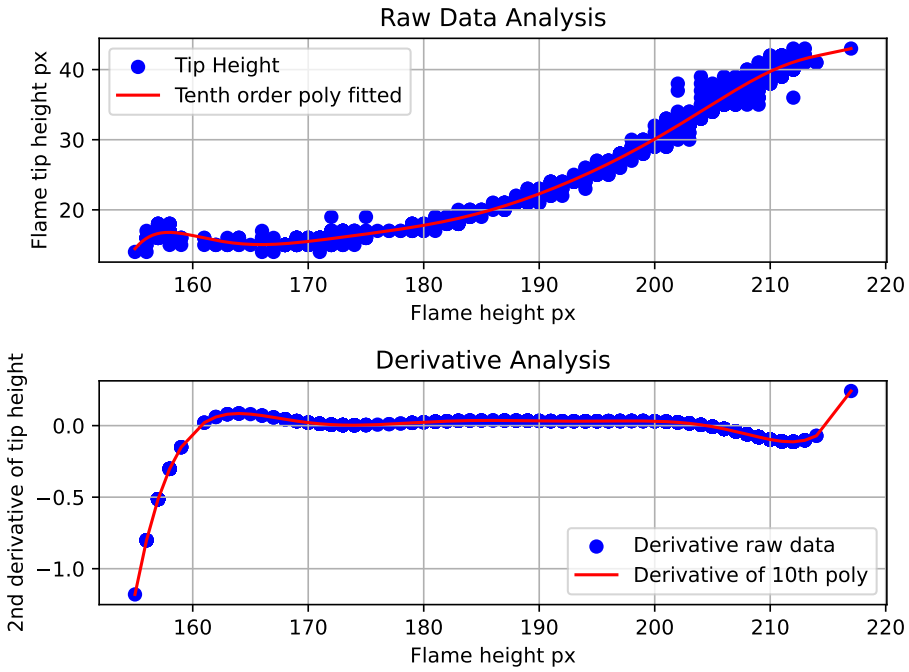


Figura 3.32: Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* II.

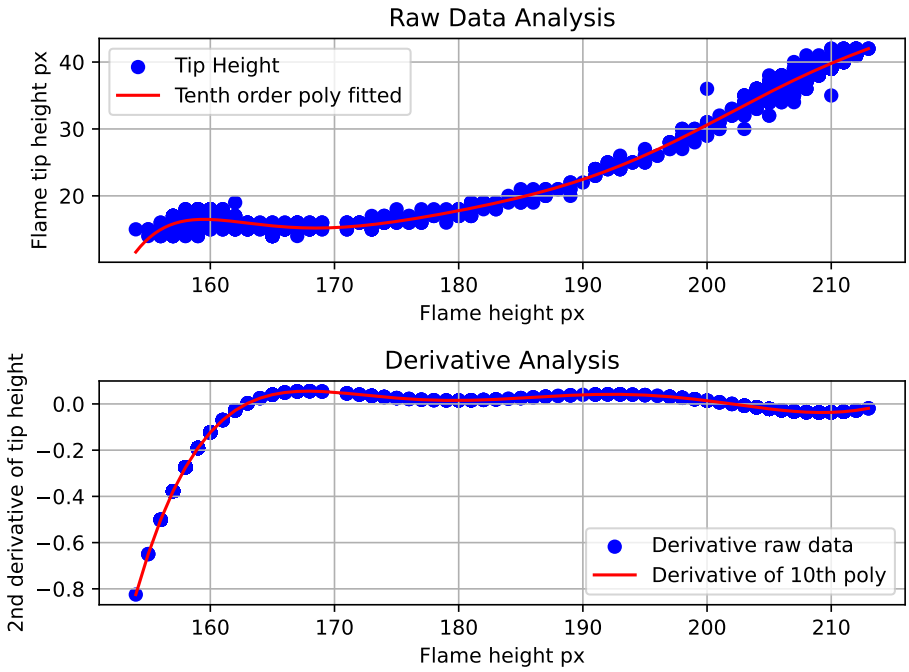


Figura 3.33: Análisis de la región lineal para la mezcla #1 *trial* III.

Mediante un análisis gráfico, realizado sobre todas las mezclas evaluadas, se puede identificar de forma experimental que el rango que acota la zona lineal es aproximadamente 0.053, de esta forma puede redefinirse la zona lineal como se indica en la siguiente expresión:

$$h : \left| \frac{\partial^2 H(h)}{\partial h^2} \right| \leq 5.3 \cdot 10^{-2} \tag{3.17}$$

El resumen de los cambios realizados sobre el algoritmo se puede encontrar en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resumen de los cambios realizados sobre el algoritmo.

flame core	*flame core* %	*flame contour*	*flame contour* %	Umbral Región Lineal
3	1.2	2	0.8	0.053

4. Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del experimento propuesto en el Capítulo 3.2. En primer lugar se analizan los resultados obtenidos mediante la metodología manual definida en el estándar, verificando el error obtenido para los valores de *SPH* estimados, la verificación de la variabilidad entre las mediciones realizadas, como también la *repetibilidad* en los casos donde la cantidad de mediciones realizadas sobre la mezcla de combustible lo permita. En segundo lugar se analizan los resultados obtenidos mediante la evaluación del algoritmo replicado [5], indicando los umbrales obtenidos para las regiones geométricas por la rutina de calibración para cada mezcla evaluada. Los valores obtenidos son analizados frente a las mismas métricas que la metodología manual estandarizada, error porcentual respecto al valor de *SPH* nominal, variabilidad de resultados en la ronda de medición y valores de *repetibilidad*.

En términos generales los resultados obtenidos dejan en evidencia que el algoritmo replicado [5] tuvo en general, un rendimiento inferior al obtenido mediante la metodología manual estandarizada. Hacia el final del capitulo, se realiza un análisis detallado por cada caso analizado por el algoritmo, que permite determinar las fuentes de error y complicaciones que se identificaron durante la estimación del *smoke point* para las mezclas evaluadas, que permiten explicar el comportamiento del algoritmo. Pese a estos resultados, se identificaron casos particulares donde el algoritmo funcionó de la manera que se esperaba con resultados que son comparables a los obtenidos mediante la metodología manual estandarizada en términos de error porcentual en la estimación del *SPH* y mejoras por sobre la prueba manual estandarizada para la variabilidad entre mediciones, de esta forma, abriendo la puerta a una futura evaluación en la que se corrijan o atanquen las problemáticas identificadas para el algoritmo replicado.

4.1. Prueba ASTM-D1322

Utilizando la prueba definida en el estándar [10] se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.9. Para cada ronda de medición se verificó que el rango de variación entre las mediciones obtenidas, ΔSPH en cada *trial*, no superará el umbral máximo definido por el estándar de 1 *mm*. También se calculó el error % directo entre el resultado promedio de la ronda en relación al valor encontrado en la literatura para cada mezcla. Finalmente, se calculó

la *repetibilidad* entre las rondas de medición A y B de la Mezcla #1. El valor definido por el estándar para r se obtiene de la siguiente forma:

$$r = 0.06480 \cdot \left(\frac{24.7 + 21.7}{2} + 16 \right) \approx 2.5 \ mm \tag{4.18}$$

$$\Delta \overline{SPH} = 3 \ mm \geq 2.5 \ mm \tag{4.19}$$

En la Ecuación (4.19) se realiza la comparación directa entre el valor de r obtenido de acuerdo al estándar y la variación entre los valores obtenidos de SPH para cada ronda. Por lo que se puede concluir que para estas mediciones se ha superado el umbral definido para la *repetibilidad* y por ende no debiesen ser consideradas válidas.

Tabla 4.9: Resultados de SPH mediante prueba estandarizada, registrador por operador.

Mezcla #	Ronda	Trial	SPH_i mm	ΔSPH mm	SPH mm	Error %	r mm
1	A	I	25	1	24.7	8.8	3
		II	25				
		III	24				
	B	I	21	1	21.7	4.4	
		II	22				
		III	22				
2	A	I	24.0	1	24.3	7.0	-
		II	24.0				
		III	25.0				

A partir de los datos mostrados en la Tabla 4.9, se puede notar que para las estimaciones de SPH realizadas, en nigún caso se supera el 10 % de error relativo.

4.2. Algoritmo replicado [5]

A partir de los experimentos realizados sobre la lámpara estandarizada se obtienen los siguientes datos en términos de imágenes del proceso de medición, Tabla 4.10. Mediante el análisis de los *frames* utilizando el procedimiento de calibración definido en la Sección 3.2.5, se encuentran los valores umbral para las regiones de interés detallados en la Tabla 4.11.

Tabla 4.10: Resumen de las imágenes obtenidas para cada mezcla de prueba

Mezcla #	Ronda	Trial	N# de *frames*
1	1	I	2332
		II	1931
		III	2520
	2	I	1479
		II	1692
		III	1990
2	1	I	3233
		II	3043
		III	2993

Tabla 4.11: Umbrales determinados para cada ronda de los combustibles probados.

Mezcla #	Ronda	*flame core* %	*flame contour* %
1	A	1.2	0.8
	B		
2	A	1.8	1.5

A partir de los umbrales obtenidos para las rondas, se procesan los dato de cada *trial*, para cada ronda, de cada mezcla de combustible. Los resultados son resumidos en la Tabla 4.12.

Para cada trial, el algoritmo entrega el *SPH* estimado en píxeles, la conversión a milímetros

se calcula mediante la relación determinada en la Ecuación (3.16), el valor es aproximado a la décima más cercana. El error del *SPH* en milímetros es comparado con el encontrado en la literatura, se calcula el error porcentual entre ambos. El valor de ΔSPH para cada ronda es calculado, para obtener una comparación más directa entre el método estandarizado y el algoritmo replicado. La *repetibilidad* de los resultados independientes (r), se calcula utilizando la desviación estándar para el conjunto de resultados *SPH*, de una misma mezcla.

Tabla 4.12: Resumen de los resultados obtenidos por el algoritmo.

Mezcla	Ronda	*Trial*	*SPH px*	*SPH mm*	ΔSPH *mm*	Error %	*r mm*
1	A	I	227	21.1	5	7 %	4.5
		II	226	21.0		7.5	
		III	174	16.1		29.1	
	B	I	119	11.0	0	51.5	
		II	119	11.0		51.5	
		III	117	11.0		51.5	
2	A	I	103	9.6	0.4	62.8	0.2
		II	102	9.5		63.2	
		III	99	9.2		64.3	

A partir de los datos reportados en la Tabla 4.12 se puede observar que en el peor de los casos para la mezcla #1 se tiene un error máximo del 51.5 %. En el caso de la mezcla #2 el error máximo tiene un valor de 64.3 %. Los mejores resultados para el valor de *SPH* se obtienen para la mezcla #1, en la ronda A y corresponden a los dos primeros *trials*, con un error menor al 8 %, siendo el único caso con valores de error comparables a las mediciones obtenidas por la metodología estandarizada. La variación del error obtenido para las rondas A y B de la mezcla #1, parece indicar que un cambio ocurrió entre las pruebas que impidió la correcta determinación del *SPH* en la ronda B. En términos de la variabilidad de las mediciones, se obtiene un ΔSPH máximo de 5 *mm*, para la mezcla #1 en la ronda A, y una valor menor o igual a 0.4 *mm* para los otros casos. Utilizando el criterio definido en el estándar para ΔSPH, solo la ronda A para la mezcla #1, supera el umbral establecido de 1 *mm* aceptado, por lo

que estas mediciones debiesen ser descartadas.

La diferencia de resultados entre la ronda A y B para la mezcla #1, puede ser explicada debido a problemas en la identificación de las regiones geométricas de la flama, asociada a la elección de umbrales, que tienen un impacto directo en los análisis realizado por el algoritmo, las causas y efectos de estas anomalías serán estudiadas en más detalle hacia el final de este capítulo donde se realiza un análisis por cada *trial*, de cada ronda, para cada mezcla.

Tabla 4.13: Diferencia absoluta entre pares de valores para las rondas evaluadas correspondientes a la mezcla #1.

	AI	AII	AIII	BI	BII	BIII
AI	0	0.1	5	10.1	10.1	10.1
AII		0	4.9	10	10	10
AIII			0	5.1	5.1	5.1
BI				0	0	0
BII					0	0
BIII						0

Tabla 4.14: Diferencia absoluta entre pares de valores para las rondas evaluadas correspondientes a la mezcla #2.

	AI	AII	AIII
AI	0	0.1	0.4
AII		0	0.3
AIII			0

En las Tablas 4.13 y 4.14 se registra la diferencia absoluta entre cada par de valores para la mezcla #1 y la mezcla #2 respectivamente. Los valores triviales, correspondientes a la evaluación de la diferencia de un *trial* con sí mismo, se reportan en color gris. Se han omitido los casos equivalentes, $|A - B| \equiv |B - A|$. Los valores que han superado la diferencia definida por r se destacan en rojo.

En el caso de la mezcla #1, se puede observar que de un total de quince *trials* comparados, se identifican once casos que superan la *repetibilidad* determinada para el experimento. Los mejores resultados se obtienen para el análisis sobre la ronda B, donde la variación entre *trials* es nula, la identificación se estabiliza en un valor fijo para las tres progresiones analizadas. En el caso de las ronda A, los resultados indican que principalmente para el *trial* III, la variación entre resultados supera el umbral, esto concuerda con los errores de identificación del *SPH* que se determinaron para el análisis realizado por el algoritmo en esta prueba. El peor caso se determina para la evaluación de resultados entre rondas donde la variación excede el umbral en todos los casos. Esto se puede explicar dado el error asociado a la forma en que el operador realizó la progresión de la flama, lo cual tuvo un impacto directo en la funcionalidad del algoritmo para la ronda B.

Para la mezcla #2, de un total de tres *trials* comparados, se identifican dos casos que superan el umbral de *repetibilidad* determinado para la mezcla. Los peores resultados se obtienen para el *trial* III. Dado el funcionamiento anómalo del algoritmo para las progresiones registradas, la fuente específica de esta diferencia no puede ser identificada.

A continuación se realiza un análisis por *trial* para cada ronda y mezcla, de forma de poder verificar la validez de la estimación obtenida y poder determinar las posibles fuentes de error que afectaron el cálculo del *SPH*. Para ello se presentan los gráficos asociados a la estimación del *smoke point* para cada caso.

4.2.1. Mezcla 1, Ronda A, Trial I

El algoritmo se comportó de la forma esperada. Los datos obtenidos a partir de la progresión permiten realizar el ajuste del polinomio de forma correcta como se observa Figura 4.34. El análisis a partir de la segunda derivada cumple con los requisitos solicitados, la zona lineal se define en el intervalo donde el valor de es cercano a cero, como se observa en la área demarcada en rojo de la Figura 4.35. Finalmente el *smoke point* es caracterizado a un altura de 227 px $\equiv$ 21.1 mm, lo que si se compara de forma directa con el estándar conlleva un error porcentual del 7 %. En contraste con el valor obtenido mediante la prueba estandarizada, 24.7 *mm*, esta conlleva un error porcentual del 8.1 %. Lo que indicaría una mejora respecto a la metodología estandarizada en torno a la obtención del *SPH*.

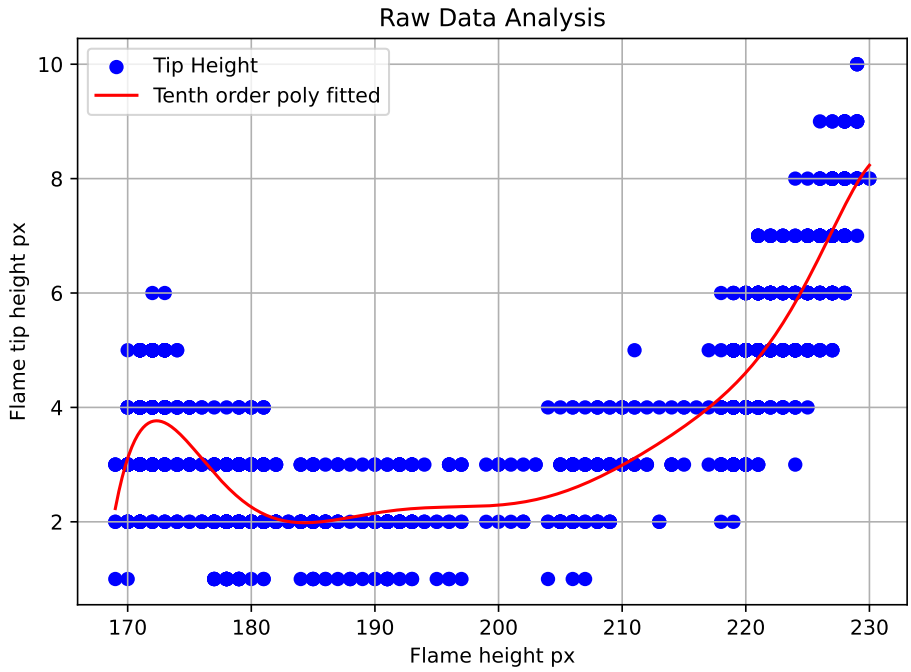


Figura 4.34: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

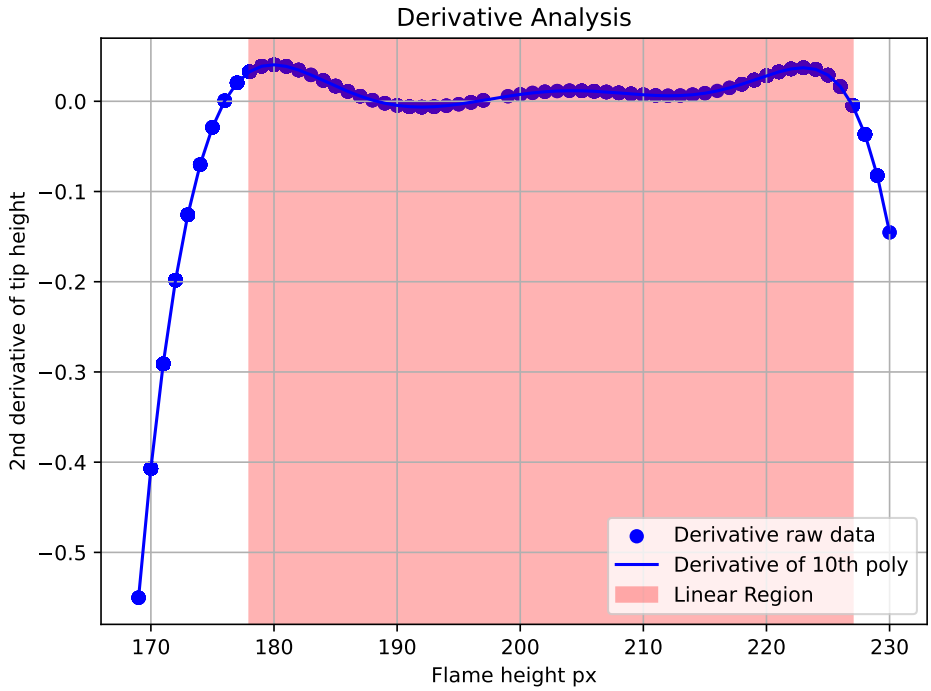


Figura 4.35: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

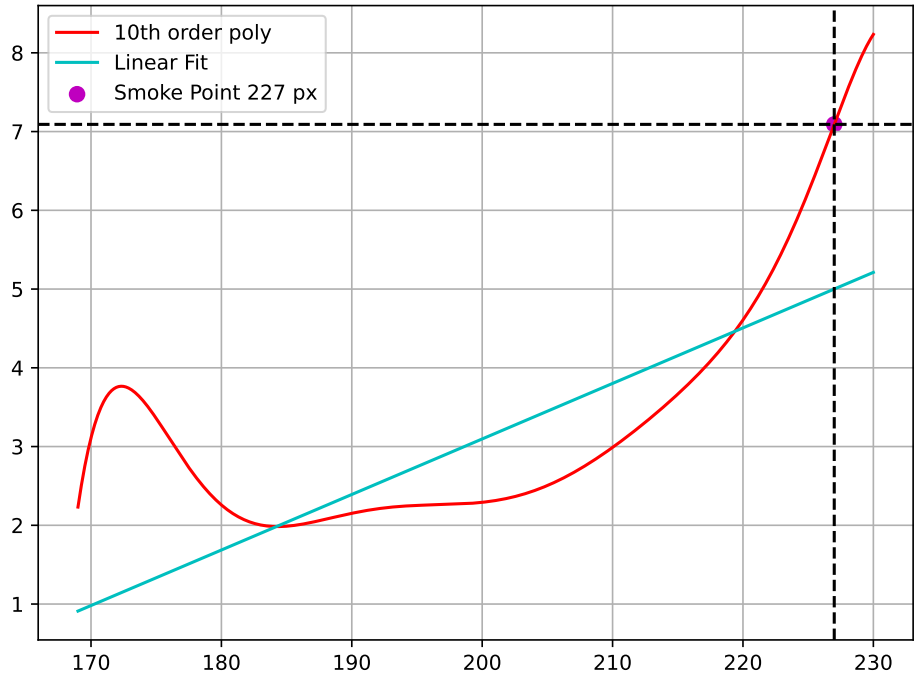


Figura 4.36: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.2. Mezcla 1, Ronda A, Trial II

En este caso el algoritmo mostró un comportamiento no esperado. Si bien los datos obtenidos a partir de la progresión permiten realizar el ajuste del polinomio de forma correcta como se ve en la Figura 4.37. Para el análisis de la segunda derivada la región lineal se encuentra acotada al comienzo de la curva, siendo que existen valores en torno a cero, en el intervalo de alturas de la llama entre 180 y 200 *píxeles*, que pareciesen pertenecer a la región. Esto puede deberse al control de la mecha realizada por el operador, dado que movimientos los suficientemente rápidos o bruscos, pueden generar que las alturas presenten una pendiente que no se comporte de forma lineal, lo que al aplicar la segunda derivada entrega valores que no están cercanos a cero y por ende no pertenecerían a la zona lineal. En la Figura 4.37 se puede ver esta situación en las alturas de flama indicadas por la región demarcada en rojo, cuando se comienza a definir la zona lineal, ocurre un aumento de los valores que sobrepasan el límite impuesto, para luego volver a decaer en torno a cero. Dado que el algoritmo está configurado para definir la zona lineal como el primer intervalo que cumpla con los requisitos, se hace una caracterización incorrecta de esta. Pese a esto, la curva obtenida para la zona lineal es muy

similar al caso anterior mostrado en la Figura 4.36, más aún, el valor inferido para el *SPH* es muy similar, 226 *px*, que corresponde a 21.0 *mm*, con un error respecto al *groundtruth* del 7.5 %. Nuevamente menor a la obtenida para el mismo *trial* mediante la prueba estandarizada, del 8.1 %.

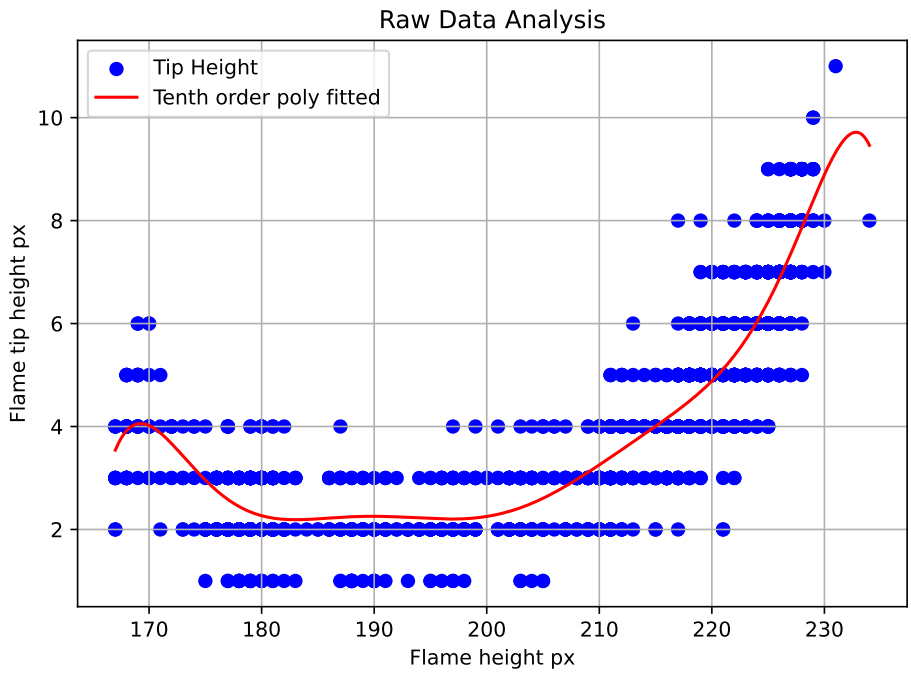


Figura 4.37: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

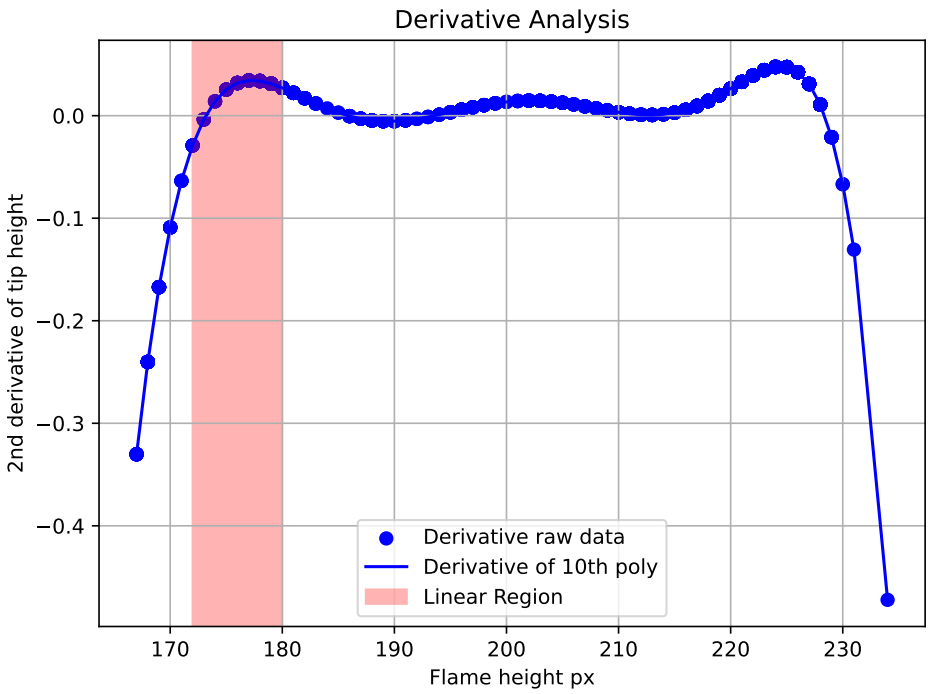


Figura 4.38: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

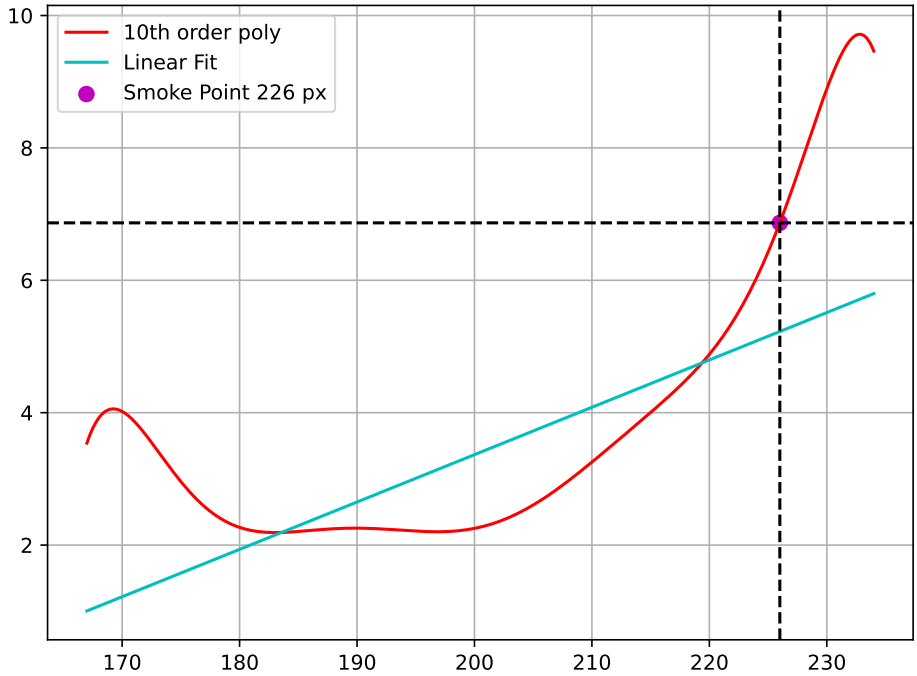


Figura 4.39: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.3. Mezcla 1, Ronda A, Trial III

El caso es muy similar al anterior. Existe una caracterización errónea de la zona lineal debido a cambios muy bruscos o rápidos durante el comienzo de la realización de la prueba, esto lleva a tener una zona lineal por tramos que ubica la recta lineal muy cerca del comienzo, llevando a identificar el SPH cerca de un valor de 174 px, equivalente a 16.1 mm. Comparando este valor con el *groundtruth*, se llega a un error porcentual del 29 %, un valor mayor que el obtenido para la prueba estandarizada, 8.1 %. En este caso el efecto de la identificación errónea de la zona lineal impacta de forma directa el resultado de la estimación del SPH, dado que como se define el *smoke point* como el primer valor de altura de la flama, h que evaluado en el polinomio ajustado a los datos $H(h)$, supera su valor en la recta $L(h)$ asociada a la región lineal, por un valor de 1 *píxel*. A partir del gráfico de la Figura 4.41 se puede identificar que la región lineal ocurre en el conjunto de puntos acotados entre 180 y 220 *píxeles*, utilizando la recta inferida en el gráfico de la Figura 4.42, para el intervalo encontrado, se puede identificar que el *smoke point* estaría ubicado entre los valores 220 y 230 *píxeles*, para la altura de la flama. De esta forma, se puede identificar que la sensibilidad del algoritmo a los movimientos del control de la mecha tienen un impacto directo en la forma en que es estima el SPH.

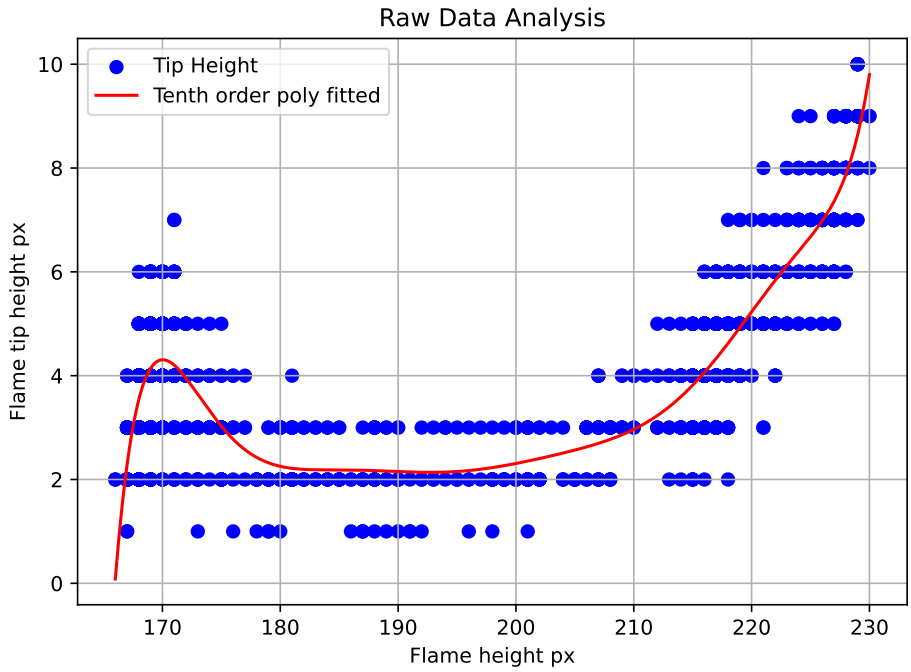


Figura 4.40: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

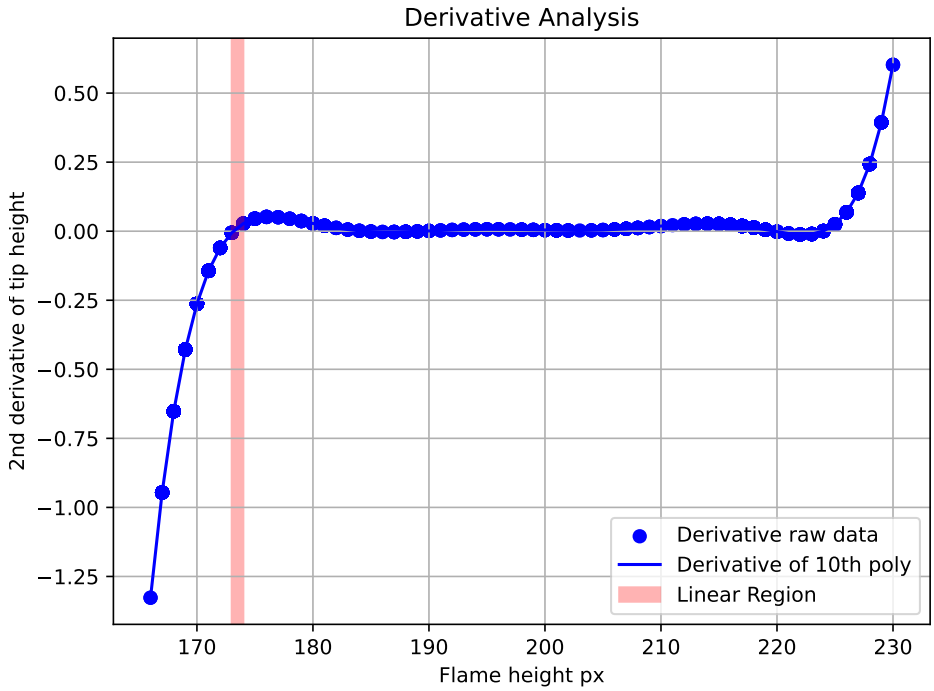


Figura 4.41: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

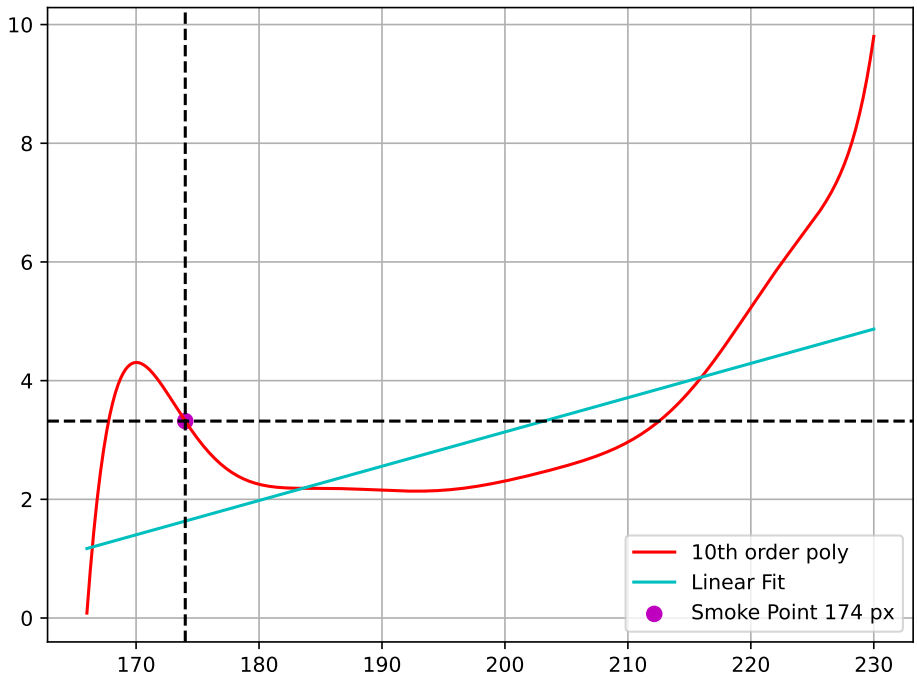


Figura 4.42: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.4. Mezcla 1, Ronda B, Trial I

Para este caso existe una anomalía clara en la progresión, para valores de altura en el rango de 120 a 160 píxeles, no se visualizan puntos y aparece una discontinuidad. Esto puede atribuirse a la elección de umbrales para la caracterización de las regiones. El valor umbral para la identificación de la región *flame contour* se determinó de acuerdo a las rutinas de calibración implementadas como el valor que permite separa la flama del fondo que principalmente consiste de píxeles con valores de intensidad cercanos a cero. El valor encontrado mediante el análisis de histograma, corresponde a una intensidad de dos (0.8 %), dada la cercanía de este valor a cero, cualquier cambio brusco en la intensidad lumínica de la flama de forma brusca, generará un salto en los valores estimados para la altura de la flama y el cálculo de la altura de la punta. Esta situación es agravada si existe un progresión muy rápida de la altura de la flama, que es lo que ocurre en el intervalo de 120 a 160 *píxeles*. En la Figura 4.46, se realiza un nuevo análisis del *trial*, utilizando valores umbrales más altos para la identificación de cada región geométrica de la flama, *flame contour* un valor de 2.5 % y *flame core* un valor de 3 %. De esta forma se logra identificar que en el rango de 120 a 160 *píxeles* una progresión rápida de la

flama fue realizada, lo que junto a la elección original de umbrales, genero la discontinuidad aparente de los datos observada en la Figura 4.43. El SPH se determina en 119 px, equivalente a 11.0 mm, lo que tiene un error porcentual asociado del 51.5 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 4.4 %. Esta diferencia entre los valores obtenidos para esta progresión y las analizadas para la ronda A, de la mezcla #1, es explicada en gran medida por la situación descrita anteriormente.

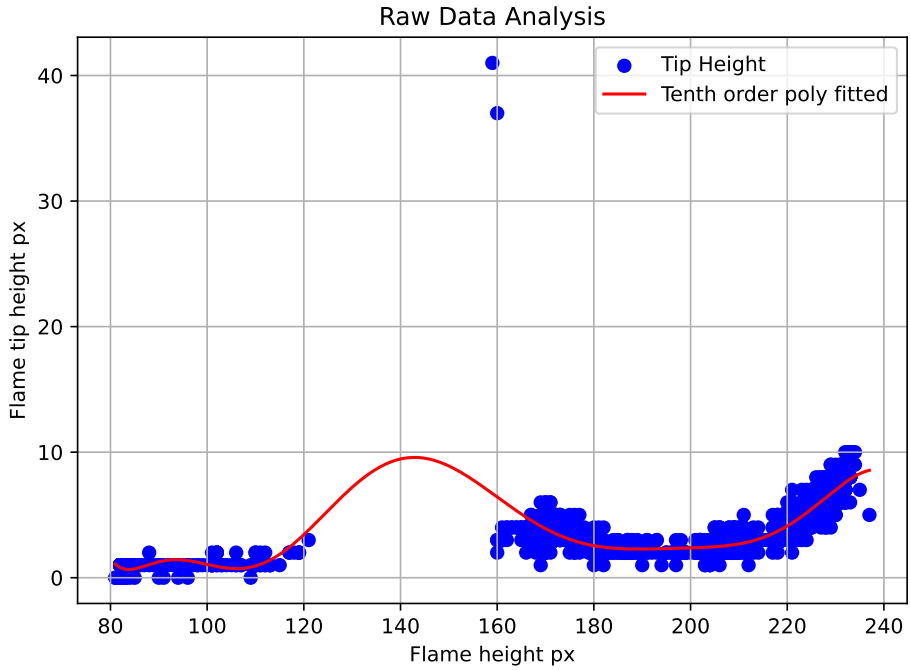


Figura 4.43: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

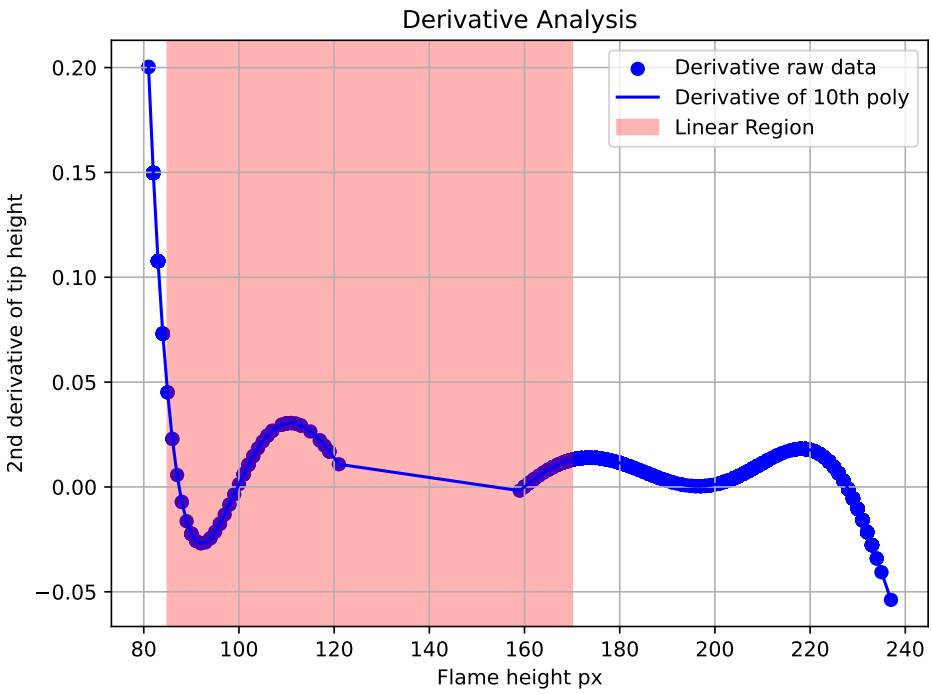


Figura 4.44: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

Otro efecto de la elección para los umbrales en la determinación de la zona lineal, es la secuencia en la que se evalúan los puntos. El algoritmo asume que la zona lineal se identificara siempre en un intervalo de alturas del contorno que cumpla $h_i < h_{i+k}$. En casos donde los valores umbrales generan alteraciones en la geométrica de la flama, se pueden identificar alturas para el contorno que no sigan la progresión de alturas esperada para la flama, pudiendo dar falsas alturas cuyo valor será menor al valor previo. Así, al momento de realizar el análisis para la determinación de la región lineal en la derivada, se puede encontrar puntos, que hagan que la zona lineal sea identificada en un intervalo inverso como ocurre en la Figura 4.44, esto es que se parte fijando la zona lineal en un valor aproximada para la altura del contorno de 170 *pixeles* y posteriormente sea analizado un valor de altura menor, cercano 85 *píxeles*, que al ser evaluados en la segunda derivada, registran la zona lineal de derecha a izquierda, generando un error en la identificación de esta.

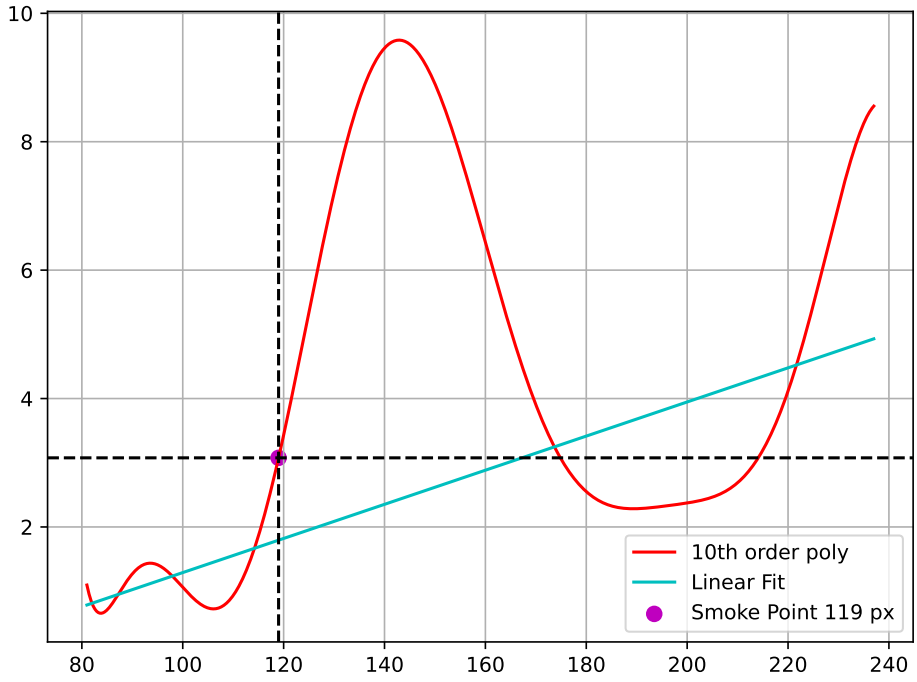


Figura 4.45: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

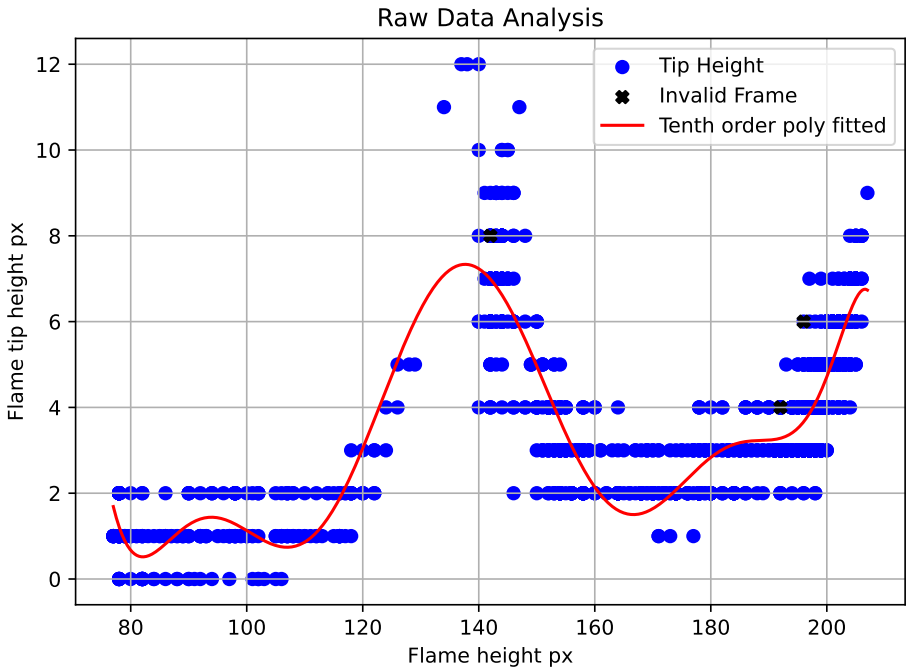


Figura 4.46: Análisis de la progresión para la mezcla #1, ronda B, *trial* I, utilizando valores umbral ajustados para la evolución rápida de la llama. *flame contour* = 2.5 %. *flame core*= 3 %.

4.2.5. Mezcla 1, Ronda B, Trial II

Se puede identificar la misma anomalía encontrada en el *trial* anterior, la principal explicación corresponde a la elección de umbrales en conjunto con una rápida progresión de la altura de la flama realizada por el operador. El *SPH* se determina en 119 *px*, equivalente a 11.0 *mm*, lo que tiene un error porcentual asociado del 51.5 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 4.4 %.

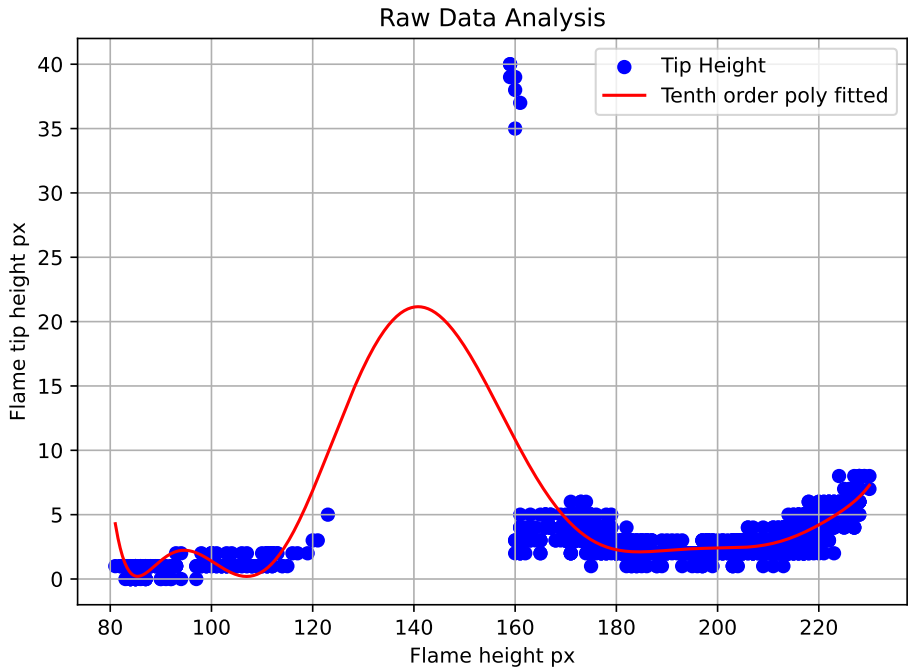


Figura 4.47: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

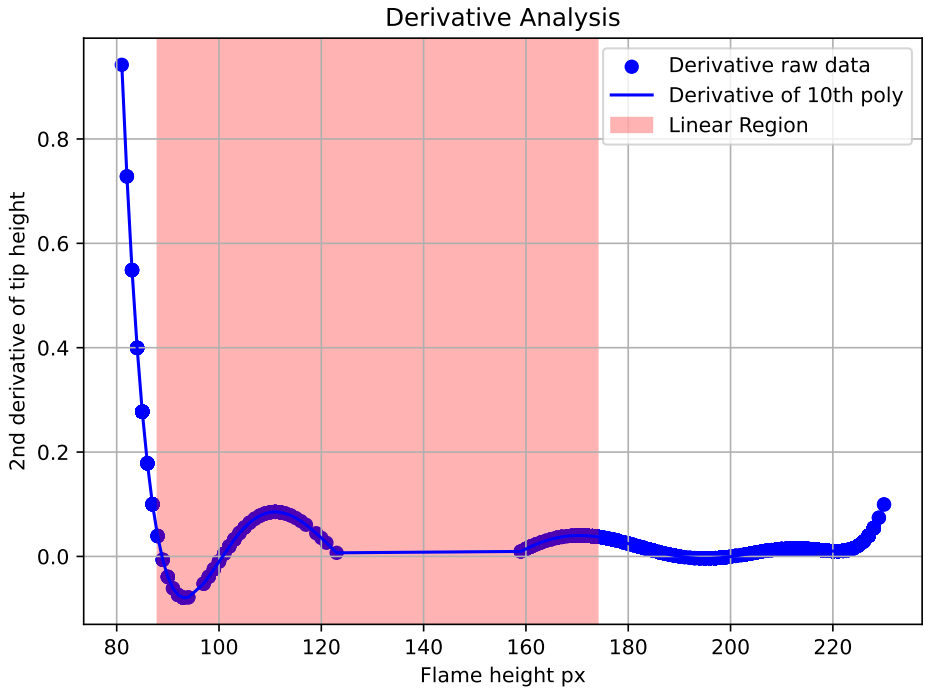


Figura 4.48: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

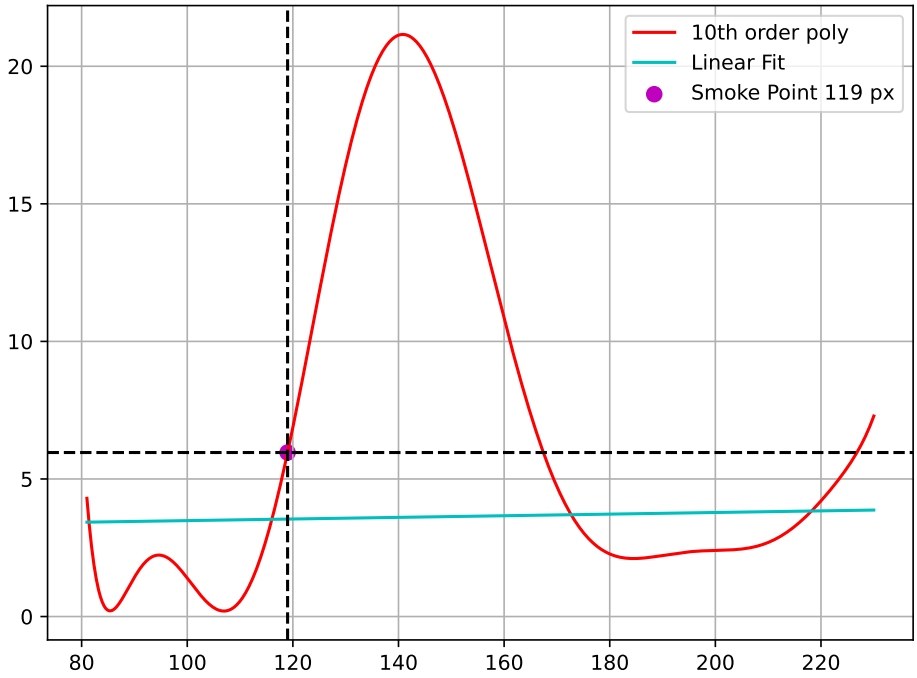


Figura 4.49: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.6. Mezcla 1, Ronda B, Trial III

Se puede identificar la misma anomalía encontrada en los *trials* anteriores, la principal explicación corresponde a la elección de umbrales en conjunto con una rápida progresión de la altura de la flama realizada por el operador. El *SPH* se determina en 119 *px*, equivalente a 11.0 *mm*, lo que tiene un error porcentual asociado del 51.5 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 4.4 %.

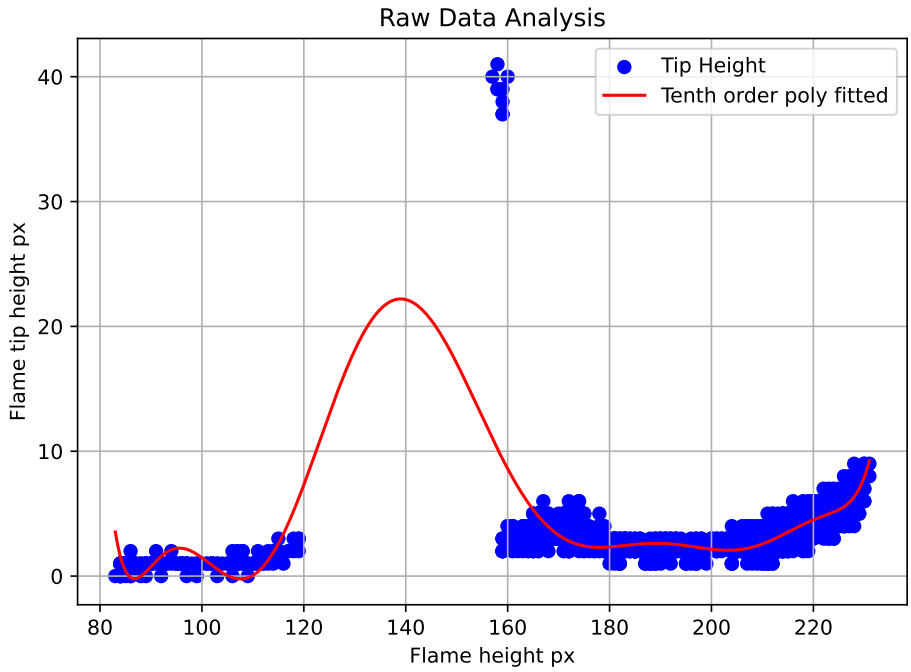


Figura 4.50: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

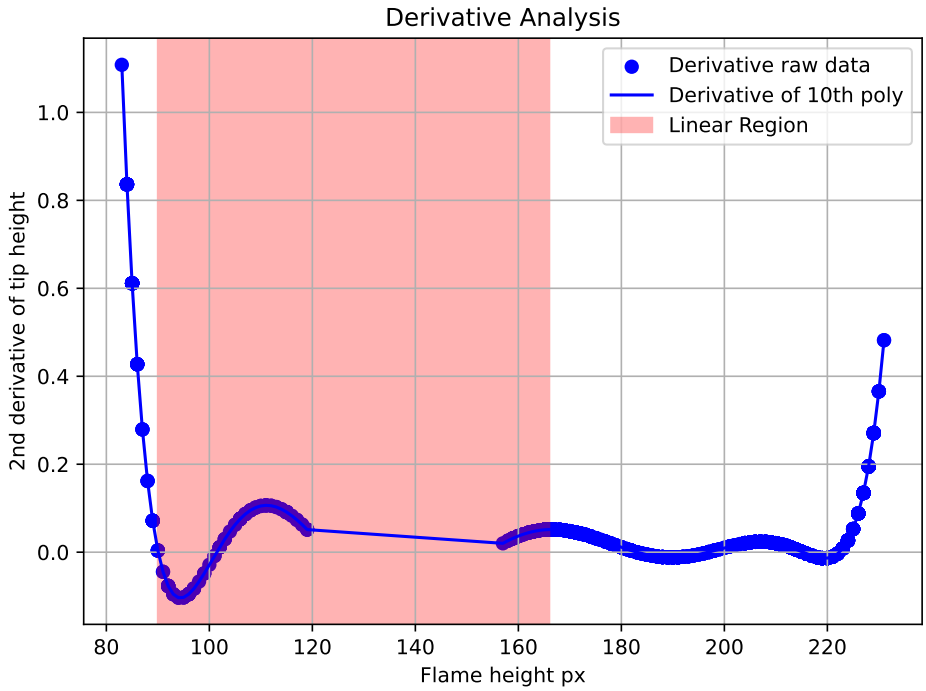


Figura 4.51: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

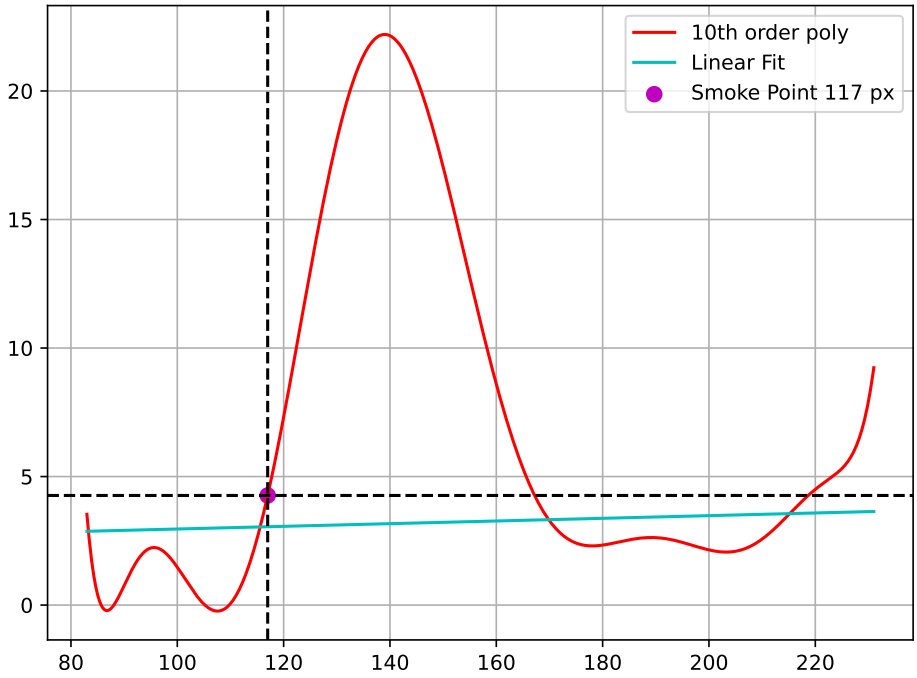


Figura 4.52: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.7. Mezcla 2, Ronda A, Trial I

El comportamiento anómalo puede ser rastreado a las mismas causas que el encontrado en el análisis de la ronda B de la mezcla#1. El *SPH* se determina en 103 *px*, equivalente a 9.6 *mm*, lo que tiene un error porcentual asociado del 62.8 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 7.0 %.

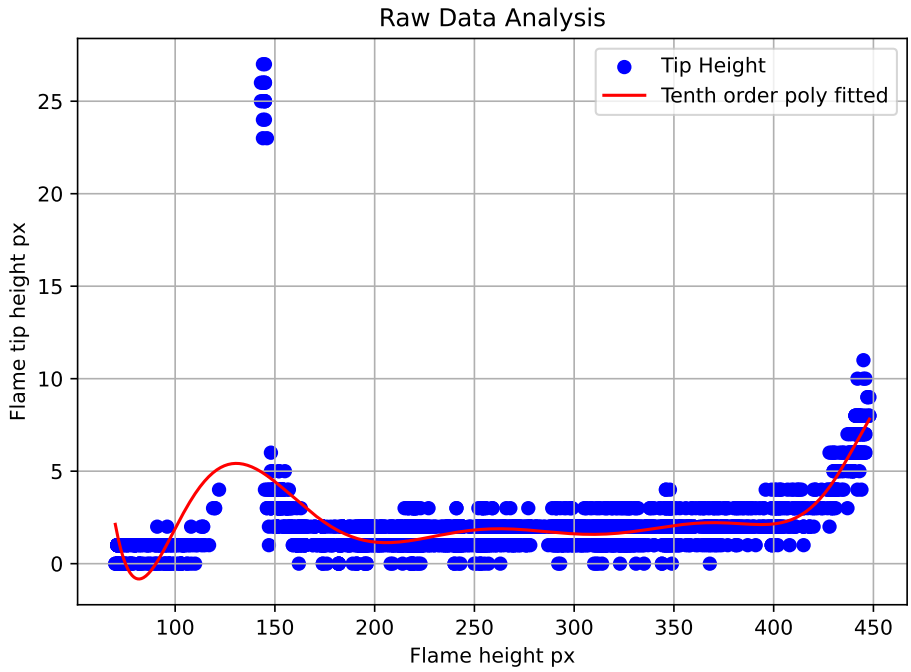


Figura 4.53: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

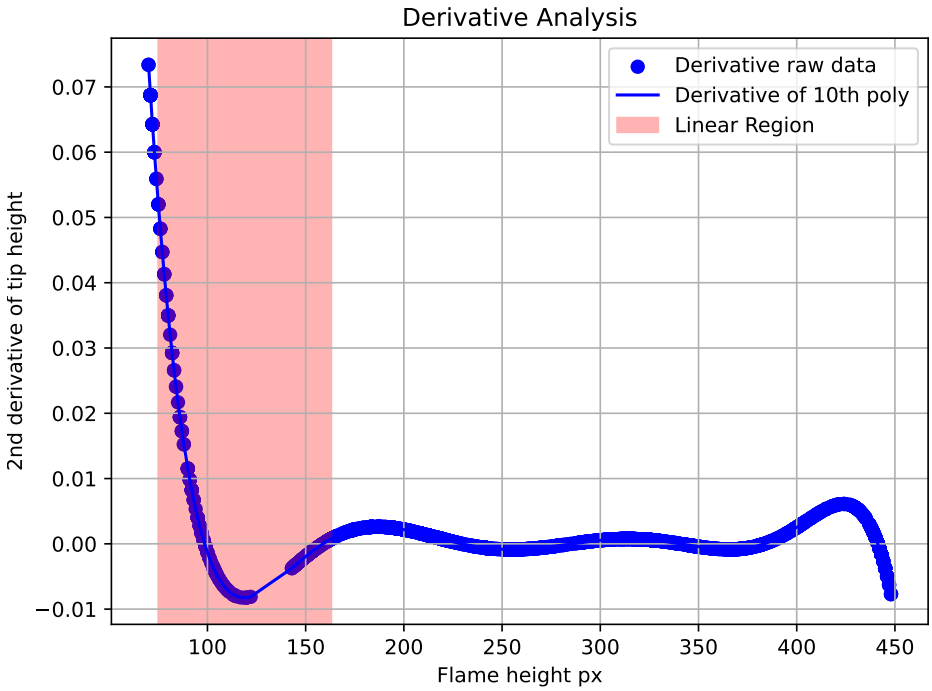


Figura 4.54: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

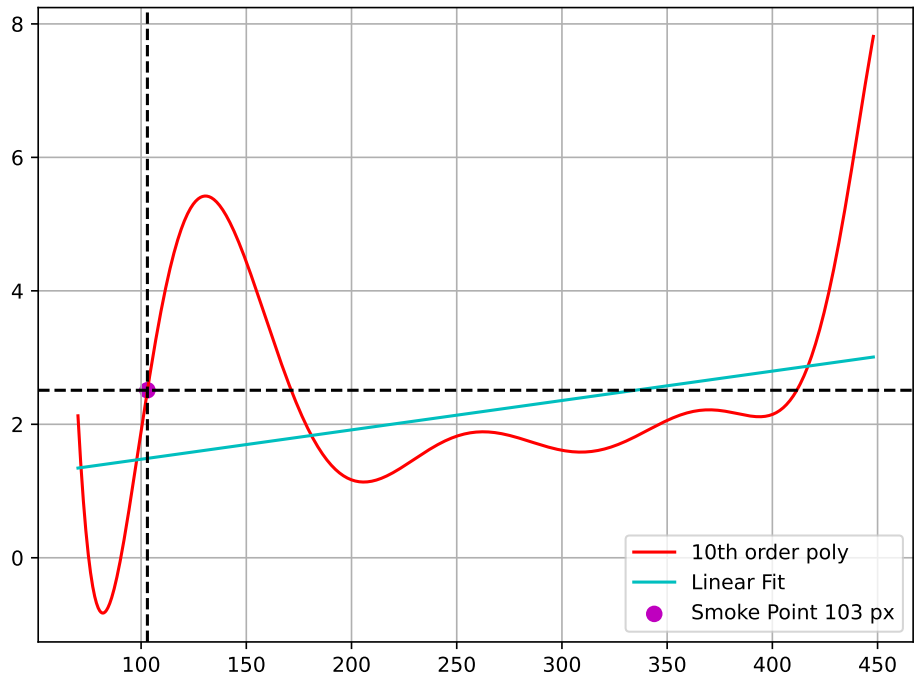


Figura 4.55: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.8. Mezcla 2, Ronda A, Trial II

El comportamiento anómalo puede ser rastreado a las mismas causas que el encontrado en el análisis de la ronda B de la mezcla#1. El *SPH* se determina en 102 *px*, equivalente a 9.5 *mm*, lo que tiene un error porcentual asociado del 63.2 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 7.0 %.

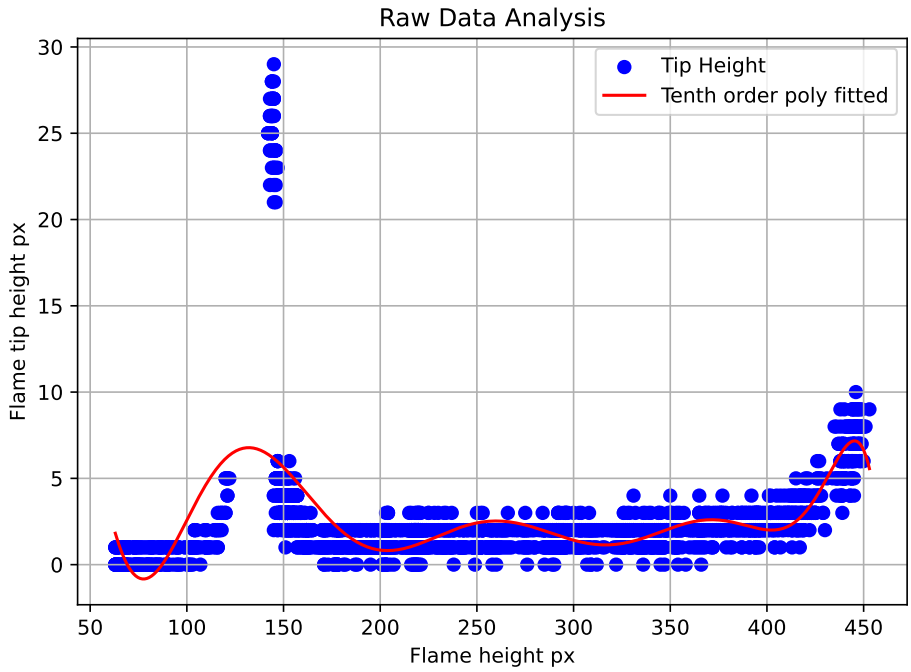


Figura 4.56: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

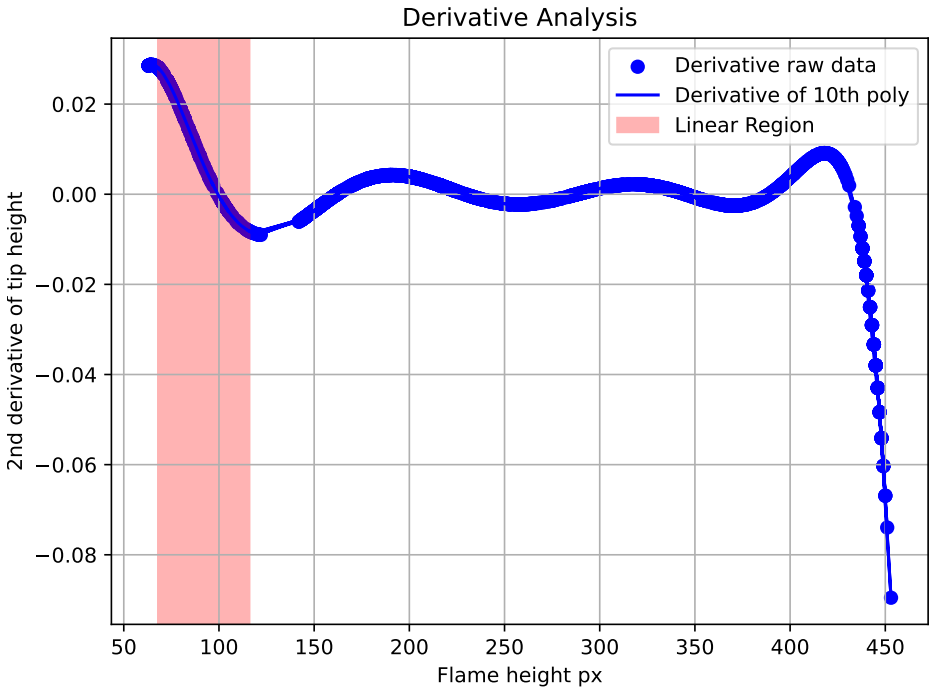


Figura 4.57: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

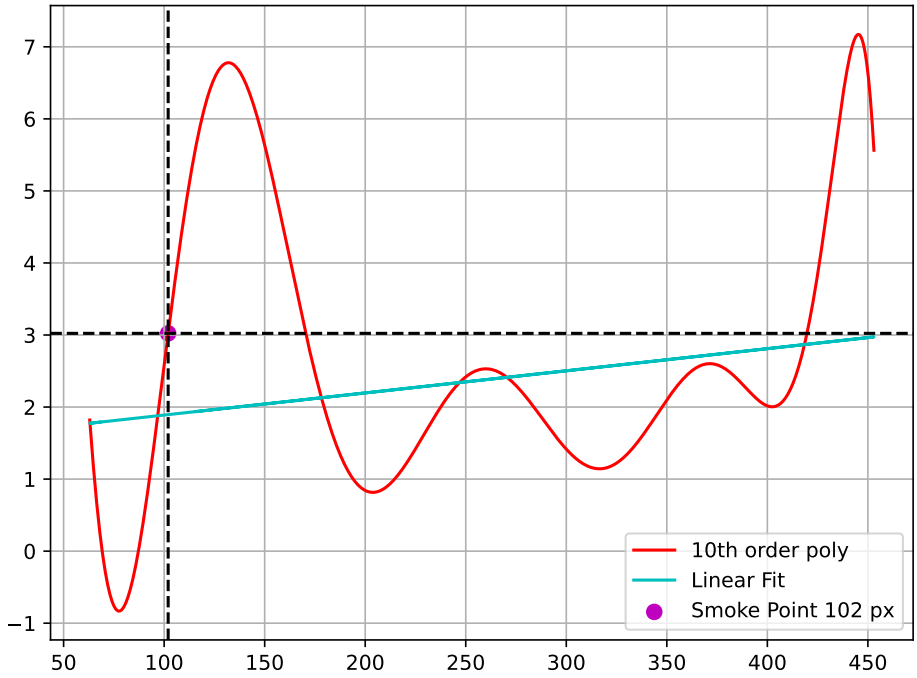


Figura 4.58: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

4.2.9. Mezcla 2, Ronda A, Trial III

EEl comportamiento anómalo puede ser rastreado a las mismas causas que el encontrado en el análisis de la ronda B de la mezcla#1. El *SPH* se determina en 99 *px*, equivalente a 9.2 *mm*, lo que tiene un error porcentual asociado del 64.3 %, mayor que el obtenido de la prueba estandarizada, 7.0 %.

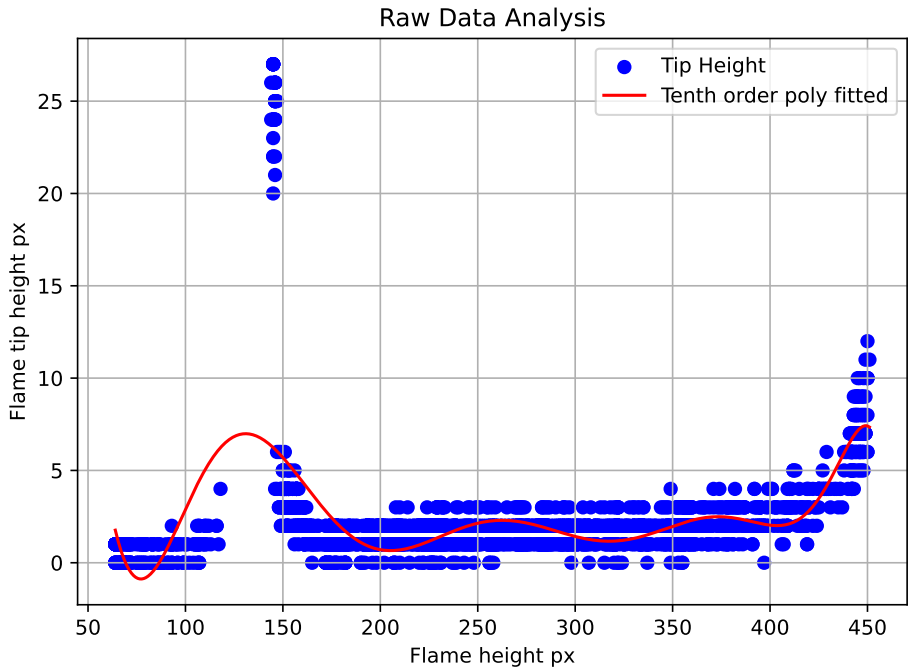


Figura 4.59: Gráfico de altura de la flama (h) v/s altura de la punta (H).

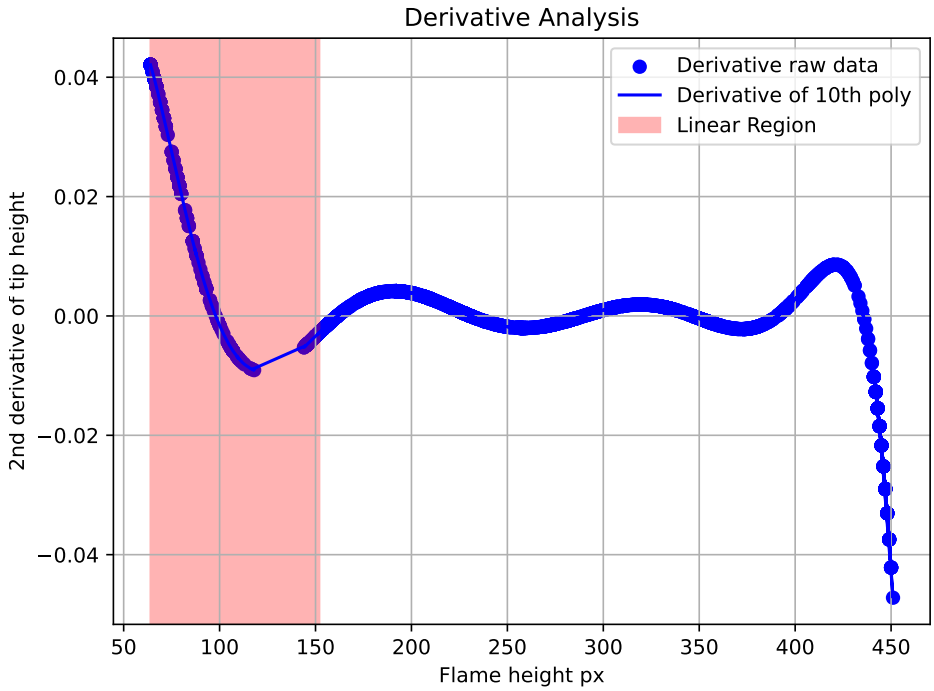


Figura 4.60: Gráfico la segunda derivada del polinomio $H(h)$.

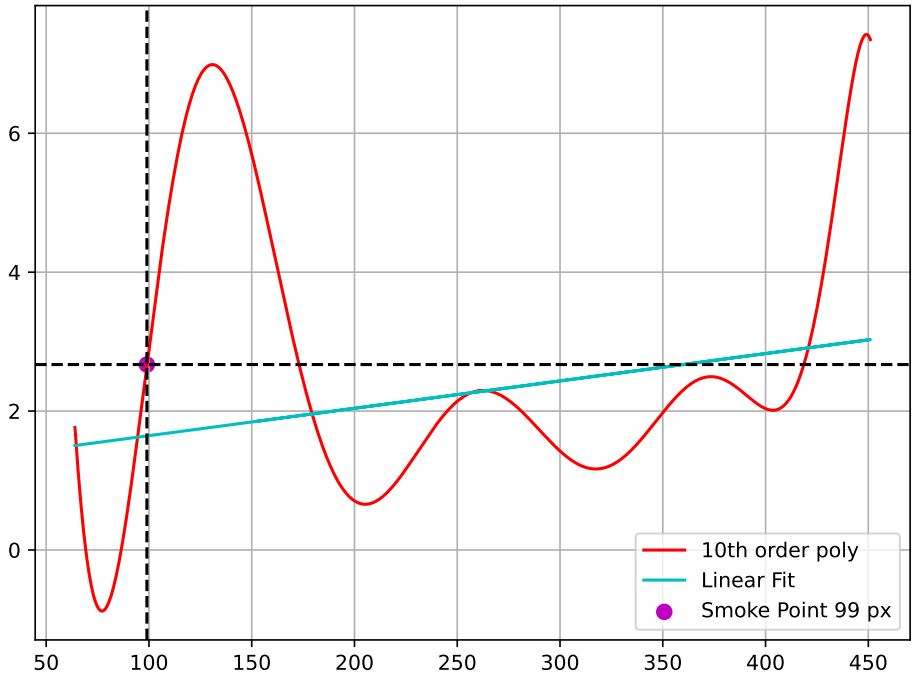


Figura 4.61: Gráfico de la zona lineal determinada y la ubicación del *smoke point*.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

A partir de los resultados obtenidos se puede realizar un desglose por objetivo de los hallazgos y conclusiones extraídas del análisis realizado en este trabajo.

Se logró realizar la replicación del algoritmo, generando una versión en código `Python` funcional, alojada en un repositorio de `Github` [17], capaz de realizar el análisis geométrico de la flama, para la posterior identificación del SPH.

Tomando el algoritmo replicado como base, mediante una evaluación preeliminar de su funcionamiento con los valores implementados por los autores, se determinó que para las variaciones propuestas en el diseño experimental, principalmente la utilización de una cámara distinta a la utilizada por los autores, el algoritmo era incapaz de funcionar de forma correcta. Se diseñó una rutina que en primer lugar permitiera recuperar los umbrales asociados a las regiones de interés de forma automática, mediante el análisis por histograma de los *frames* asociados a la progresión. En segundo permitiese determinar de forma experimental el valor asociado al umbral definido para la caracterización de la región lineal durante el procesamiento de los valores h y H. Y finalmente, una metodología que permitiese obtener la relación entre píxeles y milímetros utilizada para la conversión de los valores de SPH.

Se diseñó un experimento que permite realizar la evaluación de un algoritmo [5] de estimación de *smoke point* basado en la lámpara estandarizada definida en el estándar ASTM-D1322 [10], frente a la metodología definida por el estándar. Esta forma de evaluación permitió obtener métricas comparativas entre la metodología a evaluar y la prueba manual definida en el estándar a nivel de certeza de estimación de SPH y *repetibilidad* de las mediciones.

La generalización del funcionamiento para una cámara `Basler` fue comprobada bajo el conjunto de configuraciones descritos en el diseño experimental. Su pudo evidenciar su utilidad en mantener las condiciones de medición constantes para los *frames* obtenidos desde las distintas progresiones de la flama.

A partir de los resultados obtenidos para la comparación de metodologías se puede concluir lo siguiente. El algoritmo replicado tuvo un desempeño inferior a la metodología definida en el estándar. De los casos analizados sólo para la mezcla#1 en la ronda A, se obtuvieron errores de

estimación de *SPH* cercanos a los obtenidos para la metodología estandarizada. Sin embargo, como se determinó durante el análisis gráfico de cada *trial* realizado, existieron factores, como el control de la mecha por parte del operador y la determinación automática de umbrales, que tuvieron un impacto directo en los resultados para la estimación del *smoke point*. En el caso de la ronda B para la mezcla #1 y la ronda A para la mezcla #2, se logró identificar que una rápida progresión de la flama realizada por el operador, sumado a los valores umbral determinados mediante la rutina de calibración que correspondían a valores muy cercanos a los valores asociados al fondo de la imagen, generaron aparentes variaciones en la intensidad lumínica de la llama bajo prueba, lo que ocasionó errores de estimación de las regiones de *flame core* y *flame contour*, los cuales a su vez provocaron error en el cálculo de la altura de la punta de la flama, lo que afecto a procesos de análisis posteriores, como la identificación de la región lineal y la recta asociada a esta.

Los errores identificados para la caracterización de la flama, permitieron determinar problemas asociados a la forma en que el algoritmo determina la región lineal, dado que asume que la progresión de la llama siempre entregara puntos de altura del contorno que sean mayores que el anterior, indicando que la llama se progresa desde una altura mínima a una máxima. Los errores expuestos para la ronda B de la mezcla #1 y la ronda A de la mezcla #2, dejaron en evidencia que la región lineal estaba siendo encontrada de derecha a izquierda, provocando que se caracterizará una región mas acotada que la que se podía identificar de forma visual, esto a su vez provocando una estimación incorrecta de la recta asociada a esta zona.

En términos de la variación entre resultados para una misma ronda, se determinó que en general el algoritmo presentaba resultados más consistentes entre sí que los obtenidos mediante la metodología estandarizada, permitiendo obtener variaciones inferiores al límite de 1 mm, para todas las rondas a excepción de la ronda A para la mezcla #1. Se debe notar que para la ronda mencionada, existió un error en los *trials* II y III, en la forma en que el algoritmo encontraba la zona lineal para el análisis. Este error se pudo asociar al efecto de los movimientos bruscos o rápidos ocasionados por el control de la mecha realizada por el operador. Se debe evaluar el efecto que podría tener la adopción de la propuesta de mecanización realiza por los autores del trabajo replicado [5] en disminuir el error ocasionado en la estimación del *SPH*.

Los resultados para cada mezcla fueron analizados respecto a su *repetibilidad*. Los umbrales

obtenidos para esta métrica son comparables para los determinados mediante la metodología estandarizada, sin embargo, dada la presencia de errores que afectaron el proceso de análisis realizado por el algoritmo, no se puede concluir en torno a este punto.

Dentro de los factores que influyeron en los resultados obtenidos, se pueden identificar dos principales. En primer lugar, la necesidad de una recalibración de los umbrales para las zonas geométricas utilizadas por el algoritmo. Si bien se esperaba que existiesen diferencias dados los cambios realizados al diseño experimental definido por los autores de [5], no se esperaba que existiera una dependencia tan grande hacia la cámara utilizada y considerando que los autores solo entregaron valores para su diseño experimental, los cuales no iban acompañados de una metodología para su obtención, la generalización hacia el diseño experimental propuesto en este trabajo fue un grado de libertad más amplio de lo considerado originalmente. En segundo lugar la dependencia del algoritmo a una progresión controlada de la flama. Durante el diseño experimental realizado en este trabajo se omitió la propuesta de mecanización de la lámpara propuesta en [5], en pos de tener una comparación más directa entre las metodologías evaluadas, sin embargo, el algoritmo replicado [5] mostró una dependencia clara a esta mecanización, que se traducía en una caracterización de la zona lineal incorrecta. Dentro de los problemas para la determinación de esta zona, se pudo identificar que los movimientos generados por el operador causaban que esta zona se definiera por tramos y el algoritmo no estaba diseñado para manejar esta situación, por lo que se quedaba con el primer intervalo lineal que encontraba. Otro problema identificado fue relacionado al umbral para la caracterización de la zona lineal, el valor hallado de forma empírica en este trabajo difiere en al menos tres ordenes de magnitud al definido en [5], por lo que el algoritmo es muy sensible a las variaciones entre pasos para el control de la mecha. Estos hallazgos a partir del análisis realizado permiten orientar los objetivos para una posible continuación del estudio y análisis de la técnica [5] que permitan mejorar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

A partir del trabajo realizado se puede identificar los siguientes puntos para un análisis futuro:

- La evaluación de la propuesta de automatización realizada por los autores del trabajo replicado [5], en búsqueda de disminuir los posibles errores en el análisis realizado por el algoritmo. Principalmente, disminuir el efecto del control variable de la mecha realizado por el operador, cuyo impacto pudo ser evidenciado en todas las rondas de medición analizadas.

- Se requiere mejorar la rutina de calibración de umbrales descrita en el presente trabajo, considerando los efectos de la aparente variación de la respuesta lumínica de la flama, que pudo ser identificada cuando ocurría una progresión rápida realizada por el operador, como se determinó para la ronda B de la mezcla #1 y la ronda A de la mezcla #2. En esta linea, se debe comprobar los supuestos de la respuesta lumínica plana de la flama durante su progresión adoptados por los autores del trabajo replicado, heredados del trabajo [4] en los que se basaron para establecer los umbrales fijos para las áreas de interés de la llama. Estos supuestos para la respuesta lumínica se contradicen con los hallados en la literatura [7], por lo que un análisis de esta situación podría ayudar a establecer mejores criterios para la caracterización de las regiones.

- Es necesario establecer una metodología para estimar de forma automática el límite de valores para la segunda derivada, de esta forma realizando una caracterización automática de la zona lineal. Como se analizó en el caso de los *trials* II y III para la ronda A de la mezcla #1, se pudo identificar que se definían zonas lineales por intervalo y el algoritmo solo era capaz de identificar la primera. Se debe explorar otras formas de identificar esta zona, una de las posibilidades podría ser utilizar un método de ajuste de curva, como `RANSAC`, para poder determinar de forma automática los puntos que pertenezcan a la zona lineal, eliminando outliers o valores que corresponden a los extremos de la progresión.

- Siguiendo las propuestas de valor de los trabajos analizado [8] y [9], una extensión de la metodología hacia un entorno basado en un quemado Gülder, beneficiaría la metodología dado el control agregado de flujo de combustible obtenida en este tipo de experimento.

- Formalizar en una función a nivel de código la obtención de la conversión de píxeles a milímetros utilizando el *checkerboard*. De esta forma se podrá integrar directamente al algoritmo, como un proceso de calibración previo a realizar mediciones.

Referencias

[1] E. Sebbagh P, G. Mordojovich R, and F. Undurraga M, "Radiological anatomy of the thorax," *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, vol. 28, pp. 109 – 137, 06 2012. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482012000200005&nrm=iso

[2] R. Weiner, "5 - risk assessment approaches for the transport of radioactive material," in *Safe and Secure Transport and Storage of Radioactive Materials*, K. B. Sorenson, Ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp. 51–63. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423096000058

[3] A. Rodríguez, A. Diomedi, J. Portilla, H. Garcés, and G. Carvajal, "Automatic classification of soot propensity in flames using image processing and machine learning," in *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE, 2019, pp. 1–7.

[4] G. Rubio-Gomez, L. Corral-Gomez, J. A. Soriano, A. Gomez, and F. J. Castillo-Garcia, "Vision based algorithm for automated determination of smoke point of diesel blends," *Fuel*, vol. 235, pp. 595–602, 2019.

[5] L. Corral-Gomez, D. Rodriguez-Rosa, S. Juarez-Perez, A. Martín-Parra, G. R. Gomez, and F. Moya-Fernandez, "A novel device for automated determination of the smoke point with non-invasive adaptation of astm d1322 normalized lamps," *Measurement Science and Technology*, vol. 31, no. 11, p. 115004, 2020.

[6] R. J. Watson, M. L. Botero, C. J. Ness, N. M. Morgan, and M. Kraft, "An improved methodology for determining threshold sooting indices from smoke point lamps," *Fuel*, vol. 111, pp. 120–130, 2013.

[7] B. Graziano, T. Ottenwalder, D. Manderfeld, S. Pischinger, and G. Grunefeld, "Advanced methodology for the detection of smoke point heights in hydrocarbon flames," *Energy & Fuels*, vol. 32, no. 3, pp. 3908–3919, 2018.

[8] J. Pino, J. Cuevas, F. Escudero, P. Reszka, and A. Fuentes, "Soot propensity detection by eulerian video magnification," in *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.

[9] J. Pino, H. O. Garcés, J. Cuevas, L. E. Arias, A. J. Rojas, and A. Fuentes, "Soot propensity by image magnification and artificial intelligence," *Fuel*, vol. 225, pp. 256–265, 2018.

[10] "Standard test method for smoke point of kerosine and aviation turbine fuel - 2012." [Online]. Available: https://www.astm.org/d1322-12.html

[11] "Plot different svm classifiers in the iris dataset." [Online]. Available: https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/svm/plot_iris_svc.html

[12] R. de_Richter and S. Caillol, "Fighting global warming: The potential of photocatalysis against co2, ch4, n2o, cfcs, tropospheric o3, bc and other major contributors to

climate change," *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 1–19, 2011. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389556711000281

[13] R. F. Service, "Study fingers soot as a major player in global warming," *Science*, vol. 319, no. 5871, pp. 1745–1745, 2008. [Online]. Available: https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.319.5871.1745

[14] C. A. P. III and D. W. Dockery, "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 6, pp. 709–742, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

[15] "Ambient (outdoor) air pollution." [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

[16] C. S. McEnally and L. D. Pfefferle, "Sooting tendencies of nonvolatile aromatic hydrocarbons," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, no. 1, pp. 673–679, 2009.

[17] M. A. Aravena Cifuentes, "Wauro21/smokepointdetection: Smoke point characterization through image processing." [Online]. Available: https://github.com/Wauro21/smokePointDetection

[18] W. H. Organization, *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.* World Health Organization, 2006.

[19] J. C. Chow, J. G. Watson, D. H. Lowenthal, P. A. Solomon, K. L. Magliano, S. D. Ziman, and L. Willard Richards, "Pm10 source apportionment in california's san joaquin valley," *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, vol. 26, no. 18, pp. 3335–3354, 1992. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096016869290350T

[20] F. Andrade, C. Orsini, and W. Maenhaut, "Receptor modeling for inhalable atmospheric particles in sao paulo, brazil," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 75, no. 1, pp. 308–311, 1993. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168583X9395665R

[21] B. A. Begum, S. K. Biswas, E. Kim, P. K. Hopke, and M. Khaliquzzaman, "Investigation of sources of atmospheric aerosol at a hot spot area in dhaka, bangladesh," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 55, no. 2, pp. 227–240, 2005. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464606

[22] K. L. Ebi and G. McGregor, "Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts," *Environmental health perspectives*, vol. 116, no. 11, pp. 1449–1455, 2008.

[23] "Public health and environment." [Online]. Available: https://www.who.int/data/gho/data/themes/public-health-and-environment

[24] A. Seaton, D. Godden, W. MacNee, and K. Donaldson, "Particulate air pollution and acute health effects," *The lancet*, vol. 345, no. 8943, pp. 176–178, 1995.

[25] J. Pekkanen, A. Peters, G. Hoek, P. Tiittanen, B. Brunekreef, J. de Hartog, J. Heinrich, A. Ibald-Mulli, W. G. Kreyling, T. Lanki *et al.*, "Particulate air pollution and risk of st-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease: the exposure and risk assessment for fine and ultrafine particles in ambient air (ultra) study," *Circulation*, vol. 106, no. 8, pp. 933–938, 2002.

[26] W. H. Organization *et al.*, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2. 5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, 2021.

[27] "Sdg indicator 11.6.2 concentrations of fine particulate matter (pm2.5)." [Online]. Available: https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/concentrations-of-fine-particulate-matter-(pm2-5)

[28] P. Ruiz-Rudolph, N. Arias, S. Pardo, M. Meyer, S. Mesías, C. Galleguillos, I. Schiattino, and L. Gutiérrez, "Impact of large industrial emission sources on mortality and morbidity in chile: A small-areas study," *Environment international*, vol. 92, pp. 130–138, 2016.

[29] "Standard test method for smoke point of kerosene and aviation turbine fuel." [Online]. Available: https://www.astm.org/standards/d1322

[30] "Color conversions." [Online]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/de/d25/imgproc_color_conversions.html

[31] B. AG, "User sets." [Online]. Available: https://docs.baslerweb.com/user-sets

[32] GLASSMAN and P. YACCARINO, "The effect of oxygen concentration on sooting diffusion flames," *Combustion Science and Technology*, vol. 24, no. 3-4, pp. 107–114, 1980. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/00102208008952429

[33] H. O. Garcés, A. Fuentes, P. Reszka, and G. Carvajal, "Analysis of soot propensity in combustion processes using optical sensors and video magnification," *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1514, 2018.

[34] A. G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto, and H. Adam, "Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications," *arXiv preprint arXiv:1704.04861*, 2017.

[35] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.

6. Anexos

6.1. Diagrama de la lámpara estandarizada

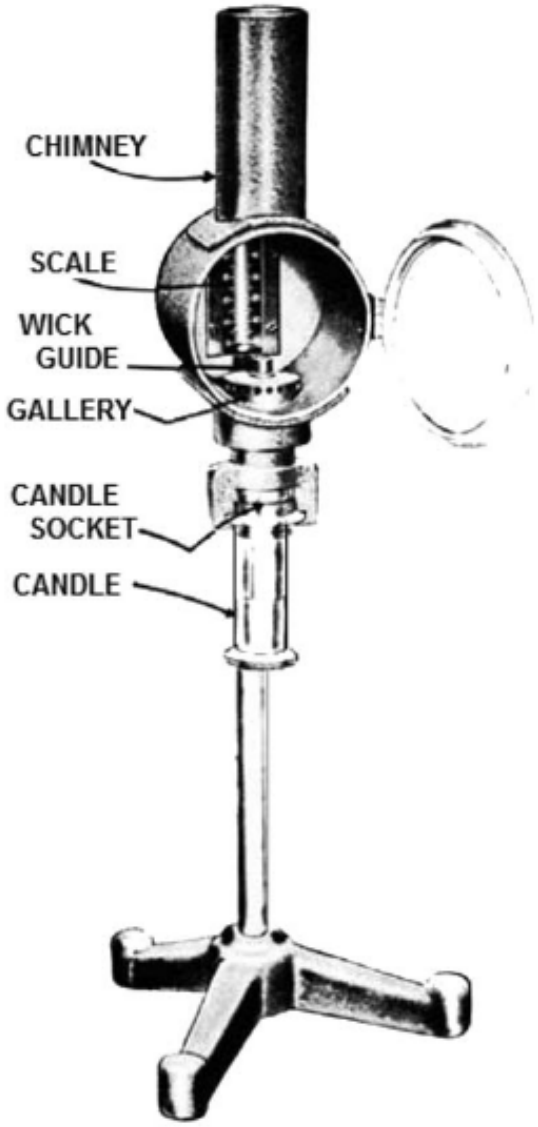


Figura 6.62: Diagrama de la lámpara estandarizada encontrada en el estándar ASTM-D1322 [10].

6.2. Técnicas del estado del arte analizadas

6.2.1. An improved methodology for dermining the threshold sooting indices from smoke point lamps [6].

Propone utilizar la relación entre la tasa de consumo de combustible de la flama y su altura - *FURTI*. Se propone que existe una relación lineal entre ambas variables, la cual se mantiene hasta la ocurrencia de un punto de inflexión que se comporta como una asíntota vertical, donde se entra en una zona nueva de pendiente distinta a la inicial.

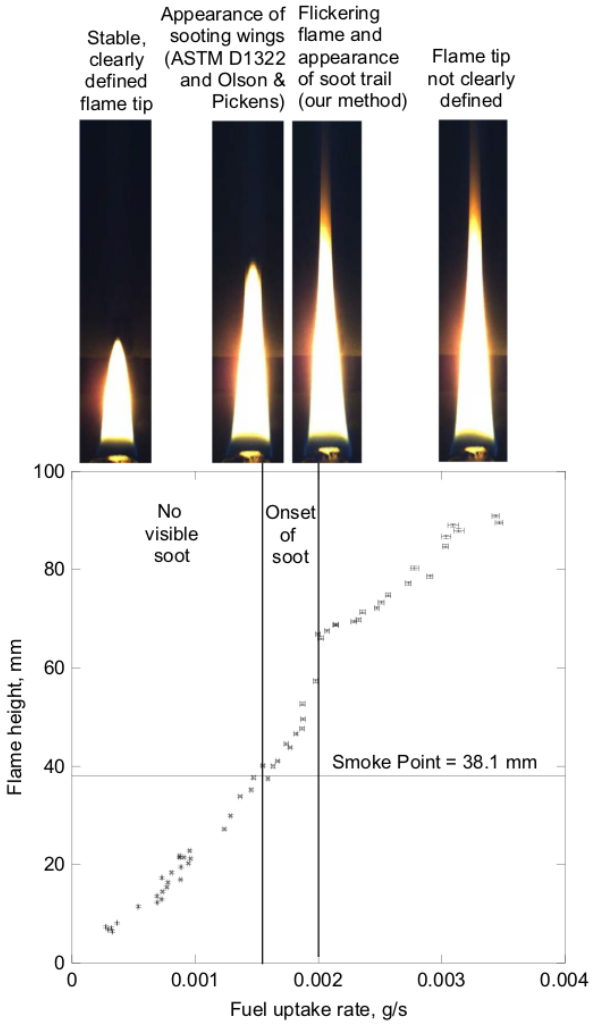


Figura 6.63: Morfología de la flama en distintas alturas v/s tasa de consumo de combustible [6].

El *smoke point*, ocurriría antes de este punto de inflexión, en las proximidades de la primera zona lineal y correspondería al punto donde la flama muestra máxima sensibilidad a variaciones de gasto másico, como se ve en la Figura 6.63. De acuerdo a los autores, la tasa de combustible de la flama puede ser medida de forma más precisa, en comparación a la medición de la altura de la flama. Los autores proponen rediseñar la lámpara estandarizada para incorporar una balanza analítica como se muestra en la Figura 6.64, con la que se pueda medir el consumo de combustible durante la prueba.

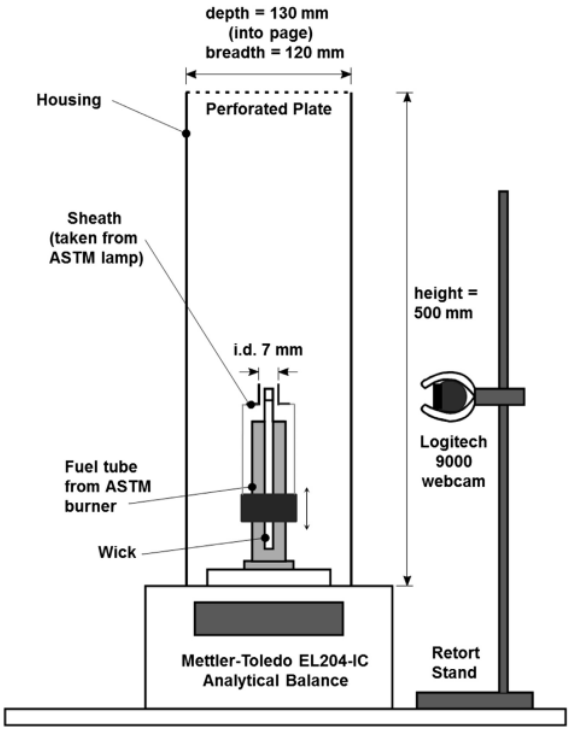


Figura 6.64: Aparato para la determinación de la altura de la flama, como función de la tasa de consumo de combustible en una lámpara estandarizada [6].

Modificaciones adicionales al sistema del control de la mecha son añadidas de forma que todo pueda ser correctamente instalado sobre la balanza [8]. Utilizando una cámara web, la cual captura imágenes en una resolución de 1280×720, a una frecuencia de 20 *frames per second (fps)*, se registra la progresión de la flama por las etapas de la prueba ASTM-D1322. Las imágenes se procesan de forma de obtener la altura de la llama de forma automatizada,

[8] Esto se realiza para que el dispositivo de prueba esté dentro de los márgenes medibles con la balanza.

mediante la conversión a escala de grises de la imagen y la aplicación de un umbral para obtener la forma de la flama, posteriormente se realiza una conversión de píxeles a milímetros, con tal de obtener la altura, Figura 6.65. Los datos de consumo de combustible y de altura de la llama, son analizados para encontrar el punto de inflexión, las zonas lineales y finalmente el *smoke point*.

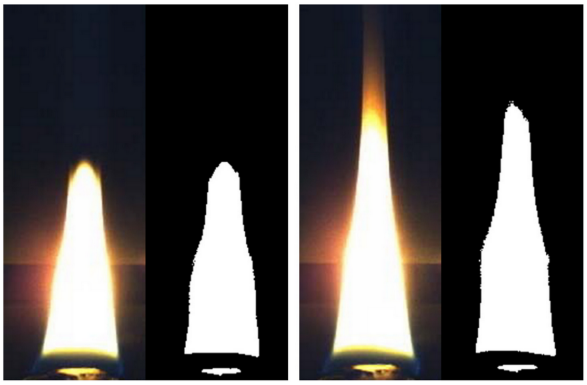


Figura 6.65: Análisis de imagen del método *FURTI*, para dos llamas de isooctano [6]. **Izquierda:** Altura de llama de 41 *mm*. **Derecha:** Altura de llama de 60 *mm*.

6.2.2. Advanced Methodology for the Detection of Smoke Point Height in Hydrocarbon Flames [7].

El trabajo construye principalmente sobre *FURTI*[6], manteniendo la definición del *smoke point* como el punto de inflexión de la curva que relaciona la altura de la flama con la tasa de consumo de combustible. Principalmente trata de solucionar dos de las críticas al método implementado, las modificaciones sobre la lámpara estandarizada y la elección de un umbral arbitrario para la estimación de la altura de la llama.

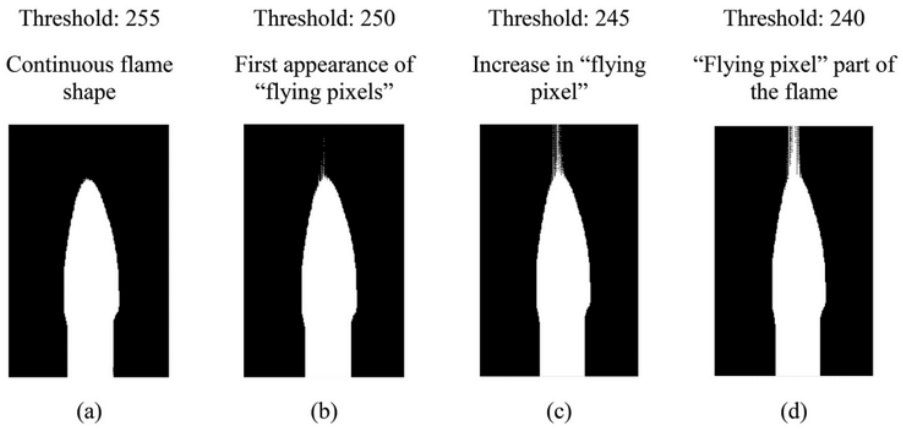


Figura 6.66: Influencia de la elección del umbral en la morfología de una flama de isooctano [7]. En la parte superior se indica el umbral aplicado para cada caso.

En la Figura 6.66, se puede ver un ejemplo del efecto que tiene la elección del valor de umbral en la morfología que presenta la flama, los umbrales comienzan con un valor más alto a la izquierda y van bajando en un valor de 5 unidades hacia la derecha. Se observa que para valores más bajos de umbral, la parte superior de la flama comienza crecer, dado que más píxeles son considerados como parte de la flama. Este grado de libertad dado por el umbral, puede llevar a una incorrecta caracterización de la altura de la flama, como se evidencia en la Figura 6.67. En este caso una variación máxima del 9 % fue registrada entre la altura real y la obtenida luego de aplicar el umbral.

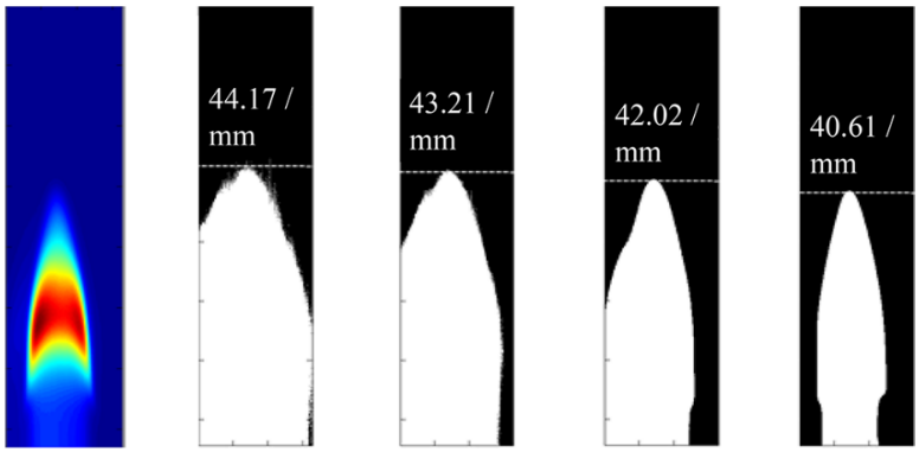


Figura 6.67: Influencia de la elección de umbral en la altura de la flama [7]. De izquierda a derecha los umbrales aplicados son: 10, 15, 50 y 150.

La propuesta de los autores [7], es utilizar una prueba basada en *FURTI*, manteniendo la lámpara estandarizada sin modificaciones. Una balanza analítica permitiera medir la tasa de consumo de combustible con la lámpara completa. Por otro lado, se reemplazo la cámara web utilizada en *FURTI*, por una cámara ccd, para incrementar la resolución de las imágenes capturadas. En términos del procesamiento para la determinación de la altura, se indica que para cada etapa de la prueba ASTM-D1322, se tomarán un total de 120 imágenes, las cuales se promediaran, con la intención de eliminar pequeñas fluctuaciones y obtener una representación precisa de la flama. A partir de esta imagen promedio se obtiene el gradiente vertical. Se escoge la columna de píxeles que esté mas próxima al eje de simetría axial, para buscar la punta, Figura 6.68.

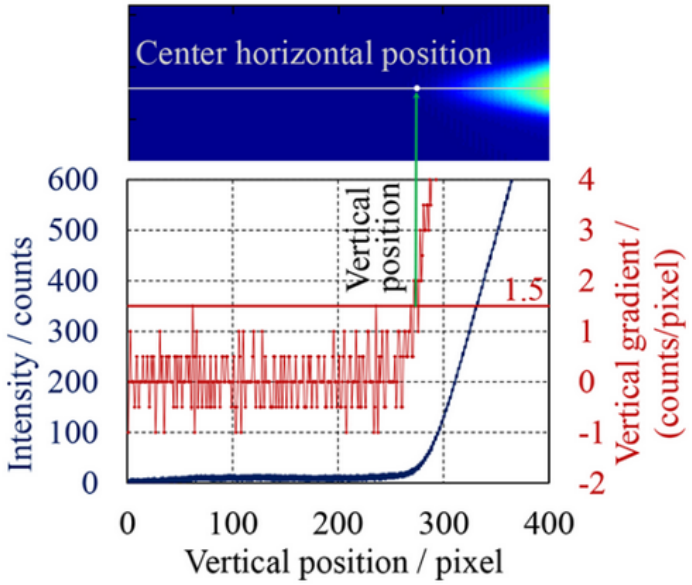


Figura 6.68: Análisis de la intensidad de gradiente en el eje de simetría de una flama de isooctano [7].

Se analiza el vector columna de arriba hacia abajo (corresponde a analizar desde la parte superior de la imagen hacia la base), cuando se detecta un incremento sustancial en el gradiente se considera como el inicio de la flama. El proceso se repite para las 50 columnas más próximas al eje de la flama. Como resultado de este procedimiento se obtiene un contorno para la flama, el punto más alto de éste, se considera como la altura de la flama, Figura 6.69.

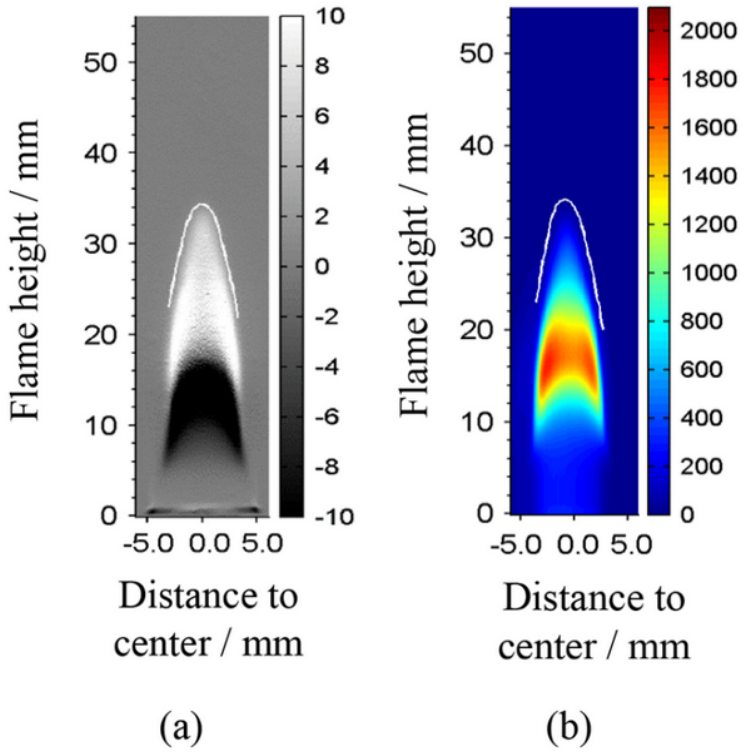


Figura 6.69: Gradiente de la imagen de la flama (a) e imagen original (b). El contorno estimado por el procesamiento se indica en una línea blanca por sobre la flama. [7]

6.2.3. Soot Propensity Detection by Eulerian Video Magnificaction [8].

Se propone utilizar un cambio en la morfología de la flama que ocurre durante el *smoke point* [32]. Mientras la ingesta de combustible de la flama se acerca a este punto crítico, estructuras comienzan a aparecer en torno a la punta, denominadas "wings of the flame" (alas de la flama), Figura 6.70.

Figura 6.70: "Alas" de la flama en el *smoke point*, para una llama de isooctano [6].

Los autores apuntan que estas diferencias en la morfología de la flama pueden ser utilizadas para caracterizar el *smoke point*. Se propone utilizar el algoritmo *EVM*, capaz de amplificar pequeñas perturbaciones en vídeo, las cuales podrían no ser visibles para el ojo humano.

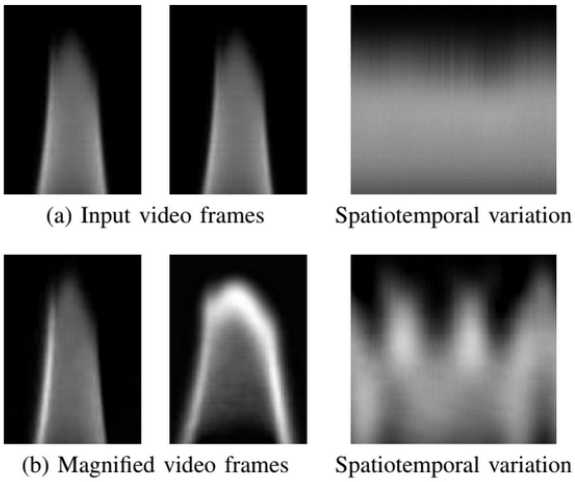


Figura 6.71: Ejemplo de magnificación mediante EVM. (a) Secuencia del vídeo original. (b) Secuencia amplificada por EVM.

En la Figura 6.71 se observa un ejemplo de la aplicación del algoritmo EVM, en la segunda columna se muestra la descomposición espacio-temporal de los *frames* de entrada. De esta forma, mediante el uso de EVM, se pueden detectar variaciones periódicas presentes en la progresión de la flama. Utilizando esta técnica, un algoritmo es diseñado, mediante la detección de la aparición de las "alas" de la flama, con la finalidad de acotar la tasa de consumo de combustible donde ocurre el *smoke point*.

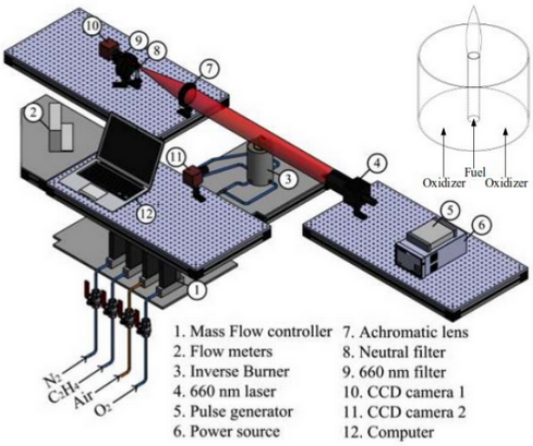


Figura 6.72: Diseño Experimental [8].

Para el control de la ingesta de combustible, los autores proponen no utilizar la lámpara estandarizada dada la dependencia de la medición al instrumento, sino que utilizar llamas estandarizadas en un quemador Gülder. De esta forma se tiene un control preciso y automatizado del flujo de combustible que llega a la flama. Para obtener poder comparar los resultados obtenidos mediante el algoritmo propuesto, se utiliza como referencia mediciones realizadas mediante *Light of Sight Attenuation (LOSA)*, para la detección de la liberación de hollín por parte de la flama en las distintas etapas de la prueba. Se propone el diseño experimental mostrado en la Figura 6.72.

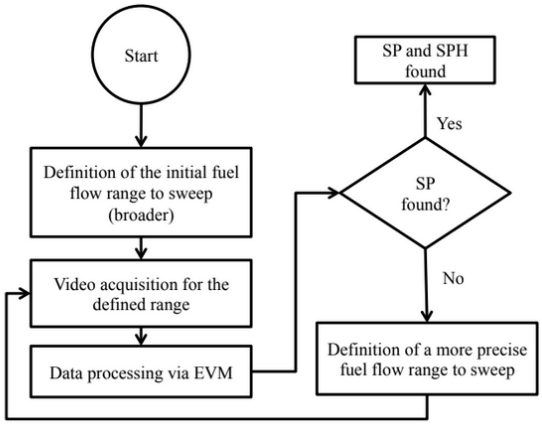


Figura 6.73: Diagrama de flujo para la propuesta.

De esta forma, el procedimiento para la caracterización del *smoke point* queda definido como muestra la Figura 6.73. Inicialmente se hace un barrido, de forma de progresar la flama en un intervalo definido para la ingesta de combustible. Un vídeo es capturado durante el proceso, el cual se procesa mediante el uso de *EVM* para poder caracterizar si la flama está por sobre o debajo su *smoke point*. En el caso de que el *smoke point* no sea detectado, el algoritmo acota el rango de combustible en torno a la información entregada por el procesamineto *EVM*, de esta forma iterativamente permitiendo acotar hasta que el *smoke point* sea determinado.

- **Ventajas:**

  I. El algoritmo base podría ser utilizado en un experimento que use la lámpara estandarizada, lo que implicaría no realizar modificaciones sobre la misma.

II. Permite establecer una condición morfológica de la flama para definir la ocurrencia del *smoke point*, entregando una herramienta automatizada para detectarlo.

III. Sienta bases para la implementación de una prueba que no dependa de la lámpara estandarizada.

- **Desventajas:**

I. El algoritmo *EVM* se basa en la magnificación de diferencias entre *frames*, siendo susceptible al ruido y cualquier cambio en la escena no relacionado con el experimento [33].

II. El uso de un diseño experimental distinto al definido en el estándar impide una comparación directa de resultados con otros trabajos de la literatura.

6.2.4. Soot propensity by image magnification and artificial intelligence [9]

El trabajo consiste en dos técnicas para la caracterización de *smoke point*, la primera corresponde a la presentada en la sección 6.2.3 [8]. La segunda técnica, propone utilizar técnicas de inteligencia artificial para poder caracterizar el estado de la flama. Se busca entrenar un modelo que sea capaz de discernir si el *frame* de una flama, correspondiente a una medición de *smoke point*, esta debajo, en o sobre su *smoke point*.

Para esto, se utiliza *SVM*, una técnica clásica de aprendizaje de máquinas. Esta técnica permite a partir de un dominio de datos etiquetados (también denominados como clases), en este caso *frames* correspondientes a flamas en distintos estados de progresión etiquetadas de acuerdo a su posición en torno al *smoke point* (*Under-Smoke-Point*, *smoke point* y *Above-Smoke-Point*), encontrar el hiperplano, que permite separar las clases, maximizando la distancia de cada clase al hiperplano resultante.

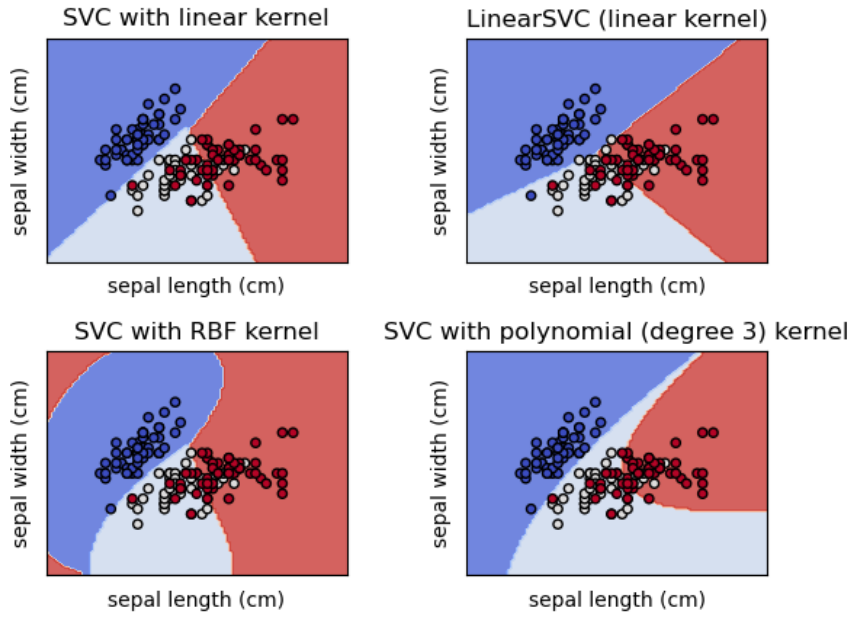
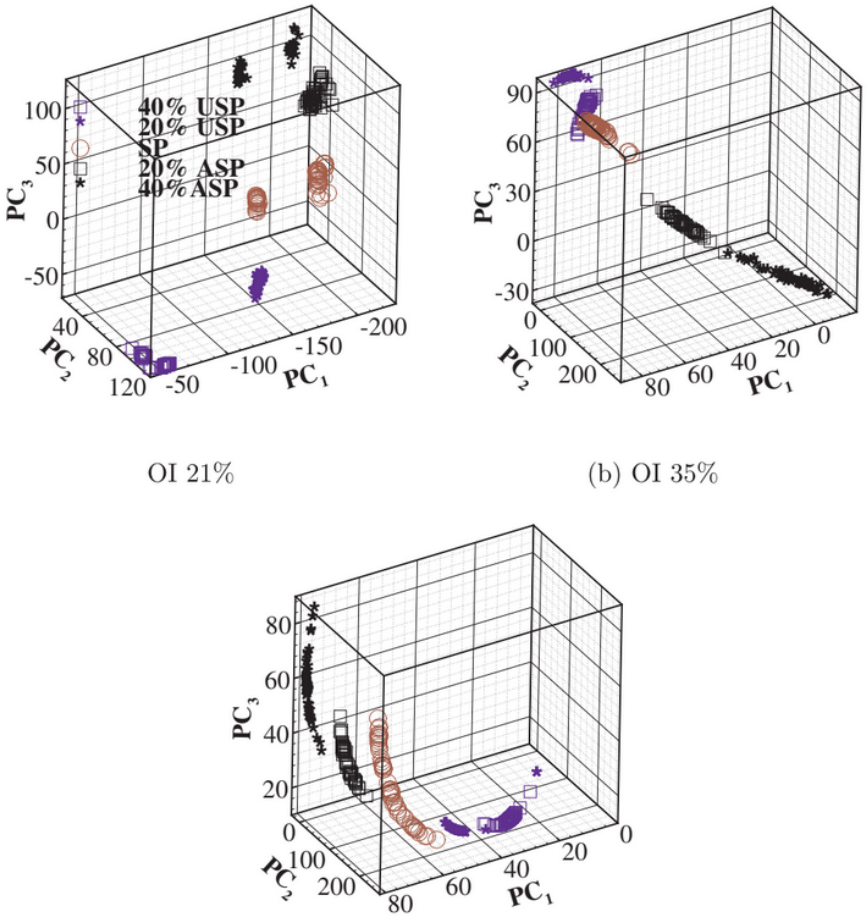


Figura 6.74: Visualización de un clasificador *SVM* [11]. Se tiene un dominio con tres clases etiquetadas, a partir de procesos de optimización se ajusta el modelo para encontrar el hiperplano que permita separar las clases, manteniendo la máxima distancia entre el hiperplano y cada clase.

El procedimiento de ajuste del modelo de *SVM* se estructura en tres etapas. En primer lugar, *frames* correspondientes a diversas flamas en distintos estados son analizadas y clasificadas de acuerdo a las etiquetas: USP, SP y ASP. La clasificación se realiza mediante el uso de *EVM* definido en [8]. En la segunda etapa, se elimina la información redundante de los *frames*, mediante el uso de *Principal Component Analysis (PCA)*, la cual es una técnica para la reducción de dimensionalidad de datos, proyectando los *frames* multidimensionales en un espacio de características donde los ejes representan las características principales de la imagen. De esta forma a partir del *dataset* original, se obtiene una nube de puntos asociados a cada etiqueta, como lo que se aprecia en la Figura 6.75. En la última etapa el modelo es adaptado, mediante procesos de optimización, permitiendo encontrar el hiperplano que separa de mejor manera las clases. La precisión del modelo es evaluada utilizando un grupo de frames no utilizados durante el proceso de entrenamiento a fin de evitar el *overfitting* del modelo. Habiendo finalizado la adaptación del modelo, este puede ser utilizado para la clasificación de *frames* correspondientes a progresiones de flamas que no estén contenidos en el *dataset*.



OI 21%

(b) OI 35%

(c) OI 50%

Figura 6.75: Representación en espacio de características para los distintos datos de entrenamiento utilizados en la adaptación del modelo *SVM*.

Los autores proponen un diseño experimental igual al encontrado en la Figura 6.72 [8] para la obtención de los datos de entrenamiento. Esto implica el uso de llamas estandarizadas en un quemador Gülder.

6.2.5. Automatic Classification of Soot Propensity in Flames Using Image Processing and Machine Learning [3].

El trabajo construye sobre las técnicas presentadas en las Secciones 6.2.3 [8] y 6.2.4 [9]. Se propone utilizar una tercera propuesta basada nuevamente en inteligencia artificial tomando un enfoque de *deep learning*. Los autores proponen utilizar el *dataset* etiquetado generado

mediante *EVM* [8] y utilizado para la adaptación del modelo de inteligencia artifical *SVM* [9], en el entrenamiento de redes *CNN*.

En primera instancia se propone realizar *transfer-learning*, proceso que consiste en utilizar modelos que ya han sido entrenados utilizando *dataset* públicos para la extracción de características, en una nueva tarea distinta para la que fueron entrenadas, añadiendo capas a la salida de la red, que permiten adaptar los resultados a la aplicación necesaria. Los autores utilizan los modelos MobileNet [34] y VGG [35], cuyos pesos de entrenamiento fueron congelados para el entrenamiento, agregando las capas de salida descritas en la Tabla 6.15. A los pesos de las capas de salida, se aplica regularización L2 con un factor de 0.02 para evitar *overfitting* del modelo.

Tabla 6.15: Arquitectura de las capas finales para las redes pre-entrenadas.

Tipo	Maps	Kernel/Stride	Tamaño	Activación
MobileNet	1280	-	7x7	ReLu
AvgPool	-	Global	1280	-
Dense	-	-	32	Sigmoide
Dense	-	-	3	Softmax
VGGNet	512	-	7x7	-
Flatten	-	-	25088	-
BatchNorm	-	-	25088	-
Dense	-	-	1024	ReLu
BatchNorm	-	-	1024	-
Dropout	-	-	1024	-
Dense	-	-	3	Softmax

Por otro lado, se propone también entrenar una red neuronal desde cero, para ello se utiliza un arquitectura denominada *MiniNet-SP*, descrita en la Tabla 6.16. Los autores afirman que esta arquitectura permite obtener una mayor extracción de atributos de interés, dado que el uso de filtros "grandes" a la entrada permite la extracción de características generales, y a

medida que los filtros decaen jerárquicamente en tamaño, esto permite extraer características más finas [3]. La salida de la red, corresponde a capas *fully-connected*, las cuales desembocan en una función de activación *Softmax* que permite obtener una distribución de la entrada sobre las tres etiquetas: *Above-Smoke-Point* , *Smoke-Point, Under-Smoke-Point*.

Tabla 6.16: Arquitectura de la red *CNN*: MiniNet-SP

Tipo	Maps	Kernel/Stride	Tamaño	Activación
Conv2D	16	3x3/1	222x222	ReLu
Conv2D	32	3x3/1	220x220	ReLu
AvgPool	-	2x2/2	110x110	-
Conv2D	64	3x3/1	108x108	ReLu
AvgPool	-	2x2/2	54x54	-
Conv2D	32	3x3/1	52x52	ReLu
AvgPool	2x2/2	26x26	-	
Conv2D	32	3x3/1	24x24	ReLu
AvgPool	-	Global	32	-
Dense	-	-	32	Sigmoide
Dense	-	-	3	Softmax

El *dataset* está compuesto de 488 imágenes etiquetadas con una resolución de 2592x1944. Dado el tamaño del *dataset* se utilizan técnicas de *dataset-augmentation* para evitar *overfitting*. Esta aumentación se manifiesta a través de corrimientos espaciales en las ventanas de recorte, simulando movimientos asociados a la captura de la cámara. Ruido Gaussiano también es añadido a los canales (RGB) de las imágenes. De esta forma cada elemento del *dataset* es aumentado diez veces.

De acuerdo a los resultados obtenidos por los autores, el uso de redes *CNN* entrega una solución más robusta en comparación al uso de *SVM*, dada la aumentación artificial del *dataset* que permite una mejor generalización de los resultados.

6.3. Análisis comparativo técnicas evaluadas

6.3.1. Características de Comparación Alternativas Evaluadas

A partir del análisis realizado sobre las alternativas de solución se procede a establecer criterios que permitan discernir entre las distintas propuestas. Estos criterios fueron diseñados considerando las ventajas y desventajas de cada uno de los trabajos revisados y tomando ciertas propuestas de interés como parámetro de comparación. Se establece una escala de evaluación de 0 a 100, donde a cada criterio se le asigna un porcentaje del puntaje máximo. Cada criterio a su vez tiene asociado un puntaje máximo, el cual es subdivido según cada sub-criterio correspondiente, los cuales entregan los requisitos para la obtención del puntaje. La calificación final para cada trabajo es obtenida como la suma ponderada de los puntajes obtenidos para cada criterio y la ponderación asociada a este. A continuación se procede a entregar la definición, sub-definiciones y ponderaciones para cada criterio.

Complejidad de la solución propuesta: Ponderación del 50 % del puntaje total. Se valoran los trabajos que mantengan la simpleza de la prueba definida en el estándar ASTM-D1322. Se distinguen los siguientes subcriterios:

I. **Intervención de la lámpara:** Asignado 60 puntos del total del criterio. Se prioriza soluciones que no representen una intervención directa sobre la lámpara estandarizada, preservando la normalización de ésta. Se diseña la siguiente escala para la asignación de puntaje a los trabajos evaluados bajo este sub-criterio, Tabla 6.17.

Tabla 6.17: Asignación de puntajes para el sub-criterio: Intervención de la lámpara.

Grado de intervención	Puntaje
No se realizan modificaciones directas sobre la lámpara estandarizada. Cualquier adaptación aplicada es realizada de manera externa preservando el carácter normalizado, más aún si las adaptaciones son removidas se recupera el instrumento de medición original.	60
La lámpara es parcialmente modificada, aplicadas de forma superficial y con un impacto leve al funcionamiento de la misma. El carácter normalizado es levemente alterado, *e.g.* Pintado de la galería, remoción de la escala.	30
La lámpara es modificada perdiendo su carácter normalizado. Se remueven o modifican de manera irreversible componentes, e.g. remoción del vidrio, perforación de la galería.	0

II. **Complejidad inherente de la propuesta:** Asignado 40 puntos del puntaje total del criterio. Busca priorizar propuestas que utilicen elementos simples, cuyo uso no requiere una calibración que introduzca un nuevo grado de complejidad a considerar durante las mediciones. Bajo este ámbito también se valoran propuesta cuyos elementos no deban ser fabricados a medida para la realización de la prueba. Se diseña la siguiente escala para la asignación de puntaje a los trabajos evaluados bajo este sub-criterio, Tabla 6.18.

Tabla 6.18: Asignación de puntajes para el sub-criterio: Complejidad inherente de la propuesta.

Grado de complejidad	Puntaje
El entorno de prueba no requiere de elementos adicionales más que la lámpara estandarizada y elementos de medición accesibles fuera de un contexto de laboratorio.	40
Se requiere de elementos con una complejidad asociada, ya sea en la forma de utilización, calibración o diseño de forma local, sin requerir de un proceso de manufactura externo.	20
Se introducen elementos que introducen un nuevo grado de complejidad al proceso de medición. Su uso y calibración debe ser realizado de manera cuidadosa para no introducir una nueva fuente de error. Elementos diseñados y manufacturados por procesos externos son incluidos.	0

Aportes asociados a la *repetibilidad* y *reproducibilidad*: Ponderación del 30 % del puntaje total. Se valoran soluciones que tomen acciones concretas para minimizar el efecto de variables externas o asociadas al proceso de medición definido en el estándar. Se distinguen los siguiente subcriterios:

I. **Automatización de la prueba:** Asignado 60 puntos del total del criterio. Se valoran soluciones que realicen de forma automatizada el proceso de medición mediante la lámpara, permitiendo eliminar la subjetividad asociada al operario en la prueba. Se diseña la siguiente escala para la asignación de puntaje a los trabajos evaluados bajo este sub-criterio, Tabla 6.19.

Tabla 6.19: Asignación de puntajes para el sub-criterio: Automatización de la prueba.

Grado de automatización	Puntaje
La metodología es diseñada sin requerir de la intervención de un operador para la caracterización del *smoke point* u operación del dispositivo de prueba.	60
Se elimina la necesidad de la estimación visual por parte del operario, sin embargo, su participación en la operación del dispositivo de prueba sigue siendo requerida. Los resultados siguen teniendo cierta dependencia a este.	30
El operario sigue cumpliendo un rol similar al definido en la prueba estandarizada.	0

II. **Robustez de los criterios utilizados por la prueba:** Asignando con 40 puntos del total del criterio. Se valoran soluciones que justifiquen de manera adecuada la elección de umbrales, constantes y parámetros sobre los cuales se sostiene parte del proceso de determinación de *smoke point*. Son castigadas soluciones en donde estas decisiones sean realizadas con base netamente experimental, en torno a la prueba diseñada por los autores, dando pie a subjetividades inherente a los diseños experimentales, que pueden llevar a variaciones al momento de su replicación fuera de este. El puntaje para este subcriterio se asigna de manera binaria, el total para trabajos que presenten una justificación adecuada de las decisiones de diseño y operación de la metodología y cero puntos para el caso contrario.

Propuesta en pos de instrumentalización: Ponderación del 10 %. Busca valorar soluciones que entreguen una metodología y propuesta de encapsulación que permita definir un instrumento de medición sobre el cual se pueda determinar el *smoke point* de un combustible, el cual pueda eventualmente ser integrado a entornos de laboratorio. El puntaje del criterio se entrega de forma binaria, el total del puntaje en el caso de que

presente la propuesta y cero en el caso contrario.

Propuesta destacable: Ponderación del 10 %. Busca valorar propuestas individuales destacables de cada metodología, las cuales presentan una comoponente innovadora o cuya funcionalidad pueda ser salvaguardada y/o replicada en la propuesta escogida. El puntaje es asignado de forma binaria.

6.3.2. Evaluación alternativas

A partir de los criterios definidos para la comparación de alternativas, se procede a realizar la evaluación de los trabajos analizados, para poder escoger una técnica sobre la cual se trabajará. Los resultados de esta evaluación se registran en la Tabla 6.20. Note que los porcentajes de los subcriterios son multiplicados por el factor de ponderación del criterio, de forma de condensar la información de la tabla.

Tabla 6.20: Comparación de alternativas.

Criterio	[6]	[7]	[8]	[9]	[3]	[4]	[5]
Grado de intervención lámpara 30 %	0	15	30	30	30	30	30
Grado de complejidad solución 20 %	0	0	10	10	20	20	20
Grado de automatización 18 %	9	9	9	9	9	18	18
Robustez de criterios 12 %	0	12	12	12	12	0	0
Propuesta de instrumentalización 10 %	0	0	0	0	0	10	10
Propuesta destacable	10	10	10	10	10	10	10
Calificación	19	46	61	71	81	**88**	**88**

Para cada trabajo evaluado se determina la Propuesta destacable como se observa en la Tabla 6.21.

Tabla 6.21: Propuestas destacables de cada trabajo.

Trabajo	Propuesta
[6]	Uso de tasa de consumo para caracterizar *SPH*.
[7]	Uso de gradientes en contraste a umbrales.
[8]	Uso de elementos morfológicos de la flama.
[9]	Uso de *SVM*.
[3]	Uso de *deep-learning*.
[4]	Definición visual *smoke point*.
[5]	Propuesta instrumentalización.

6.3.3. Selección

A partir de la evaluación realizada sobre los trabajos analizados, resumida en las calificaciones obtenidas por cada uno en la Tabla 6.20 se puede concluir que existen dos posibles candidatos para la selección [4] y [5]. Ambas opciones con una calificación de 88/100. Considerando que el trabajo [5] es una revisión de la propuesta definida en [4], realizada por un subconjunto de los autores originales, se seleccionara como alternativa [5].

Esta elección se justifica principalmente dadas las características presentes en el trabajo que lo convierten en una solución viable para atacar la problemática de la *repetibilidad* y *reproducibilidad* asociada al estándar ASTM-D1322. La solución define una metodología con una nula intervención a la lámpara estandarizada, solo realizando adaptaciones externas que buscan disminuir el efecto que tiene el operador sobre la prueba, desde la arista del control del flujo de combustible. La propuesta establece una definición morfológica para la determinación del *smoke point*, lo que permite reducir el equipo necesario para su detección a solo la lámpara automatizada y una cámara. Los autores establecen un algoritmo el cual es capaz de determinar de forma automatizada el *SPH*, más aún, entregando un diseño con el cual todo el procedimiento puede ser encapsulado en conjunto con la lámpara estandarizada permitiendo definir un instrumento de medición autónomo.

Se debe reconocer que existen algunas inquietudes asociadas a la alternativa seleccionada que

deberán ser analizadas y revisadas durante el trabajo posterior y que se reflejan en la calificación obtenida por la solución en el análisis comparativo. Principalmente en torno a la robustez de los criterios utilizados para la determinación de los umbrales necesarios para el análisis morfológico, dado que la solución hereda uno de los grandes problemas identificados para [4], que es el supuesto de que la flama tiene una respuesta lumínica plana durante la progresión de la prueba, la cual como se mencionó en su momento, puede deberse a la saturación de la cámara con la que se realizaron las mediciones.