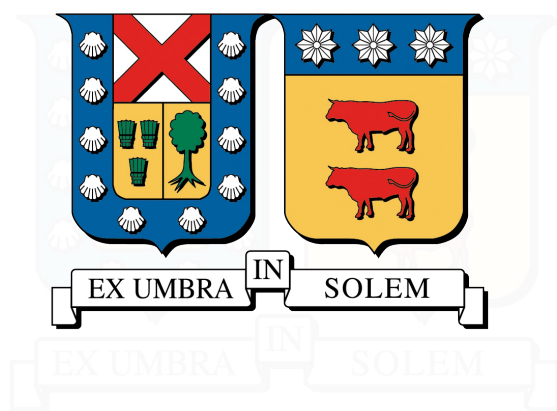


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



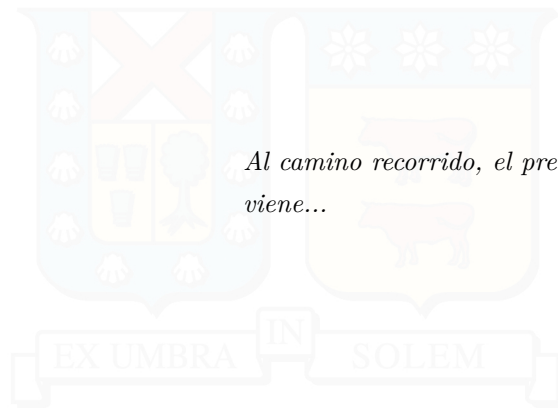
**PROPENSIÓN A LA FORMACIÓN DE HOLLÍN EN COMBUSTIBLES
LÍQUIDOS REFERENCIALES ESTABILIZADOS EN UNA LÁMPARA
DE HUMO ESTANDARIZADA UTILIZANDO TÉCNICAS DE
EMISIÓN/ABSORCIÓN**

MARÍA FLORENCIA AGÜERO HUERTA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL
Y AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	Dr. ANDRÉS H. FUENTES CASTILLO - UTFSM
PROFESOR CORREFERENTE	:	Dr. RODRIGO DEMARCO - UTFSM
PROFESOR CORREFERENTE EXTERNO	:	Dr. JUAN J. CRUZ VILLANUEVA

ABRIL 2026



*Al camino recorrido, el presente y todo lo que
viene...*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi familia. A mi madre y padre, que me trajeron a este mundo y que de una u otra manera incitaron y a que siguiera el camino académico. Agradecer a mi familia nuclear, Mia y Luciano por acompañarme y mostrarme que con amor todo se puede y que somos infinitamente capaces de hacer lo que nos propongamos. A mis hermanos y cuñados por estar siempre apoyando en lo que necesitase, desde palabras de aliento, consejos hasta lo materialmente necesario.

A mis amigos y amigas por siempre creer en mí y que a pesar de que el camino se haya puesto cuesta arriba en varias ocasiones, siempre sostuvieron y transmitieron la convicción de que lo lograría.

En lo académico quisiera agradecer a Gonzalo Olivarez, por su gran apoyo en todo lo que tuvo que ver con el montaje del aparato experimental y por su gran voluntad para otorgarme su ayuda en lo que fuese necesario. A Ignacio Verdugo, acompañar mi proceso de principio a fin y por su gran disposición a ayudarme en la comprensión y ejecución de todo lo relacionado al procesamiento de imágenes y revisiones finales. A Juan J. Cruz por guiarme, transmitirme su conocimiento e interés y apoyarme fehacientemente en la realización de las campañas experimentales. A Rodrigo Demarco por dar una mirada crítica y ayudarme a profundizar y mejorar el análisis de los resultados. A Felipe Escudero, por disponerse a explicarme pedagógicamente la metodología. A Paulo, por apoyar en los infinitos intentos de realizar un sistema de medición de masa milimétrico, que desafortunadamente al final no fue utilizado. A Mauricio Aravena, por su ingenio y por invertir desinteresadamente su tiempo en desarrollar un mecanismo alzador de mecha con lo que hubiese disponible. A Pablo Pinto por descifrar y transmitir la manera de utilizar la balanza analítica para medir y registrar la pérdida de masa en tiempo real. A Andrés Fuentes por motivarme a seguir este camino y apoyarme siempre que fue necesario. A todos los profesores que me entregaron sus saberes e irreversiblemente expandieron en mí los límites del conocimiento y la devoción por la comprensión de los fenómenos de la naturaleza, las matemáticas y las ciencias.

RESUMEN EJECUTIVO

El ensayo del punto de humo ASTM D1322 se ha utilizado ampliamente durante años para evaluar la propensión a la formación de hollín en los combustibles de aviación. Sin embargo, su dependencia del ojo humano como instrumento de medición ha llevado a la investigación de técnicas más sofisticadas. Este estudio presenta una nueva metodología de medición que ha demostrado ser considerablemente más reproducible que el método ASTM. Este método reduce el error y es más directo que otras propuestas, como estimar la altura de la llama mediante un umbral de luminosidad o gradientes de primer orden de la luminosidad del hollín, sugeridas por otros autores. Aquí a través de técnicas de emisión/absorción se capturó la cola de humo generada después del punto de humo. Se midieron parámetros como la fracción volumétrica de hollín (en adelante f_s), la integral radial de f_s (en adelante β_{soot}), la masa total de hollín (en adelante Γ), el *Carbon to Soot* (CtS) y la temperatura de la llama (T_s) antes, durante y después del punto de humo con el fin de estudiar la fenomenología del hollín alrededor de este punto. Además, se midió la pérdida de masa de combustible ($\dot{m}$) con la cual se identificó un punto de inflexión al graficarla contra la altura de llama. Para la configuración experimental, se requirió una ligera modificación de la lámpara de humo, junto con el uso de una cámara Manta G145 B, un LED Thorlabs M660L4, una balanza analítica de precisión de 0.001 g, un motor lineal Thorlabs LTS300, una computadora y algunos accesorios ópticos como lentes acromáticas vis-nir y una esfera integradora.

Palabras clave: Punto de humo, ASTM D1322, Combustibles de aviación, Formación de hollín, Técnicas de emisión/absorción.

ABSTRACT

The ASTM D1322 smoke point test has been widely used for years to evaluate the soot formation tendency of aviation fuels. However, its reliance on the human eye as a measuring instrument has motivated the exploration of more advanced techniques. This study presents a new measurement methodology that has proven to be considerably more reproducible than the ASTM method. This approach reduces error and is more straightforward than other proposals, such as estimating flame height using a luminosity threshold or first-order gradients of soot luminosity, as suggested by other authors.

In this work, emission/absorption techniques were used to capture the smoke plume generated beyond the smoke point. Parameters such as the soot volume fraction (hereafter f_s), the radial integral of f_s (hereafter β_{soot}), the total soot mass (hereafter γ), the Carbon-to-Soot ratio (CtS), and the flame temperature (T_s) were measured before, during, and after the smoke point in order to study soot phenomenology around this condition. In addition, the fuel mass loss rate ($\dot{m}$) was measured, revealing an inflection point when plotted against flame height.

For the experimental setup, a slight modification of the smoke lamp was required, along with the use of a Manta G145 B camera, a Thorlabs M660L4 LED, a high-precision analytical balance with 0.001 g resolution, a Thorlabs LTS300 linear stage, a computer, and optical accessories such as VIS-NIR

achromatic lenses and an integrating sphere.

Keywords: Laser induced incandescence, soot sizing, time resolved measurement, particle size measurement, candle flames.



Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Aplicación de técnicas ópticas para medición de Smoke Point	3
2.2. Conclusiones Parciales	5
3. Marco teórico	6
3.1. Combustión	6
3.1.1. Gases de efecto invernadero y contaminantes	7
3.2. Hollín	9
3.2.1. Formación del hollín	10
3.2.1.1. Pirólisis	11
3.2.1.2. Germinación (nucleación)	12
3.2.1.3. Crecimiento superficial	12
3.2.1.4. Coalescencia	12
3.2.1.5. Aglomeración	12
3.2.1.6. Proceso de oxidación del hollín	13
3.2.2. Propiedades del hollín	13
3.2.2.1. Fracción en volumen de hollín	13
3.2.2.2. Fracción en volumen de hollín integrada	14
3.2.2.3. Temperatura	15
3.2.2.4. Carbón a hollín	15
3.3. Llama de difusión laminar	16
3.4. Smoke Point (SP)	17
3.4.1. Lámpara de Humo	18
3.4.2. Prueba estándar ASTM D1322	19
3.4.3. Umbralización	21
3.5. Métodos no-intrusivos	23
3.5.1. Consumo de combustible	23
3.5.2. Extinción y emisión de Luz (LE y EMI)	24
3.5.2.1. Cálculo de la fracción en volumen de hollín	25
3.5.2.2. Deconvolución y Onion-Peeling	27

3.5.2.3.	Regularización de Tikhonov	30
3.5.2.4.	Cálculo de la temperatura de hollín	32
3.5.3.	Calibración óptica	36
3.5.3.1.	Esfera de integración	36
3.5.3.2.	Calibración experimental para LE	37
3.5.3.3.	Procedimiento de calibración	39
3.5.3.4.	Calibración del Espectrómetro	40
4.	Metodología	41
4.1.	Configuración Experimental	41
4.1.1.	Combustibles utilizados	42
4.1.2.	Modificación a la Lámpara de Humo	42
4.1.3.	Medición de Punto de Humo en Lámpara modificada según ASTM D1322	43
4.1.4.	Mediciones de Extinción y Emisión de luz	43
4.1.4.1.	Escala	45
4.1.4.2.	Calibración del sistema óptico	46
4.1.4.3.	Punto de humo	46
4.1.5.	Medición de la tasa de consumo de combustible	47
4.1.5.1.	Carbono a hollín	48
4.1.5.2.	Estimación de incertidumbre	48
5.	Resultados	50
5.1.	Extinción y Emisión de luz	50
5.1.1.	Fracción en volumen de hollín	50
5.1.1.1.	Análisis de error en f_s	54
5.2.	Temperatura de llama	55
5.2.1.	Análisis de error en T	58
5.3.	Tasa de consumo de combustible	59
5.4.	Carbon to soot	61
5.5.	Smoke Point	65
5.5.1.	Método ASTM D1322	65
5.5.2.	Determinación de altura mediante binarización	66
5.5.3.	Fracción en volumen de hollín integrada	67
5.5.3.1.	Masa total de hollín	69
5.5.4.	Comparación de métodos para la medición del punto de humo	70
6.	Discusiones y conclusiones	71

Bibliografía**73**

Índice de Tablas

2.1. Resumen de trabajos realizados para mejorar la precisión de la medición del SP en lámparas de humo estandarizadas.	4
3.1. Mezclas de Combustibles de Referencia norma ASTM D1322	21
5.1. Mediciones SP (mm) para los tres combustibles en estudio.	65
5.2. Mediciones del punto de humo obtenidas en este trabajo y comparación con valores de referencia ASTM.	70

Índice de Figuras

3.1. Esquematización de las emisiones a través del uso diario de los combustibles y como afecta al cambio climático [26].	8
3.2. Imagen de microscopio electrónico de una partícula de hollín compuesta por nanopartículas de carbono.	9
3.3. Esquema de los pasos del proceso de formación y oxidación del hollín a partir de un combustible gaseoso.	10
3.4. Imágenes TEM de muestreos de partículas de hollín a lo largo del centerline para una llama de JET A-1 con referencias de las zonas del proceso de formación del hollín. Fuente: Kholghy et al. [5] [35].	11
3.5. Llama de difusión laminar en una Lámpara de Humo Estandarizada. Fuente: Experimentos realizados para este trabajo.	16
3.6. Llama previo al Smoke Point (a), llama después de Smoke Point (b). Fuente: Generación propia en laboratorio EC^2G UTFSM	17
3.7. Lámpara de Humo estandarizada según la norma ASTM D1322	18
3.8. Fases que atraviesa la llama al subir la mecha en una Lámpara de Humo ASTM D1322 Fuente: Norma ASTM D1322	20
3.9. Binarización de imagen de llama por método FURTI. Fuente: Watson et. al [14]	22
3.10. Curvas de tasa de absorción de combustible para mezclas de combustible de referencia de tolueno versus la altura de la llama. Fuente: Watson et. al [14]	23
3.11. Masa de combustible consumida vs tiempo para un rango de alturas de llama. Fuente: Watson et. al [14]	24
3.12. Variación de la función de absorción de hollín. Fuente: Jérôme Yon	27
3.13. (a) Evaluación de la distribución del coeficiente de absorción espectral en una llama axisimetrica, (b) discretización del dominio del problema. Fuente: Daun 2006 et al. [55]	29
3.14. Esquema de la curva L.	31
3.15. Geometría de una sección transversal en una llama axisimétrica. Fuente: L.H. Liu et al [56]	33
3.16. Referencia geométrica de dos superficies diferenciales al interior de una esfera. Fuente: Labsphere.	37
3.17. Curva de calibración. La curva azul corresponde a la radiancia medida en la esfera de integración y la curva segmentada es la de un cuerpo negro ideal.	39
4.1. Configuración experimental para aplicación de LE y EMI y medición simultánea de tasa de consumo de combustible a una Lámpara de humo estandarizada Fuente: Elaboración propia.	41
4.2. Lámpara de humo Estándar, con modificación para permitir el paso de la luz a través del camino óptico. Fuente: Elaboración propia.	43
4.3. Metodología propuesta para el cálculo de la fracción en volumen y la temperatura de hollín. Fuente: Elaboración propia.	44

4.4. Imagen de regla utilizada para generar escala de px a mm. Fuente: EC^2G	45
4.5. Setup experimental utilizado para calibraciones radiométricas. Fuente: EC^2G	46
5.1. Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 1, con progresión de alturas de llama.	51
5.2. Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 2, con progresión de alturas de llama.	52
5.3. Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 3, con progresión de alturas de llama.	52
5.4. Peaks de fracción en volumen de hollín para los combustible 1, 2 y 3.	53
5.5. Fracción volumétrica de hollín a lo largo del eje de la llama. (a) Combustible 1, (b) Combustible 2, (c) Combustible 3.	53
5.6. Campos de incertidumbre de f_s , error porcentual.	54
5.7. Campos de temperatura de llama para el combustible 1.	55
5.8. Campos de temperatura de llama para el combustible 2.	56
5.9. Campos de temperatura de llama para el combustible 3.	57
5.10. Temperatura mínima en la punta de la llama. Valor absoluto para cada caso de cada combustible.	57
5.11. Perfiles axiales de temperatura a lo largo del eje de la llama: (a) Combustible 1, (b) Combustible 2 y (c) Combustible 3.	58
5.12. Campos de incertidumbre de T_s , error porcentual.	59
5.13. Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 1.	60
5.14. Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 2.	61
5.15. Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 3.	61
5.16. Carbon to soot comparación.	62
5.17. Relación Carbon-to-Soot (CtS) para los combustibles 1, 2 y 3, con progresión de alturas de llama.	63
5.18. Imágenes de llama binarizada. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.	66
5.19. Fracción en volumen de hollín integrada radialmente con progresión de alturas de llama. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.	68
5.20. Carga de hollín del para distintas alturas de llama combustibles. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.	69

1 | Introducción

La norma ASTM D1322-19 define un método de ensayo para medir el punto de humo (SP), un indicador de la tendencia a formar hollín en querosenos y combustibles de aviación [1]. En este ensayo, el SP se define como la altura máxima de llama alcanzada en una lámpara estandarizada de mecha antes de la aparición de una estela visible de humo por encima de la punta de la llama [2]. El procedimiento manual, basado en la observación visual del operador, presenta limitaciones de repetibilidad y posibles sesgos experimentales, lo que ha motivado el desarrollo de métodos automatizados.

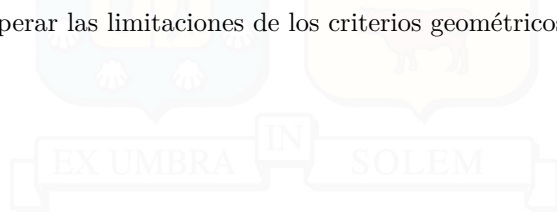
Entre estos se incluyen el uso de cámaras CCD y la aplicación de umbrales de luminosidad para la medición automática de la altura de la llama, como en la norma actualizada que emplea el método propuesto por [3], el cual identifica automáticamente el punto de humo a partir de un cambio brusco en la forma de la llama, determinado mediante el análisis del diámetro de Feret. También se incluyen el método FURTI, basado en el punto de inflexión entre la altura de la llama y la tasa de consumo de combustible, el uso de gradientes de luminosidad de primer orden y los enfoques de doble umbral que identifican desviaciones de la linealidad al aproximarse al SP. Más recientemente, también se han explorado técnicas de aumento de imagen combinadas con herramientas de inteligencia artificial [4]. Sin embargo, los métodos basados en altura son sensibles al umbral de intensidad utilizado para distinguir la señal de la llama del fondo [5], y todos estos enfoques determinan el SP a partir de criterios geométricos o de luminosidad, sin abordar directamente la dinámica interna del hollín dentro de la llama.

A pesar de numerosos estudios, los mecanismos fisicoquímicos que gobiernan la transición al punto de humo aún no se comprenden completamente. En llamas de difusión laminar, la distribución axial de la fracción volumétrica de hollín (f_s) generalmente aumenta desde la base de la llama, alcanza un máximo en regiones dominadas por la formación de hollín y el crecimiento superficial, y posteriormente disminuye hacia la punta de la llama debido a la oxidación [6]. El punto de humo representa la condición límite en la cual el hollín formado dentro de la llama ya no se oxida completamente y comienza a escapar de la región luminosa como humo visible [7, 8, 9]. Sin embargo, la influencia de la química del combustible, particularmente el contenido aromático, sobre la distribución espacial del balance entre formación y oxidación de hollín aún no está completamente caracterizada.

Además, la dinámica del hollín está estrechamente acoplada al campo térmico: un aumento en la concentración de hollín afecta las pérdidas de calor por radiación, lo que puede reducir localmente la temperatura, afectando las tasas de oxidación y el balance global de hollín [10, 11]. La integración radial de f_s a lo largo del eje de la llama z , definida como $\beta_{soot}(z) = \int_0^R f_s(r, z) dr$, proporciona una forma de estimar el balance global entre formación y oxidación de hollín [12]. Esta evaluación permite definir el estado de la llama previo a la emisión sostenida de hollín, una condición que los métodos geométricos no logran capturar.

Este trabajo caracteriza la evolución del hollín en llamas generadas en una lámpara de mecha tipo ASTM operando en condiciones cercanas al punto de humo, con el objetivo de identificar los

mecanismos fisicoquímicos dependientes del combustible que gobiernan la transición hacia la emisión de humo. Para ello, la lámpara fue modificada para permitir acceso óptico para mediciones simultáneas de extinción de luz (LE) y emisión de la llama (FE) [12, 13], lo que permite determinar la fracción volumétrica de hollín y la temperatura del hollín en dos dimensiones. Las técnicas se aplicaron a llamas de mezclas iso-octano/tolueno, variando el contenido aromático para analizar su efecto sobre las propiedades del hollín en la proximidad del SP. Simultáneamente, la tasa de consumo de combustible se midió utilizando una balanza de precisión. A partir de estos datos, se calculó la eficiencia de conversión de Carbono a Hollín (CtS) para evaluar cambios en la producción de hollín bajo las condiciones de operación de la lámpara. Finalmente, mediante la integración radial de f_s , se propone β_{soot} como una métrica objetiva para la determinación del SP, derivada directamente de los mecanismos físicos observados y orientada a superar las limitaciones de los criterios geométricos actuales.



2 | Revisión Bibliográfica

En este capítulo se muestran los principales trabajos recientes que involucran técnicas ópticas para el estudio de la formación de hollín y los trabajos relacionados a la formación de hollín en velas.

2.1. Aplicación de técnicas ópticas para medición de Smoke Point

Con respecto a los nuevos trabajos donde se utiliza la óptica para la evaluación del Smoke Point, desde 2010 se vienen presentando nuevas ideas con fin de mejorar la técnica propuesta por la ASTM, año en el que se patentó un sistema [3] que adopta la configuración estándar ASTM D1322, acoplando esta con una cámara (CCD), permitiendo así una medición automatizada de la altura de la llama. Se analiza la intensidad de la luz para detectar el SP como el punto de mayor sensibilidad a la disminución del diámetro de Feret, al tiempo que se reduce la tasa de absorción de combustible. En 2013 Roger J. Watson [14] presenta el método FURTI, basándose en los estudios de Ko et. al [15] para la detección de altura de llamas en incendios y tomando la idea de D.B. Olson [2] de medir la tasa de consumo de combustible y observar como cambia la pendiente de esta al graficarla contra la altura de la llama. A diferencia de Olson, Watson propone la medición de la altura en base a imágenes tomadas por una cámara web Logitech y luego procesadas en MATLAB, donde fueron convertidas a formato binario mediante la aplicación de un umbral de intensidad de luz, determinado experimentalmente. Unos años más tarde B. Graziano [16] se centra en el desarrollo de una nueva metodología para el análisis automático de determinación de la morfología de la llama durante las mediciones de la tasa de consumo de combustible. Con el fundamento de que el umbral fijo de FURTI era muy sensible a la luminosidad. Se fija el objetivo de realizar un análisis de los gradientes de intensidad de primer orden de la luminosidad del hollín. Las imágenes esta vez son tomadas por una cámara CCD, manteniendo el aparato experimental lo más compatible posible con la configuración ASTM D1322. El mismo año J. Pino [4] implementó una nueva propuesta para medir el SP, en la cual se detectaron cambios morfológicos en la llama identificados a través de su amplificación mediante el algoritmo Eulerian Video Magnification. Los resultados muestran una amplificación efectiva de la geometría de la llama, sin embargo la llama fue generada en un quemador Gülder, no en la lámpara de humo estandarizada por la norma ASTM D1322. En 2019 G. Rubio [5] toma 20 fotos por segundo, grabando un video continuo mientras la llama se eleva por sobre el SP, luego binariza las fotos estableciendo dos umbrales de distintas intensidades de luz, con lo cual definen las alturas de la punta de llama y el ancho de la punta, luego establecen un ratio entre estos parámetros y forman una recta, graficando el ratio contra a altura total de la llama, un cambio brusco en la pendiente de la recta coincidiría con el SP. Además, fabrica sistema de alza de mecha con servomotor y engranajes diseñados para tener una mayor precisión al

momento de subir la mecha. Para las fotos utilizan una Cámara web C270 de Logitech con una resolución de 0,5 mm por pixel, lo que si bien satisface el requerimiento de la norma, es de bastante baja precisión y no supone una mejora en cuanto a la precisión de la metodología propuesta por la norma. El siguiente año L. Corral-Gomez [17] realiza un trabajo similar a G. Rubio, sin embargo esta vez la altura del Punto de Humo se obtiene a partir de la evolución de la relación entre la altura total de la llama y la altura de la punta, pero esta vez, generan una regresión polinómica de grado 10 en vez de un ratio simple, luego calculan la segunda derivada de la función para encontrar en punto en que esta pierde su linealidad. Se observa que esta relación es altamente lineal a alturas por debajo del punto de humo, mientras que esta linealidad desaparece repentinamente cuando se llega al Punto de Humo.

En la tabla 2.1 se entrega un resumen de los trabajos expuestos anteriormente.

Tabla 2.1: Resumen de trabajos realizados para mejorar la precisión de la medición del SP en lámparas de humo estandarizadas.

Autores	Año	Técnica	Combustible	Quemador	Propiedades medidas
Olson <i>et al.</i> [2]	1985	Medición de masa	42 fuels	Diffusion flame apparatus	SP, $\dot{m}$
Reminiac <i>et al.</i> [3]	2010	Umbralización	$C_6H_5CH_3$ y C_8H_{18}	SP lamp	SP
Watson <i>et al.</i> [14]	2013	FURTI	$C_6H_5CH_3, C_8H_{18}$	Wick-fed	SP, $\dot{m}$
Graziano <i>et al.</i> [16]	2018	Gradientes 1 ^{er} orden	Hydrocarbons blends	SP lamp	SP
Pino <i>et al.</i> [4]	2018	Eulerian Video Magnification	Etileno	Gülder	SP
Rubio <i>et al.</i> [5]	2019	Regresión Lineal	$C_6H_5CH_3, C_8H_{18}$	SP Lamp	SP
Corral Gomez <i>et al.</i> [17]	2020	Regresión polinómica	$C_6H_5CH_3, C_8H_{18}$	SP Lamp	SP, TSI

2.2. Conclusiones Parciales

Dados los estudios presentados en la sección anterior, se puede concluir lo siguiente; primero que todo, se deja en evidencia que la metodología propuesta por la norma ASTM D1322, que si bien, ha sido industrialmente utilizada por años para medir la propensión a la generación de hollín de combustibles asimilables a los de aviación, es una técnica, poco precisa que pone en riesgo la salud del operador que está midiendo. Por consiguiente, desde el siglo XXI, distintos autores han realizados trabajos, para profundizar en la generación métodos que entreguen mayor exactitud en los resultados y a la vez menor intrusividad en las técnicas, mejorando así la reproducibilidad, la repetibilidad, disminuyendo el error y proporcionando mayor seguridad a los operadores encargados de realizar las mediciones. Así, la mayoría de estos estudios se han dedicado al desarrollo de metodologías, que a través de la óptica son capaces de medir el Punto de Humo. Sin embargo, la debilidad de estos radica en que dichos métodos ópticos solo han medido la altura de la llama por medio de la detección de la emisión de luz de la misma, lo que, como se mencionó anteriormente no es un indicador directo de la presencia de hollín en la llama, ya que la luz podría ser generada producto de la presencia de otros compuestos.

3 | Marco teórico

3.1. Combustión

La combustión es el descubrimiento más antiguo de la humanidad y que ha sido usada desde hace aproximadamente un millón de años [18]. Al día de hoy, cerca del 90 % de la energía suministrada en el mundo está abastecida por algún proceso que involucre combustión [19], por lo que es un fenómeno que es necesario estudiar para entender cada vez más su comportamiento, beneficios y contras. Para profundizar en el entendimiento del proceso de combustión, se requieren de algunos conceptos y definiciones claves.

La combustión constituye una reacción química caracterizada por el arreglo atómico entre moléculas durante colisiones. Este fenómeno ocurre cuando un comburente (como el oxígeno) interactúa con un combustible (por ejemplo, metano) en presencia de un iniciador (como una chispa), liberando energía térmica mediante un proceso exotérmico. Para iniciar la reacción, el combustible debe superar su temperatura de ignición.

En la mayoría de sistemas de combustión para generación de calor y potencia, el comburente es el oxígeno atmosférico, que representa aproximadamente el 21 % de la composición molar del aire, mientras que el 79 % restante corresponde a nitrógeno. Dado que el nitrógeno actúa principalmente como gas inerte en la liberación de calor, su presencia reduce la temperatura máxima de combustión, ya que parte de la energía térmica se consume en calentar este componente. Por esta razón, aplicaciones que demandan altas temperaturas de combustión emplean aire enriquecido con oxígeno (mayor OI) u oxígeno puro.

Se denomina combustible a cualquier sustancia capaz de liberar energía mediante combustión. La mayoría contiene carbono (C) e hidrógeno (H) en su estructura molecular, denominándose hidrocarburos. Estos compuestos, representados genéricamente como C_mH_n , donde $m, n \in \mathbb{N}$, existen en los tres estados fundamentales de la materia: gaseoso, líquido y sólido.



Este balance representa la combustión completa del metano, el alcano más simple, produciéndose sólo esos dos productos conocidos, la cual, es un resultado ideal de una suma de varios balances intermedios que ocurren en un tiempo cercano a cero, suponiendo también que el suministro de aire es suficiente para llevar a cabo esta reacción ($F/O \approx 1$). El dióxido de carbono (CO_2), el cual es producto de la combustión del metano, si bien es un compuesto necesario para la fotosíntesis, cuanto existe un desequilibrio hay exceso de éste en el ambiente, es nocivo para la salud humana y el medio ambiente, y es al cual en parte se le ha atribuido el cambio climático. Sin embargo existen más compuestos debido a los cuales esto es aun más preocupante.

3.1.1. Gases de efecto invernadero y contaminantes

Hoy, más del 80 % del consumo mundial de energía primaria depende de los portadores de energía fósil [20]. La calidad del aire, el medio ambiente, el clima y la salud están en gran parte influenciados por las emisiones de los procesos de combustión, estos causan preocupación por la grave contaminación del aire en las ciudades y las contribuciones al dióxido de carbono antropogénico.

Como se menciona anteriormente, las partículas de hollín liberadas de muchos sistemas de combustión, el motor interno y el horno, han causado muchos problemas ambientales y podrían causar un gran daño a la salud humana. Para darle frente a las regulaciones cada vez más duras de emisión de hollín, muchos investigadores comenzaron a centrarse en las investigaciones destinadas a reducir la producción de hollín, incluida generación de algunas alternativas para reemplazar los combustibles fósiles tradicionales. Los biocombustibles oxigenados como los alcoholes, ésteres y éteres han atraído cada vez más atenciones como sustitutos de los combustibles convencionales debido a su potencial para reducir la emisión de hollín y gases de efecto invernadero [21] [22] [23]. Como también los son los generados a partir de micro algas o productos de fermentación. [24]

Investigaciones epidemiológicas de muchos años han demostrado una correlación estadísticamente significativa entre la exposición a partículas ambientales y efectos adversos en la salud humana. Estudios realizados en diversos países confirman de forma consistente este impacto, que va más allá de los conocidos problemas respiratorios agudos. Las partículas, especialmente PM_{2.5} y las ultrafinas (<100 nm), pueden agravar condiciones preexistentes como insuficiencia cardíaca congestiva, reducir la variabilidad del ritmo cardíaco, y recientemente se ha identificado a la diabetes como factor de mayor susceptibilidad. Entre los efectos crónicos destaca el cáncer de pulmón, mostrando una clara correlación con la exposición a PM_{2.5} según los hallazgos de Pope et al. (2006) [25].

En el contexto energético global, los combustibles fósiles representan el 80.3 % del consumo de energía primaria, con el 57.7 % destinado al sector transporte [26]. Esta dependencia genera emisiones masivas de contaminantes atmosféricos, incluidos gases de efecto invernadero. El uso intensivo e ineficiente durante el siglo XX ha acelerado el agotamiento de reservas, anticipando el fenómeno de *Peak-Oil* [20] - cuyo punto de inflexión productiva global habría comenzado alrededor de 2010. Esta situación desencadena:

- Incrementos sostenidos en los precios energéticos.
- Conflictos geopolíticos por recursos.
- Preocupación gubernamental por seguridad energética.

Existe consenso en que la era de la energía barata ha concluido definitivamente.

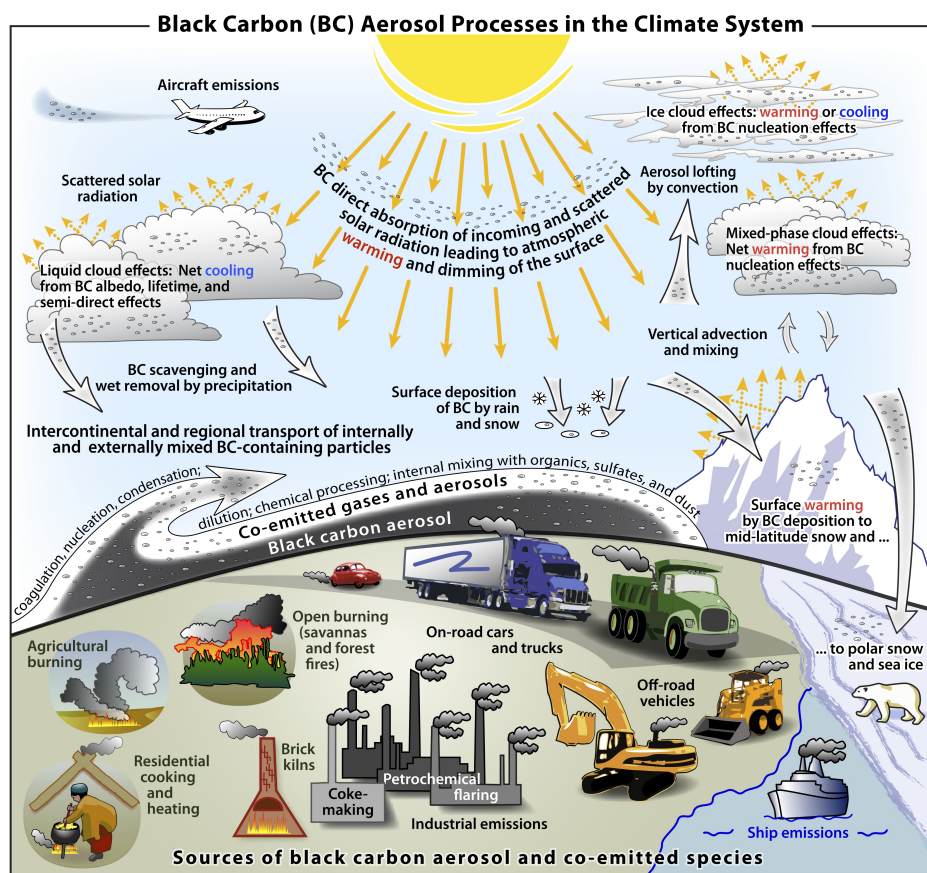


Figura 3.1: Esquematación de las emisiones a través del uso diario de los combustibles y como afecta al cambio climático [26].

El calentamiento global, impulsado por la emisión de gases de efecto invernadero en especial el CO_2 generado en la combustión de hidrocarburos ha alterado drásticamente los ecosistemas y actualmente contribuye a aproximadamente 150.000 muertes anuales. Este incremento progresivo de la temperatura media global pone en peligro a poblaciones enteras por distintos motivos, como el estrés hídrico agudo, que a su vez conlleva mayor riesgo de inseguridad alimentaria, además de inundaciones severas y frecuentes, y brotes de enfermedades como la malaria.

3.2. Hollín

Las formas pequeñas de carbono (ver Fig 3.2) no son solo sustancias que generan preocupación debido a su gran influencia en problemas ambientales y de salud, también son notables por su adaptabilidad, lo que lleva a un amplio espectro de usos debido a sus distintas características. Estas sustancias, con su marco basado en el carbono, exhiben propiedades físicas y químicas notables, que incluyen menor peso, conductividad eléctrica superior en comparación con el cobre, el comportamiento uniforme, el paso de la luz y la capacidad de absorber productos químicos [27]. Estas características resultan principalmente de su diseño atómico y niveles de energía distintos que aparecen a una pequeña escala.

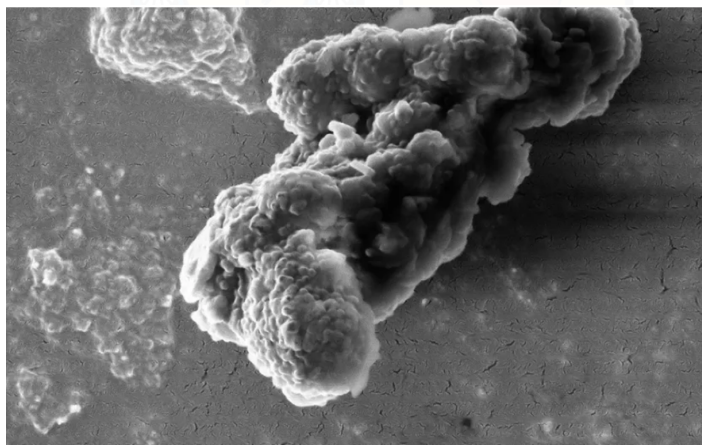


Figura 3.2: Imagen de microscopio electrónico de una partícula de hollín compuesta por nanopartículas de carbono.

Sin embargo, su creación sigue siendo una dificultad técnica y financiera. Las técnicas actuales son complejas y exigen fondos significativos. Para tener éxito en el mercado, es esencial mejorar su fabricación, buscando materiales de partida más baratos y mejores métodos que permitan crear las formas necesarias en grandes cantidades.

Hasta ahora, las fuentes comunes de carbono, como el grafito procesado o el carbono amorfo, son los más utilizados, pero su alto costo, involucrado en la limpieza y procesamiento, los hace inadecuados para aplicaciones a gran escala. Por el contrario, sustancias como la cera de parafina, a menudo utilizada para hacer velas, generalmente no implican fuentes de carbono de alta calidad, sin embargo, cuando estas velas se queman, se produce un sobrante de carbono llamado hollín, que históricamente ha sido considerado como un contaminante.

En los motores diesel, la sustancia sobrante consiste principalmente en carbono, pero también puede tener pequeñas cantidades de hidrógeno, oxígeno y una parte orgánica disoluble (SOF), la cual incluye hidrocarburos y elementos aromáticos que no se queman [28, 29, 30]. Por lo tanto la composición del hollín, en cuanto a contenido en carbono, estructura y morfología, cambia dependiendo de la características del combustible empleado.

3.2.1. Formación del hollín

Los procesos físico-químicos (formación, crecimiento y oxidación) por los que pasan las partículas de carbono hasta formar hollín se describen a continuación y pueden observarse en la Fig 3.3

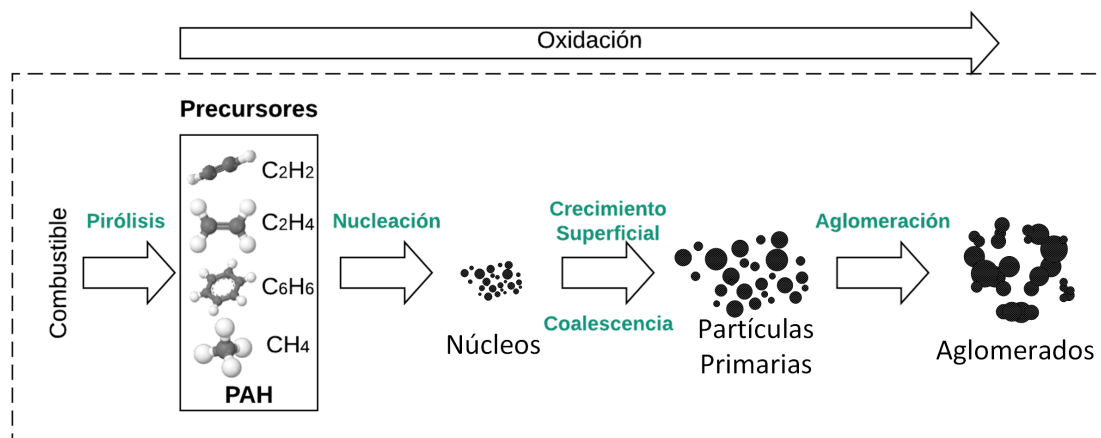


Figura 3.3: Esquema de los pasos del proceso de formación y oxidación del hollín a partir de un combustible gaseoso.

Tanto desde la ingeniería como desde la ciencia, entender los procesos de formación del hollín ha sido un área de interés, observado desde distintos puntos de vista, en algunos casos el hollín es un enemigo de los sistemas de combustión, en especial, debido a los depósitos de esta sustancia en las cámaras. Por otro lado es uno de los principales agentes causantes del cambio climático [31, 32, 33, 34]. Pero visto desde otro lado puede ser un aliado tecnológico.

En un proceso de combustión de un combustible líquido como lo puede ser el JET A-1, el combustible es transformado a productos gaseosos y sólidos (hollín) a través de seis procesos: pirólisis, germinación (nucleación), coalescencia, crecimiento superficial, aglomeración, y finalmente, la oxidación. Estos procesos ocurren en diferentes zonas en la llama, las cuales pueden observarse en la Fig. 3.4.

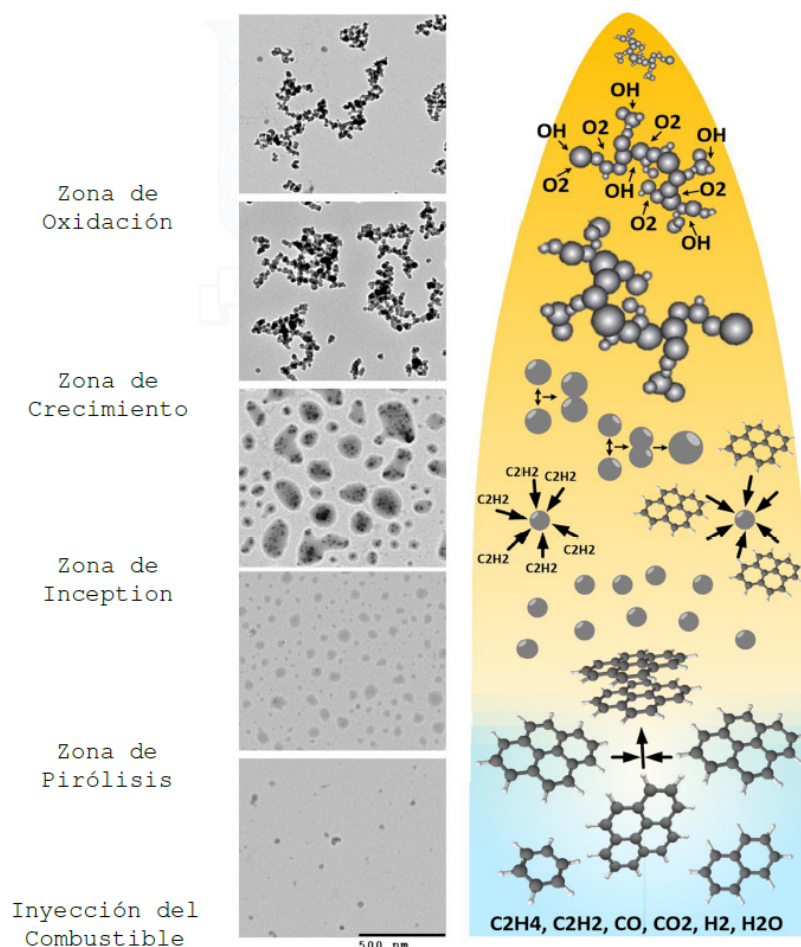


Figura 3.4: Imágenes TEM de muestreos de partículas de hollín a lo largo del centerline para una llama de JET A-1 con referencias de las zonas del proceso de formación del hollín. **Fuente:** Kholghy et al. [5] [35].

3.2.1.1. Pirólisis

La pirólisis es un proceso físico-químico generalmente endotérmico en el cual elementos y compuestos, como los hidrocarburos, se calientan y se degradan sin presencia de oxígeno, por ende, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Así las sustancias alteran su estructura física y composición química ante la presencia de temperaturas elevadas, lo que lo hace dependiente de la temperatura. Este proceso es acompañado de una baja tasa de oxidación, a pesar de una gran presencia de elementos oxidantes [36]. La pirólisis tiene como producto algunas especies que pueden considerarse precursores de hollín. La formación de estos precursores puede considerarse como la parte más importante en el proceso de formación del hollín. Todos los combustibles pasan por la etapa de la pirólisis, donde producen los mismos productos en esencia: hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), hidrocarburos no saturados y poliacetilenos, donde se encuentra especialmente el acetileno (C_2H_2). Algunos de los precursores más importantes de los cuales se tiene registro son: acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), metano (CH_4), propileno (C_3H_6) y el benceno (C_6H_6) [37].

La tasa de oxidación del combustible y la tasa de pirólisis del mismo, son una competencia para la formación de precursores de hollín, la cual, es también dependiente de la temperatura, teniendo la primera un mayor incremento a una variación positiva de la temperatura. Esto podría explicar por qué en las llamas de difusión se produce más hollín cuando se produce un incremento en la temperatura.

3.2.1.2. Germinación (nucleación)

La germinación de partículas primarias de hollín ocurre luego de la pirólisis. Las partículas más pequeñas se conocen como núcleos y tienen un tamaño de entre 1,5 y 2 nm [38]. En este proceso ocurre la adición de cadenas moleculares cortas a cadenas más largas, donde la temperatura para que esto ocurra varía entre los 1300 y 1600 K. Los núcleos no cuentan con una masa significativa, pero contribuyen enormemente a la formación del hollín, pues es a través de la deposición de cadenas que se va produciendo el aumento de masa de las partículas. Este proceso tiene por nombre crecimiento superficial. Como se puede ver en la Fig. 3.4, la nucleación está limitada a la zona entre la pirólisis y la zona de crecimiento.

3.2.1.3. Crecimiento superficial

El decantamiento y adición de cadenas moleculares por sobre la superficie de los núcleos de las partículas formadas en el proceso de nucleación, tiene por nombre crecimiento superficial. Debido a que la zona de germinación es estrecha (véase la Fig. 3.4), se puede decir que este proceso ocurre de forma simultánea al crecimiento superficial. Debido a las altas temperaturas la superficie de las partículas se encuentran calientes, lo que facilita la deposición de los hidrocarburos en estado gaseoso (En su mayoría C_2H_2) aumentando la masa de las partículas, permaneciendo casi invariante el número de ellas. Este crecimiento es sostenido mientras se aleja de la zona de reacción primaria y pasa por zonas más frías menos reactivas, aun donde la concentración de cadenas de hidrocarburos están bajo el límite de nucleación [36]. El tiempo de permanencia de la partícula en la zona de crecimiento superficial tiene una relación proporcional a la masa final (o en la fracción volumétrica f_s), debido a que es en esta zona donde está la mayor tasa de crecimiento. La mayor tasa de crecimiento la tienen las partículas más pequeñas, debido a que poseen mayor número de radicales reactivos [38].

3.2.1.4. Coalescencia

Es el proceso donde se juntan partículas de hollín, con una geometría aproximadamente esférica, en una única partícula igualmente esférica. Esto provoca una reducción en el número de partículas primarias y aumentando la masa unitaria de cada una de las partículas.

3.2.1.5. Aglomeración

Este proceso ocurre gracias a que con la cinética de las partículas, estas van chocando, uniéndose entre sí y conservando la forma original antes del choque. Este proceso tiende a formar ramificaciones

de partículas primarias de hollín.

3.2.1.6. Proceso de oxidación del hollín

Desde un punto de vista estequiométrico se define la oxidación como la conversión del carbono desde los hidrocarburos (reactantes), hacia los productos de la combustión. Es un proceso heterogéneo que ocurre en la superficie de las partículas, y que ocurre simultáneamente en todas las etapas de la formación del hollín (véase la Fig. 3.4), donde las especies oxidantes más reactivas dependen del proceso y estado de la mezcla. Se sabe que a temperaturas por sobre los 1300 K ocurre la oxidación de las partículas [39], teniendo una inusual resistencia a este proceso comparadas a otras estructuras carbónicas, debido a la estructura turbostática que posee la partícula esférica de hollín. Este efecto es sugerido por Smith [40] debido a la similar estructura molecular entre el hollín y el grafito pirolítico.

La oxidación de las pequeñas partículas se considera un proceso de dos etapas: (1) el oxígeno ataca químicamente la superficie de la partícula, es decir, lo absorbe; (2) oxígeno se libera de forma gaseosa desde la superficie, el cual ha reaccionado con parte del combustible, generando productos de la combustión [39]. Finalmente, Bartok y Sarofim [38] indican que probablemente el radical OH es la especie oxidante en condiciones de mezcla rica y estequiométrica, mientras que para mezclas pobres el hollín se oxida por OH, como por O_2 .

3.2.2. Propiedades del hollín

Las propiedades del hollín se pueden analizar desde distintas perspectivas, como las propiedades físicas, de las cuales podemos mencionar el tamaño de partícula, la densidad, la conductividad térmica, entre otras, las propiedades químicas, como su composición química (80–99 % Carbono) e hidrofobicidad, propiedades ópticas, como la absorción y refracción de la luz y las propiedades de combustión, como los son la tasa de formación/oxidación, la temperatura, la fracción en volumen y otras.

En este trabajo nos enfocaremos principalmente en la medición de la **fracción en volumen de hollín** y la **temperatura de hollín**, en puntos cercanos al Smoke Point de las llamas a analizar.

3.2.2.1. Fracción en volumen de hollín

La fracción en volumen de hollín es definida como la razón entre el volumen que ocupa el constituyente en cuestión, en este caso las partículas de hollín y el volumen de todos los demás elementos antes de ser mezclados, en este caso la mezcla de oxidante ($N_2 + O_2$) y combustible (C_2H_4 o C_3H_8). Aunque la razón, que se presenta en la ecuación 3.2, no tiene una unidad física asignada, se utiliza en estas aplicaciones la unidad de ppm (partes por millón):

$$f_s = \frac{V_i}{V} \quad (3.2)$$

Donde:

- V_i = Volumen que ocupa el hollín en la llama.
- V = volumen que ocupan todos los demás componentes en la llama.

Para determinar la fracción en volumen de hollín, es necesario contar con la distribución del coeficiente de absorción espectral, el cual, es obtenido desde mediciones experimentales de extinción a una longitud de onda determinada. Luego con la ley de Beer-Lambert, la que se explica más adelante, se puede calcular el coeficiente de extinción debido a las partículas de hollín, el cual engloba los fenómenos de absorción y dispersión, y se realiza por medio de la transmisión de luz:

$$k_{\lambda}^{ext} = k_{\lambda}^{disp} + k_{\lambda}^{abs} \quad (3.3)$$

Donde:

- k_{λ}^{ext} = coeficiente de extinción.
- k_{λ}^{abs} = coeficiente de absorción.
- k_{λ}^{disp} = coeficiente de dispersión.

Si se asume que estas partículas de hollín se encuentran dentro del límite de tamaño de Rayleigh ($\pi d/\lambda < 0,3$), el coeficiente de dispersión puede ser despreciado.

En la sección 3.5.2 se explicará más en detalle el cálculo utilizado para la fracción en volumen de hollín.

3.2.2.2. Fracción en volumen de hollín integrada

Esta es una de las propiedades más importantes a utilizar en este trabajo, puesto que es a través de ella que se medirá finalmente el Smoke Point de los combustibles en estudio, dado que nos permite evaluar la producción total de hollín en un plano transversal, para cada altura de la llama. La fracción en volumen de hollín integrada, $\beta_{soot}(z)$, se calcula integrando la fracción en volumen de hollín en ese plano a través de la siguiente ecuación:

$$\beta_{soot}(z) = \int_0^{2\pi} \int_0^R f_s(r) r dr d\theta \quad (3.4)$$

Al graficar $\beta_{soot}(z)$ contra la altura de llama podremos identificar cuál es la máxima altura a la cual $\beta_{soot}(z)$ desciende a cero, es en ese lugar donde nos encontramos con el Smoke Point. En llamas posteriores (más altas) se espera observar que el hollín no se vuelve nulo, lo que evidenciará la presencia de una cola de humo, es decir que se ha superado el Smoke Point.

A partir de la fracción en volumen de hollín integrada se puede obtener la *masa total o carga de hollín* con la siguiente ecuación:

$$\int_{z_0}^{z_{max}} \beta_{soot}(z) dz = \int_{z_0}^{z_{max}} \left(\int_0^{2\pi} \int_0^R f_s(r, z) r dr d\theta \right) dz \quad (3.5)$$

Este parámetro nos puede dar una idea de como evoluciona la cantidad de hollín en la llama a medida que ésta pasa por las diferentes fases en cuestión.

3.2.2.3. Temperatura

La temperatura, es la magnitud asociada a la cantidad de calor generada por un cuerpo. Esta propiedad interviene de gran manera en las reacciones químicas que acontecen dentro de una llama, desde las que controlan la formación de distintos compuestos hasta aquellas que se relacionan con la liberación de energía. De ella depende, en parte, la liberación de ciertos contaminantes generados, entre ellos, el monóxido de carbono CO , los óxidos nitrosos NO_X , el hollín, entre otros. A nivel industrial, la temperatura influye en aristas fundamentales, como los son la selección de materiales, los costos, la eficiencia y la seguridad.

Es por eso la importancia de la medición de esta magnitud, y para ello la ciencia a desarrollado distintas técnicas, tanto intrusivas, como lo sería la medición con termocuplas o termómetros, y no intrusivas como la espectroscopía de emisión [41] y la priometría [42] [43]. Esta última técnica es la que se realiza en este trabajo. Es importante mencionar que la temperatura de llama está en equilibrio con la temperatura de hollín, es bajo este precepto que se calcula finalmente la temperatura de hollín en la llama [44].

En el presente estudio se utiliza pirometría, bajo esta técnica se identifican dos métodos y/o técnicas principales para dicha tarea, métodos dos colores, o de un color de emisión para capturar la radiación emitida por las partículas de hollín a una determinada longitud de onda (λ) y asociar dicha emisión a la temperatura que se desea caracterizar. El método a dos colores captura la emisión espontánea de manera simultanea a dos longitudes de onda diferentes permitiendo generar un ratio entre las señales obtenidas, usualmente este método no requiere de una calibración radiométrica ya que el ratio entre las señales contempla los mismo parámetros geométricos, algunos ejemplos son [45] [46]. El método a un solo color (utilizado en este trabajo), es experimentalmente menos complejo, pero requiere necesariamente un proceso de calibración previa de los instrumentos involucrados [47]. esto se explica en la sección 3.5.2.4.

3.2.2.4. Carbón a hollín

Esta propiedad, también llamada por su sigla en inglés CtS (carbon to soot), representa la porción de carbono que es convertida a hollín. Se estima que puede ser una propiedad interesante de calcular, pudiendo proporcionar información para predicciones de comportamientos de llama en modelamientos matemáticos, este parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$CtS = \frac{\dot{m}_{soot}}{\dot{m}_{carbon}} \quad (3.6)$$

Donde $\dot{m}_{soot}$ es el flujo de masa de hollín a cada altura de llama

$$\dot{m}_{\text{soot}}(z) = 2\pi \int_0^\infty \rho_s \sqrt{2g\left(\frac{T}{T_\infty} - 1\right)z + \left(\frac{Q}{A}\right)^2} f_s r dr \quad (3.7)$$

$\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del hollín asumida constante, g es la constante de aceleración de gravedad, Q es el flujo de combustible, A es el área de la sección transversal del tubo de combustible y $T_\infty = 293 \text{ K}$ es la temperatura ambiente. Para calcular este valor, se utiliza la temperatura media de cada combustible y se asume que la aceleración axial debida a la flotabilidad está dada por $g(T/T_\infty - 1)$ [48], y que las partículas de hollín siguen la velocidad del fluido. Se desprecia la componente radial de la velocidad.

3.3. Llama de difusión laminar

Las llamas de difusión laminar son aquellas en que el combustible y el oxidante están separados inicialmente y luego a través de un proceso de mezcla estos reaccionan para dar origen a la combustión. Los procesos de mezcla y las reacciones químicas ocurren de manera simultánea. La mezcla ocurre por difusión molecular en la zona de la llama llegando el oxidante y el combustible a la zona de reacción desde lados completamente opuestos. Una llama de difusión puede ser laminar si el flujo de combustible y oxidante es suave y ordenado (bajo número de Reynolds). Esto es común en mecheros pequeños o quemadores bien controlados. En cambio, en sistemas grandes o con altas velocidades de flujo, la llama puede volverse turbulenta. Algunos ejemplos de llama de difusión son: la llama de una vela, un fósforo, un motor diésel, un quemador Santoro o una lámpara de queroseno o lámpara de humo [1] como el cual puede observarse en la Fig. 3.5.



Figura 3.5: Llama de difusión laminar en una Lámpara de Humo Estandarizada.

Fuente: Experimentos realizados para este trabajo.

En particular, la lámpara de humo estándar (según ASTM D1322) genera una llama de difusión laminar. La llama producida por este dispositivo se establece a un ritmo controlado por la velocidad de

generación de vapor de combustible (dado que la combustión ocurre en fase gaseosa) y la velocidad de mezcla con el oxidante. En una lámpara de humo, el ritmo de reacción y, por consiguiente, las características de la llama (como su altura y estabilidad), están determinados principalmente por la velocidad de evaporación del combustible líquido (generalmente queroseno), la cual depende de factores como el diseño del mechero, el flujo de aire y la temperatura ambiente. A diferencia de una vela, donde la longitud de la mecha influye directamente en la generación de vapores, en la lámpara de humo estos parámetros están estandarizados para garantizar repetibilidad en las mediciones de formación de hollín o emisiones. En este caso lo que influye es la parte de la mecha que sobresale del porta-mecha de la lámpara y por ende entra en contacto con el aire al interior del cuerpo de la lámpara.

3.4. Smoke Point (SP)

El Smoke Point es definido como la altura de una llama a la cual comienza a emitir humo visible (ver figura 3.6), generalmente en su punta. En la teoría se conoce como Laminar Smoke Point (Punto de humo laminar), el cual es la variable que describe las propiedades de formación de hollín de un combustible. Cuánto más alto sea el SP, menores serán sus propiedades de formación de hollín, en términos de generar una tasa mayor de partículas de hollín. Desde hace muchos años, varios estudios se han llevado a cabo sobre el SP para una variedad de combustibles [49] [50] [51]. Para combustibles gaseosos, el SP es medido comúnmente en dispositivos no premezclados, como quemadores Gülder o Santoro. Para el caso de combustible Líquidos, sobre todo en industria, se utiliza la Lámpara de Humo.

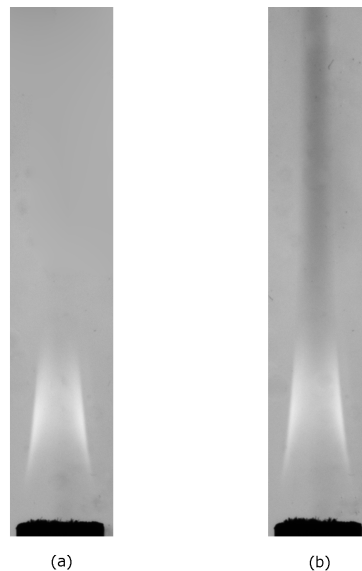


Figura 3.6: Llama previo al Smoke Point (a), llama después de Smoke Point (b).

Fuente: Generación propia en laboratorio EC^2G UTFSM

3.4.1. Lámpara de Humo

La combustión controlada ha sido, desde sus orígenes, una herramienta fundamental para el avance científico y tecnológico. Con el desarrollo de la industria en los siglos XIX y XX, surgió la necesidad de cuantificar y estandarizar los fenómenos asociados a la quema de combustibles líquidos, como la formación de hollín y la eficiencia energética. En este contexto, la lámpara de humo estandarizada (ASTM D1322) se consolidó como un sistema de referencia para el estudio de llamas de difusión laminar, diseñado para garantizar condiciones repetibles y seguras en la evaluación de combustibles.

Este dispositivo, ver en figura 3.7, aunque menos antiguo que sistemas primitivos como las velas, representa un hito en la ingeniería de combustión. Su principio se basa en la regulación precisa del flujo de combustible líquido (queroseno) y aire, permitiendo generar una llama estable y laminar bajo parámetros controlados. A diferencia de las velas, cuya composición evolucionó desde grasas animales hasta parafinas industriales, la lámpara de humo ASTM D1322 surgió directamente de la era del petróleo, aprovechando derivados como el queroseno, un combustible ya refinado y de propiedades consistentes, para estandarizar mediciones de opacidad y emisiones.

Su diseño responde a la demanda industrial de métodos objetivos para comparar combustibles, reemplazando enfoques empíricos previos. Hoy, sigue siendo un referente en laboratorios y normativas internacionales, demostrando como la humanidad ha perfeccionado el control del fuego: desde las primeras llamas abiertas hasta sistemas de combustión optimizados para la ciencia.



Figura 3.7: Lámpara de Humo estandarizada según la norma ASTM D1322

Históricamente, los dispositivos de combustión estandarizados han sido herramientas esenciales

para el estudio de llamas y emisiones en la ciencia. Entre ellos, la lámpara de humo ha ocupado un lugar destacado desde su estandarización en el siglo XX, siendo ampliamente utilizada en investigaciones sobre combustión laminar, formación de hollín y evaluación de combustibles líquidos. Este dispositivo fue diseñado específicamente para garantizar repetibilidad y control en condiciones de laboratorio, convirtiéndose en un referente para normativas internacionales.

Su diseño ha permitido estudiar fenómenos clave en la combustión de difusión laminar, como los mecanismos de generación de partículas carbonosas, la influencia de la composición del combustible (ej. queroseno vs. biocombustibles) y los efectos de parámetros operativos (flujo de aire, temperatura). Además, ha servido como base para investigaciones avanzadas, incluyendo la validación de modelos numéricos de combustión, estudios de mitigación de emisiones y el desarrollo de estándares de calidad para combustibles aeronáuticos.

Hoy, la lámpara ASTM D1322 sigue siendo un pilar en laboratorios de investigación y la industria, demostrando cómo la evolución de los sistemas de combustión controlada ha permitido pasar de observaciones empíricas a mediciones cuantitativas y altamente precisas.

El quemador de punto de humo estándar consta de tres partes principales: un depósito de combustible, un cuerpo de lámpara y un soporte de quemador con una chimenea de 13 cm. El cuerpo de la lámpara es un cilindro con un diámetro de 81 mm en su lateral, que posee una puerta circular de cristal para observar la llama. El depósito de combustible (bujía) se puede fijar debajo del cuerpo de la lámpara, permitiendo que la mecha se introduzca en el interior del cuerpo de la lámpara. Éste se puede ajustar verticalmente mediante un mecanismo de tornillo (husillo), lo que controla la cantidad de mecha expuesta en el cuerpo de la lámpara (cámara de combustión). Esto permite al usuario modificar la altura de la llama, medida desde la parte inferior de la mecha expuesta, en un rango que varía de 0 a 50 mm. La altura de la llama se puede medir gracias a una regleta que se encuentra en el fondo del cuerpo de la lámpara, la cual, está cubierta por un vidrio que ayuda al proceso de medición. En la base del cuerpo de la lámpara hay orificios de ventilación que permiten la entrada de aire, mientras que los gases de combustión se expulsan a través de la chimenea. La mecha se coloca de manera que sobresale 6 mm del depósito de combustible, que es su longitud máxima expuesta dentro del cuerpo de la lámpara. Al depósito o estanque se le agrega en su interior de 15 a 20 ml de combustible para poder realizar las pruebas.

3.4.2. Prueba estándar ASTM D1322

Desde 1954, una métrica ampliamente utilizada para la propensión a la formación de hollín es la prueba de Punto de Humo ASTM D1322 [1] (Standard Test Method for Smoke Point of Kerosine and Aviation Turbine Fuel), especialmente en el caso de los combustibles de aviación. Esta prueba utiliza un aparato estandarizado con una llama de difusión laminar alimentada por mecha para cuantificar la propensión a la formación de hollín en función de la altura de la llama que se genera en su interior, cuando se observa la producción incipiente de hollín visible (cola de humo). Esta altura se conoce como Punto de Humo o Smoke Point (SP). Según la norma ASTM, el proceso para obtener el punto de humo requiere que la llama pase por las siguientes etapas:

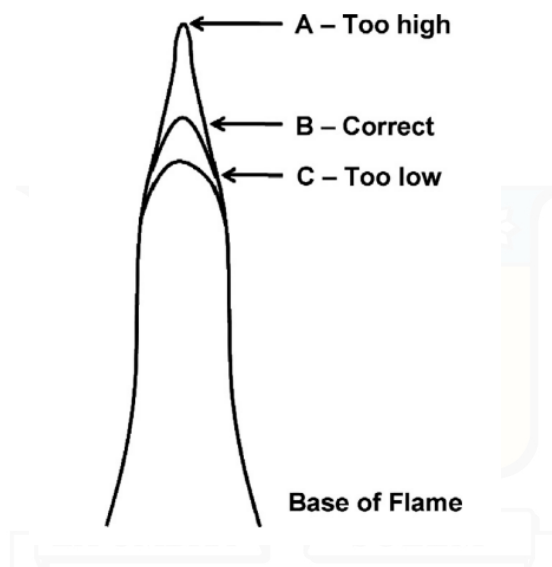


Figura 3.8: Fases que atraviesa la llama al subir la mecha en una Lámpara de Humo ASTM D1322
Fuente: Norma ASTM D1322

1. Punta larga; humo ligeramente visible; llama errática y saltarina.
2. Una punta alargada y puntiaguda con los lados de la punta que parecen cóncavos hacia arriba como se muestra en Figura 3.8 (Llama A).
3. La punta puntiaguda simplemente desaparece, dejando una llama muy ligeramente embotada como se muestra en Figura 3.8 (Llama B). A veces se observan llamas irregulares, erráticas y luminosas cerca de la punta de la llama; estas deben ignorarse.

Para partir con el procedimiento, la bujía de la lámpara se debe cargar con el combustible de referencia o de estudio, luego se hace subir la mecha hasta el borde de la salida de la guía de la mecha, se enciende la llama y se esperan 5 minutos con la llama a 10 mm de altura para que se estabilice, luego se levanta la mecha, hasta que aparece una cola humeante suave, después se baja progresivamente la mecha, haciéndola pasar por las diferentes etapas que se muestran en la figura. Cuando la llama está en la fase B se debe registrar la altura 3.8, esta corresponde al Punto de Humo. Este proceso se realiza 3 veces con una precisión de 0,5 mm. El procedimiento tanto para la calibración como para las mediciones es el mismo.

Primero, se debe realizar la calibración del equipo, para ello se utilizan los siguientes combustibles de referencia en las proporciones que se muestran en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Mezclas de Combustibles de Referencia norma ASTM D1322

Mezcla	Punto de Humo estándar (mm)	Tolueno (%V/V)	2,2,4-Trimetilpentano (%V/V)
1	14.7	40	60
2	20.2	25	75
3	22.7	20	80
4	25.8	15	85
5	30.2	10	90
6	35.4	5	95
7	42.8	0	100

Con las altura obtenidas en la calibración se calcula un factor de corrección con la ecuación 3.8

$$f = \frac{\left(\frac{A_s}{A_d}\right) + \left(\frac{B_s}{B_d}\right)}{2}, \quad (3.8)$$

Donde:

- A_s : Punto de humo estándar de la primera mezcla combustible de referencia
- A_d : Punto de humo determinado experimentalmente para la primera mezcla
- B_s : Punto de humo estándar de la segunda mezcla combustible de referencia
- B_d : Punto de humo determinado experimentalmente para la segunda mezcla

Este factor de corrección se debe calcular con dos combustibles de referencia. Estos se eligen basándose en que sus puntos de humo, de ser posible, se encuentren uno por encima y uno por debajo del punto de humo esperado para la muestra. Luego el Punto de Humo del combustible de estudio se calcula con la ecuación.

$$Punto\ de\ Humo = L * f \quad (3.9)$$

Donde L representa la medida de la altura del combustible de estudio. Mientras más alto sea el Punto de Humo, significa que el combustible tiene una menor propensión a generar hollín y vise-versa. El método presenta una repetibilidad de 2 mm y una reproducibilidad de 3 mm.

3.4.3. Umbralización

La poca reproducibilidad del método ASTM ha dado origen a diversas metodologías para la determinación de la altura de llama. Entre los cuales la metodología ASTM fue actualizada [3] para medir la altura mediante imágenes umbralizadas. Otro método posterior es FURTI de Watson et al., [14], el cual, a su vez fue basado en el método de segmentación utilizado por Ko et al., [?] diseñado

para la detección de incendios. Para la técnica propuesta por Watson et al., para cada altura de llama, se registra la masa del quemador y su contenido durante al menos 1 minuto utilizando el software LabX Direct y una balanza analítica Mettler-Toledo EL204-IC con una precisión de 0,1 mg. La altura de la llama se mide con una cámara web Logitech 9000, utilizada en modo 1280 x 720 a 20 fotogramas por segundo. Las imágenes obtenidas son procesadas utilizando algoritmos en MATLAB, mediante los cuales primero se convierten los fotogramas a escala de grises, creándose una máscara para separar lo que es llama de lo que no. La máscara funciona aplicando a cada píxel un límite de intensidad de luz (umbral) que va desde 0 a 255, donde 0 es negro y 255 es blanco. Dicho umbral representa la intensidad de luz mínima necesaria para ser considerada un punto de llama. Por lo tanto, la llama podría representarse como todos los píxeles blancos de la imagen como se observa en la figura 3.9. Luego utilizan el script para mapear la fila más alta para que contenga un píxel blanco, que corresponde a una altura después de la cual la intensidad es menor que el umbral definido.

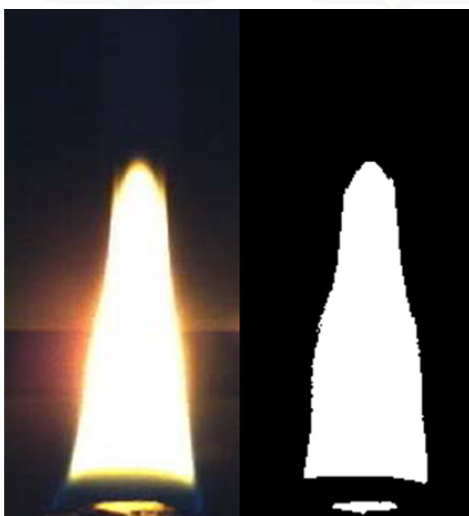


Figura 3.9: Binarización de imagen de llama por método FURTI.

Fuente: Watson et. al [14]

Finalmente para pasar los píxeles a milímetros se fotografía una varilla de calibración de 100 mm de longitud en la funda de la mecha. La imagen se importa a MATLAB y se recorta para obtener el número de píxeles ocupada por la varilla. Así se obtiene la relación px/mm.

Este proceso se realiza para cada fotograma del vídeo eliminándose los datos atípicos, tomándose como criterio si es que se alejan más de dos desviaciones estándar del promedio. Luego de esto se vuelven a obtener los indicadores: altura promedio y desviación estándar. Watson et al., sugiere utilizar la intensidad de la luz (relacionada con la temperatura de la llama y la concentración de hollín) como referencia para medir la altura de la llama, en lugar de la forma de la punta, como una definición menos subjetiva para los cálculos posteriores de la propensión a la formación de hollín.

3.5. Métodos no-intrusivos

El desarrollo de diagnósticos ópticos confiables es complejo en esta área de aplicación, ya que las llamas tienden a ser inestables y susceptibles a cualquier anomalía. El objetivo es buscar una forma de medir que no altere las propiedades ni condiciones físicas de la llama en cuestión, y poder reflejar los resultados físicos de manera exacta. Los métodos ópticos no intrusivos son técnicas de medición y análisis que permiten estudiar un fenómeno, material o sistema sin contacto físico ni perturbación del objeto bajo investigación. Estos métodos se basan en la interacción de la luz (visible, infrarroja, ultravioleta, etc.) con el medio o la muestra, captando información mediante sensores ópticos sin alterar sus propiedades o comportamiento.

3.5.1. Consumo de combustible

Para darle robustez a la medición del Smoke Point, en diferentes estudios [14] [16] [2] se propone la realización de la medición de la tasa de consumo de combustible simultanea a las mediciones ópticas. Según los estudios mencionados, la curva de consumo de combustible versus la altura de llama debiese cambiar su comportamiento, tal como se muestra en la figura 3.10

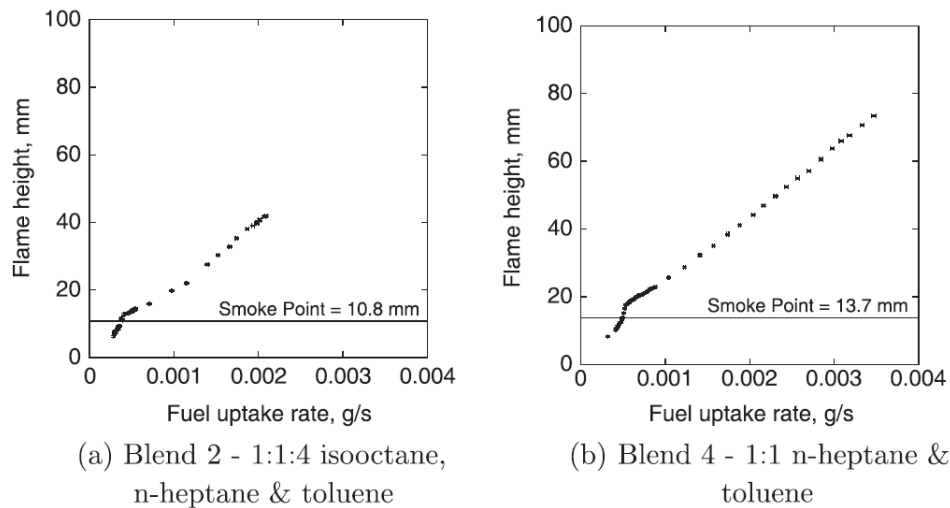


Figura 3.10: Curvas de tasa de absorción de combustible para mezclas de combustible de referencia de tolueno versus la altura de la llama.

Fuente: Watson et. al [14]

Para que el procedimiento de medición sea lo menos intrusivo posible y evitar la posible evaporación del combustible entre mediciones, en los trabajos citados anteriormente se propone que la bujía de la lámpara no debe ser desmontada del sistema para ser pesada, si no que la medición de pérdida de masa debiese ser continua y sin sacar la bujía de la lámpara. Además, esta medición debe ser de forma simultánea a la medición de la altura.

La tasa de consumo corresponde a la pendiente de la regresión lineal que se aplica a la curva resultante del tiempo contra la pérdida de masa tal como lo hacen Watson et. al [14] y Graziano et.al [16] como se muestra en la figura 3.11.

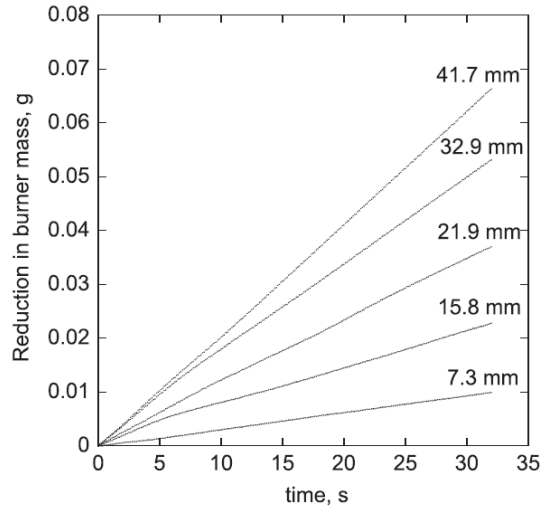


Figura 3.11: Masa de combustible consumida vs tiempo para un rango de alturas de llama.

Fuente: Watson et. al [14]

En la sección 4 se explica como se llevó a cabo el montaje del sistema para cumplir con lo mencionado anteriormente.

3.5.2. Extinción y emisión de Luz (LE y EMI)

La metodología LE y EMI o comunmente llamado MAE, es un método óptico no inytrusivo que combina mediciones de absorción y emisión a la misma longitud de onda para un sistema reactivo. Esto con el objetivo de reducir la incertidumbre al obtener información sobre la temperatura o producción de hollín. La modulación necesita al menos una secuencia de 4 imágenes, que capturen las siguientes características:

- I_0 : intensidad de luz capturada cuando el LED está encendido (laser-on) y no existe llama (flame-off).
- I'_0 : intensidad de luz capturada cuando el LED está apagado (laser-off) y no existe llama (flame-off).
- S : $I + J$ intensidad de luz capturada cuando el LED está encendido (laser-on) y existe llama (flame-on).
- S' : $I' + J$ intensidad de luz capturada cuando el LED está apagado (laser-off) y existe llama (flame-on).

El objetivo de esta secuencia es lograr una reducción en las perturbaciones intrínsecas de las mediciones. Esto se realiza por medio de la sustracción de la intensidad emitida por la llama (S') y por

el entorno (I_0), denominadas como imágenes de referencia. Esta secuencia se realiza para una longitud de onda determinada. Por lo tanto es posible aplicar la ecuación 3.10 con mediciones experimentales de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{S - S'}{I_0 - I'_0}, \quad (3.10)$$

3.5.2.1. Cálculo de la fracción en volumen de hollín

Para el cálculo de la fracción en volumen de hollín se utiliza el método óptico de Extinción de Luz (Light Extinction, LE), que está basado en la atenuación o extinción de la luz al propagarse en un medio. En este sentido, la Ley de Beer Lambert (ver ec 3.11) expresa éste fenómeno de forma analítica, representando la atenuación que causa una sustancia debido a la absorción del medio, en este caso una llama de difusión. De esta forma, esta técnica permite localizar el proceso de producción de hollín al interior de una llama, el cual, es el causante directo de la atenuación de la luz. Se debe considerar que sobre el medio incide un haz de intensidad espectral que es atenuado conforme se propaga debido a la absorción y a la dispersión. La pérdida de intensidad de la luz dI_λ al avanzar una distancia infinitesimal dx , en el camino óptico, es proporcional a la intensidad incidente I_λ y al coeficiente de extinción $\kappa_\lambda^{\text{ext}}$

$$\frac{dI_{\lambda,dx}(x)}{dx} = -\kappa_\lambda^{\text{ext}} I_{\lambda,0}(x) \quad (3.11)$$

Desarrollando esta ecuación diferencial, obtenemos:

$$\frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = \exp \left(- \int_0^L \kappa_\lambda^{\text{ext}} dx \right) \quad (3.12)$$

Este método está basado en el supuesto mencionado anteriormente en la sección 3.2.2.1, que dice que las partículas de hollín generadas en la llama cumplen el criterio de tamaño límite de Rayleigh ($\pi d/\lambda < 03$) [52]. En esta configuración, el coeficiente de dispersión $\kappa_\lambda^{\text{dis}}$ es despreciable y el coeficiente de extinción puede ser aproximado por el coeficiente de absorción $\kappa_\lambda^{\text{abs}}$. Por lo tanto, la transmisividad espectral se puede definir como la razón entre la intensidad del haz que atravesó el medio y la que entra en éste, es decir:

$$\tau_\lambda = \frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = \exp \left\{ - \int_0^L \kappa_\lambda^{\text{abs}} dx \right\} \quad (3.13)$$

Reordenando esta ecuación, podemos obtener lo siguiente,

$$-ln(\tau_\lambda) = \int_0^L \kappa_\lambda^{abs} dx \quad (3.14)$$

donde se puede esclarecer que lo que es captado por la cámara corresponde a una variable integrada que en adelante llamaremos $P(y)$ que en este caso, es igual a $-ln(\tau_\lambda)$ y por su parte lo que queremos calcular, en este caso κ_λ^{abs} corresponde a la variable local.

A partir de la teoría de la dispersión Rayleigh [53] se obtiene la siguiente ecuación, con la cual, podemos relacionar la fracción en volumen de hollín con el coeficiente de absorción del hollín $\kappa_{s,\lambda}$.

$$\kappa_{s,\lambda} = \frac{C_\lambda}{\lambda} f_s \quad (3.15)$$

donde:

- $\kappa_{s,\lambda}$ es el coeficiente de absorción del hollín (s) a la longitud de onda λ ,
- C_λ es una constante o función dependiente de λ ,
- λ es la longitud de onda del haz incidente.
- f_s es la fracción en volumen de hollín.

Con

$$C_\lambda = \frac{36\pi n_s k_s}{(n_s^2 - k_s^2 + 2)^2 + 4n_s^2 k_s^2},$$

Lo que se puede reducir a

$$C_\lambda = 6\pi E_m \quad (3.16)$$

Para darle un valor a E_m se utiliza el modelo de Jerome Jon (ver 3.12), que a la longitud de onda utilizada es igual a $E_m = 0,38$.

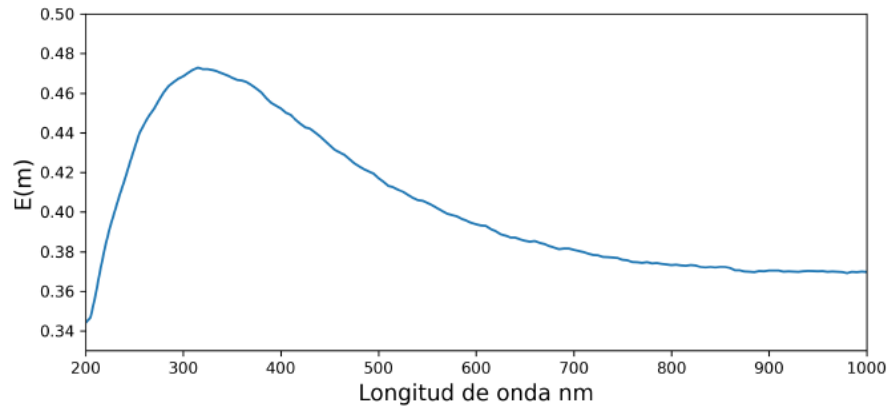


Figura 3.12: Variación de la función de absorción de hollín.
Fuente: Jérôme Yon

Luego el $\kappa_{s,\lambda}$ y el f_s se obtienen después de aplicar el método de Deconvolución de Onion Peeling y la Regularización de Tikhonov que se explica a continuación.

3.5.2.2. Deconvolución y Onion-Peeling

Para comprender el proceso de deconvolución, primero tenemos que comprender que es la convolución, este es un procedimiento mediante el cual se suaviza la señal (imagen en este caso), "mezclando" los datos obtenidos, con los datos de los puntos vecinos (en este caso píxeles). La deconvolución, entonces, es un proceso matemático que busca recuperar la señal original, deshaciendo el efecto de suavizado.

Para los efectos de este estudio se utilizará la deconvolución espacial, esta recuperará la imagen original a partir de la imagen suavizada. Ahora bien el mayor desafío de este procedimiento es la regularización. La imagen obtenida debe ser regularizada por un problema intrínseco del proceso, este es que pequeñas variaciones en la señal convolucionada puede traer grandes variaciones en la señal deconvolucionada, lo que lo vuelve un proceso poco preciso e inestable.

Para lograr regularizar el resultado obtenido, se utiliza la Regularización de Tikhonov, la cual puede recuperar la señal volviéndola más estable y precisa. Esto se hace a través de aplicar limitaciones en la magnitud de la solución, así logra disminuir el ruido y las grandes variaciones de la señal deconvolucionada.

En el contexto de LE, la deconvolución se utiliza para invertir la proyección Abel y recuperar las propiedades locales (radiales) de la llama axisimétrica. lo que permite a su vez obtener la transmisividad

de la luz al ser "obstruida" por las partículas de hollín.

En el caso de LE, la deconvolución se utiliza para recuperar la señal original de emisión que está modulada debido a la respuesta del sistema óptico. Al aplicar la deconvolución, es posible eliminar los efectos no deseados y obtener la información específica de la señal de emisión.

Como resultado de la configuración del sistema implementado en este estudio, la señal que se obtiene mediante la utilización de cámaras EMCCD, se encuentra convolucionada.

Si se asume el supuesto de una geometría axisimétrica, las propiedades del coeficiente de extinción a través de la llama se pueden expresar en términos del radio r para cualquier altura mediante la ecuación de Abel 3.17 [54]:

$$-\ln(\tau_\lambda) = 2 \int_y^R \frac{f(r)r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr \quad (3.17)$$

Esta considera una orientación radial, donde R es el radio máximo de la llama.

El método de Onion-Peeling, propuesto por [55] hace referencia a las capas de una cebolla, dividiendo la llama en secciones anulares tal como se puede apreciar en la figura 3.13 y con lo que se realiza una discretización de la solución de la ecuación de Abel.

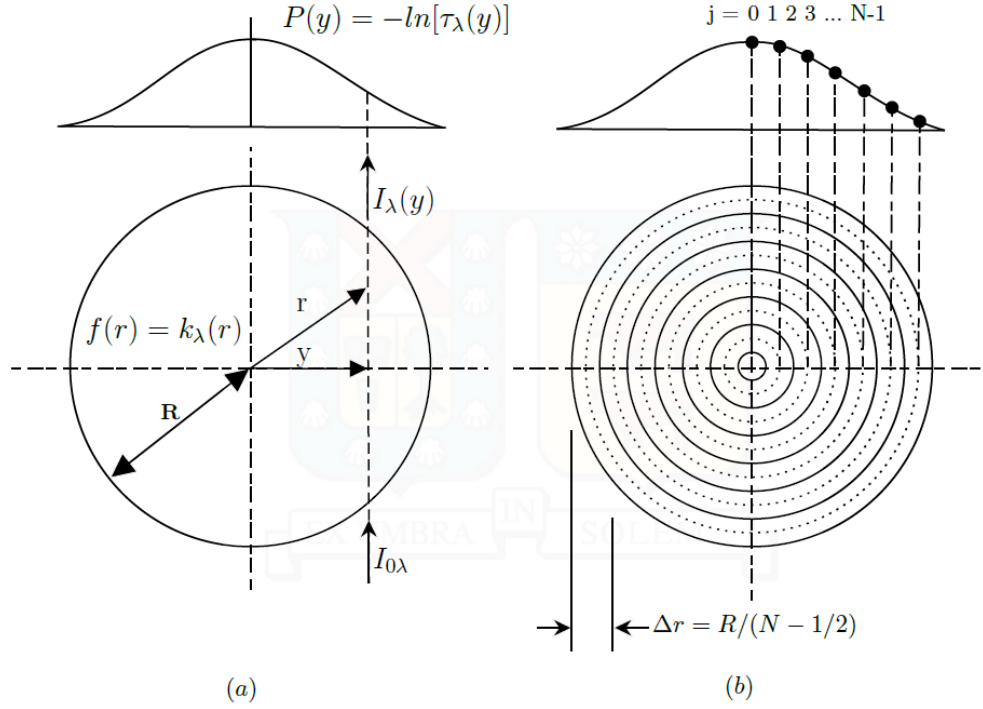


Figura 3.13: (a) Evaluación de la distribución del coeficiente de absorción espectral en una llama axisimetrica, (b) discretización del dominio del problema.

Fuente: Daun 2006 et al. [55]

Luego la ecuación 3.17 se puede discretizar de la siguiente manera:

$$P_i = 2 \sum_{j=i}^{N-1} k_\lambda^{abs}(r_j) \int_{r_j - \Delta r/2}^{r_j + \Delta r/2} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y_i^2}} dr \quad (3.18)$$

En la ecuación 3.18 $y_i = i\Delta r$, $r_j = j\Delta r$, $P_i = P(y_i)$ y $k_\lambda^{abs}(r_j)$ es el coeficiente de absorción en el anillo ubicado en r_j . P_i es la propiedad conocida ($-\ln(\tau_\lambda)$ en este caso) a una distancia i desde el centro de la llama. El método divide la llama en N anillos concéntricos de ancho $\Delta r = R/(N - 1/2)$ (ver figura 3.13). Además, toma el eje central de referencia, con transmitancia espectral constante.

El problema se puede reescribir de forma matricial, y puede ser resuelto de manera sencilla por sustitución hacia atrás aprovechando su forma de matriz triangular.

$$A_{op}x = b \quad (3.19)$$

En donde x corresponde a las variables incógnitas, con $x^T = K_{s,\lambda}(r_j)$, $j = 0, 1, \dots, N - 1$ mientras

que b representa a los datos proyectados, es decir, $b^T = P(y)_i$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$. Finalmente, la matriz A_{OP} es una matriz triangular superior dado al carácter puramente geométrico que presenta desde la axisimetría, representando el largo de los anillos concéntricos, y por tanto viene dada por:

$$A_{OP} = \begin{cases} 0 & , \quad j < i \\ 2\Delta r [(j + 1/2)^2 - i^2]^{1/2} & , \quad j = i \\ 2\Delta r [((j + 1/2)^2 - i^2)^{1/2} - ((j - 1/2)^2 - i^2)^{1/2}] & , \quad j > i \end{cases} \quad (3.20)$$

3.5.2.3. Regularización de Tikhonov

Como se menciona anteriormente la deconvolución, genera algunos problemas en los resultados. En términos matemáticos, esto sucede debido a que el comportamiento de la solución del problema cambia de forma desproporcionada ante pequeñas perturbaciones en los datos de entrada. Esto sucede a menudo cuando una matriz debe ser invertida. Por lo demás, si se busca una solución numérica al problema se puede incurrir en una inestabilidad numérica debido a la precisión finita y limitada con la que cuentan las máquinas de procesamiento. Son todos estos factores los que contribuyen a que el error incremente y se propague hacia el resultado final.

Para darle frente a este inconveniente, se deben presentar problemas bien planteados que se asemejen al problema original (que se encuentra mal planteado) con la intención de llegar a la misma solución considerando un pequeño residual. Para este caso la regularización de Tikhonov propone un problema de mínimos cuadrados para generar una solución que puede expresarse según:

$$\min \{ \|Ax - b\|_2^2 + \alpha \|Lx\|_2^2 \} \quad (3.21)$$

En donde L_x son las diferencias de primer orden, y L es una matriz de orden $N(N + 1)$, definida como:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

aquí α (el factor de regularización) permite establecer el grado de suavizamiento de la curva resultante en el proceso de deconvolución, tomando en cuenta el costo de alejar la solución regularizada de la solución original. El costo que relaciona la precisión de la solución y el nivel de suavizamiento aplicado se puede expresar mediante la Curva L . Esta curva se obtiene graficando $\log \|A\alpha - \mathbf{b}\|_2^2$ versus $\log \|L\mathbf{x}_\alpha\|_2^2$. El α a utilizar será aquel en donde la curvatura, k_α , sea máxima (ver figura 3.14). Dicha curvatura máxima se calcula a través de la siguiente expresión:

$$k_\alpha = \frac{\rho'_\alpha \eta''_\alpha - \rho''_\alpha \eta'_\alpha}{[(\rho'_\alpha)^2 + (\eta'_\alpha)^2]^{3/2}} \quad (3.22)$$

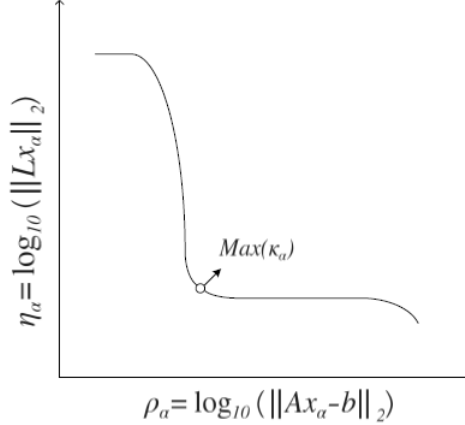


Figura 3.14: Esquema de la curva L .

Donde $\rho_\alpha = \log \|A\alpha - \mathbf{b}\|_2^2$ y $\eta_\alpha = \log \|L\mathbf{x}_\alpha\|_2^2$. Lo que se busca es que α permita un equilibrio entre suavizar lo necesario como para reducir las perturbaciones, pero no tanto como para distanciarse de la solución real. En definitiva, para resolver el problema se plantea el siguiente arreglo matricial:

- $A_{\text{Tik}} = (A^T A + \alpha L^T L)$
- $b_{\text{Tik}} = A^T b$

Estos se utilizan para luego resolver el problema:

$$A_{\text{Tik}} x^* = b_{\text{Tik}} \quad (3.23)$$

En donde x^* corresponde al vector de la solución regularizada.

Finalmente, el coeficiente de absorción espectral se calcula como:

$$k_{s,\lambda} = A_{\text{Tik}}^{-1} b_{\text{Tik}} \quad (3.24)$$

y para la obtención de f_s se utiliza la ecuación 3.15.

3.5.2.4. Cálculo de la temperatura de hollín

Como se mencionó anteriormente la temperatura de hollín es obtenida mediante pirometría de un color a 660 ± 25 nm. La técnica se fundamenta en la medición de la radiación emitida por el hollín a 660 nm, también se toma como referencia para el cálculo, la fracción en volumen de hollín. La intensidad de radiación de emisión y absorción de una llama a través de un camino óptico se puede describir, de la siguiente manera [45]:

$$\frac{dI_\lambda}{dl} + k_\lambda^{abs}(l) I_\lambda = J_\lambda(l) \quad (3.25)$$

Donde $J_\lambda = k_\lambda^{abs}(r) I_\lambda^{bb}$ representa la emisión de una llama considerando la función de Planck para obtener o describir la intensidad radiativa de cuerpo negro I_λ^{bb} , dada por:

$$I_\lambda^{bb}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} \quad (3.26)$$

Aquí $C_1 = 3.742e^{-16} W m^2$ y $C_2 = 1.4385e^{-2} mK$ son constantes de la Ley de Planck, y T la temperatura del cuerpo (en este caso las partículas de hollín). La solución de la ecuación 3.25 para una determinada posición respecto al centro y de una llama axisimétrica, corresponde a:

$$I_\lambda(y) = \int_{l_0(y)}^{l_1(y)} I_\lambda^{bb} k_\lambda^{abs}(l) \exp\left(-\int_{l_0(y)}^{l_1(y)} k_\lambda^{abs}(l') dl'\right) dl \quad (3.27)$$

Los términos $l_0(y)$ y $l_1(y)$ corresponden a dos referencias espaciales para el principio y el fin del camino óptico, respectivamente. Tomando como referencia a L.H. Liu et al., [56], la geometría de una sección transversal de una llama axisimétrica puede ser discretizada por N anillos concéntricos, como se puede observar en la Figura 3.15.

Considerando que el radio de la llama es R , cada elemento radial viene dado por:

$$r = \sqrt{l^2 + y^2}, \quad (3.28)$$

y por lo tanto el inicio y el final de estos elementos en una posición cualquiera, pueden ser expresados en termino de las coordenadas espaciales para los límites del camino óptico:

$$x_0(y) = -\sqrt{R^2 - y^2} \quad y \quad x_1(y) = \sqrt{R^2 - y^2} \quad (3.29)$$

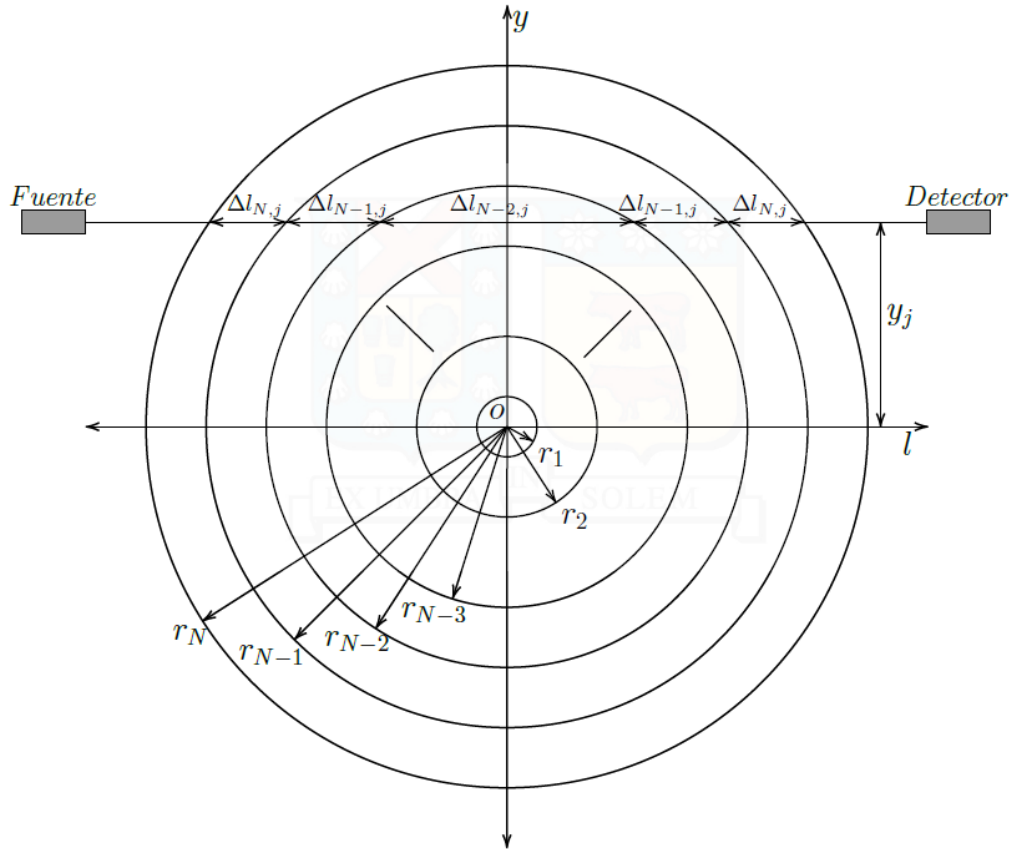


Figura 3.15: Geometría de una sección transversal en una llama axisimétrica.

Fuente: L.H. Liu et al [56]

En base a lo anterior, la ecuación 3.27 puede ser expresada como:

$$I_{\lambda}(y) = \int_{l_0(y)}^{l_1(y)} I_{\lambda}^{bb} k_{\lambda}^{abs} \left(\sqrt{l'^2 + y^2} \right) \exp \left(- \int_{l_0(y)}^{l_1(y)} k_{\lambda}^{abs} \left(\sqrt{l'^2 + y^2} \right) dl' \right) dl \quad (3.30)$$

Luego, la ecuación 3.30 puede ser discretizada como:

$$I_{\lambda}(y) = \sum_{i=1}^N I_{\lambda}^{bb} k_{\lambda}^{abs} \left(\sqrt{l_i^2 + y^2} \right) \exp \left(- \sum_{m=i+1}^N k_{\lambda}^{abs} \left(\sqrt{l_m^2 + y^2} \right) \Delta x \right) \Delta x \quad (3.31)$$

Obteniendo los campos de transmisividad y la resolución del campo bidimensional de la fracción en volumen de hollín, se puede obtener el coeficiente de absorción k_{λ}^{abs} resolviendo la ecuación 3.13. Es importante mencionar que este no depende de λ , debido a que es una propiedad física del hollín. Además, la emisión de cuerpo negro se considera constante en cada anillo discretizado, y solo depende de la temperatura como incógnita. Considerando a $P_j(y)$ como la señal detectada en un punto j cualquiera en el eje de referencia y tomado desde el centro de la llama, la discretización en su forma expandida toma la siguiente forma:

$$P_j(y_j) = \sum_{i=j+1}^N \left(I_i^{bb} [1 - \exp(-k_i^{abs} \Delta l_{i,j})] \exp \left[- \sum_{m=j}^{i-1} k_m^{abs} \Delta l_{m,j} - \sum_{m=j+1}^N k_m^{abs} \Delta l_{l,j} \right] \right) + \sum_{i=j}^N \left(I_i^{bb} [1 - \exp(-k_i^{abs} \Delta l_{i,j})] \exp \left[- \sum_{m=i+1}^{i-1} k_m^{abs} \Delta l_{m,j} \right] \right) \quad (3.32)$$

Donde:

- k_i^{abs} es el coeficiente de absorción en el anillo i -ésimo,
- k_m^{abs} es el efecto de auto absorción con el segmento discretizado anterior.

Las siguientes relaciones geométricas definen la discretización radial:

$$r_j = (j - 0,5) \Delta r$$

$$y_j = (j - 1) \Delta r$$

$$\Delta r = \frac{R}{N - 0,5}$$

Esta expresión se puede escribir de forma matricial $A_{OP}x = b$, donde $x = [I_1^{bb}, I_2^{bb}, \dots, I_N^{bb}]^T$ y $b = [P_1, P_2, \dots, P_N]$, así A_{OP} se expresa como:

$$A_{OP} = \begin{cases} 0, & i < j \\ [1 - \exp(-k_i^{abs} \Delta l_{i,j})] \exp\left(-\sum_{m=i+1}^{j-1} k_m^{abs} \Delta l_{m,j}\right), & i = j \\ [1 - \exp(-k_i^{abs} \Delta l_{i,j})] \left\{ \exp\left[-\sum_{m=j}^{i-1} k_m^{abs} \Delta l_{m,j} - \sum_{m=j+1}^N k_m^{abs} \Delta l_{m,j}\right] \right. \\ \quad \left. + \exp\left[-\sum_{m=i+1}^N k_m^{abs} \Delta l_{m,j}\right] \right\}, & i > j \end{cases}$$

Por la presencia de matrices inversas se puede resolver el sistema mediante el método de eliminación de Gauss-Jordan, así se puede obtener la temperatura a una longitud de onda siguiendo la referencia del trabajo de L.H. Liu et al., [56]

$$T_m = \frac{C_2}{\lambda} \left[\ln \left(\frac{2C_1}{I_{bb}\lambda^5} + 1 \right) \right]^{-1} \quad (3.33)$$

Si bien, con la ecuación 3.33 se puede calcular de manera directa la temperatura de hollín, esta es finalmente determinada mediante la resolución de la ecuación de la Ley de Planck, utilizando los campos radiales de la emisión de la llama J_λ y el coeficiente de absorción del hollín k_λ^{abs} , los cuales son medidos a 660 ± 25 nm.

A partir de las mediciones experimentales que se explican con mayor detalle en la sección 3.5.2 se obtiene el campo de transmisividad τ , con ello y el procedimiento descrito en la sección 3.5.2 se obtiene k_λ^{abs} aplicando el desarrollo de la ecuación 3.13, con esto se calcula J_λ a través de la ecuación 3.25. Además, se les aplica una deconvolución espacial haciendo uso de un enfoque 'onion-peeling' y la regularización de Tikhonov [57] [56]. Considerando todo lo anterior y tomando en cuenta la calibración de pirometría de un color que la expresión queda finalmente como:

$$T_s = \left[-\frac{k_b \lambda}{hc} \ln \left(\frac{\lambda^5 J_\lambda}{2hc^2 \gamma k_\lambda^{abs}} \right) \right]^{-1} \quad (3.34)$$

Donde:

- γ es el factor de calibración.

- c es la velocidad de la luz.
- k_b es la constante de Boltzmann
- h es la constante de Planck

Es importante mencionar que la expresión 3.34 toma la simplificación de la Ley de Planck con $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$

3.5.3. Calibración óptica

3.5.3.1. Esfera de integración

La esfera de integración es un dispositivo para medir la radiación óptica. Se utiliza para distribuir uniformemente la radiación incidente sobre su superficie interior, homogeneizando la señal antes de ser detectada por el espectrómetro. El paso de la luz a través de la esfera comienza con un análisis de las superficies reflectantes difusas. Luego, se obtiene la radiancia de la superficie interior de la esfera de integración y se discuten dos parámetros de la esfera relacionados, el multiplicador de la esfera (sphere multiplier) y la reflectancia promedio. Finalmente, la constante de tiempo de una esfera integradora en relación con las aplicaciones que implican una energía radiante rápida o de corta duración son discutidas.

La teoría de se basa en los principios del intercambio radiativo dentro de una caja de superficies difusas. Considerando el intercambio radiativo entre 2 elementos diferenciales de superficies difusas. La fracción de energía que abandona la superficie diferencial 1 dA_1 y llega a la superficie diferencial 2 dA_2 es conocida como el factor de intercambio (o factor de forma) dF_{d1-d2} . Este está dado por:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (3.35)$$

Donde θ_1 y θ_2 son el ángulo que se forma en la reflexión de los elementos diferenciales en las superficies A_1 y A_2 respectivamente. Si consideramos los elementos diferenciales dA_1 y dA_2 en una superficie esférica difusa (ver figura 3.16), se puede decir que la distancia $S = 2R \cos \theta_1 = 2R \cos \theta_2$, entonces:

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (3.36)$$

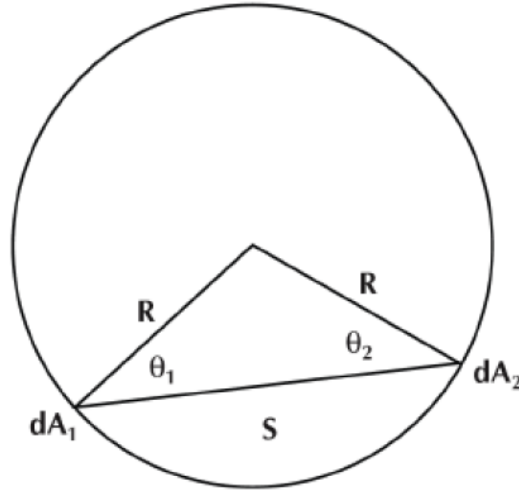


Figura 3.16: Referencia geométrica de dos superficies diferenciales al interior de una esfera.

Fuente: Labsphere.

Si el área infinitesimal dA_1 intercambiase radiación con un área finita A_2 , entonces la ecuación 3.36 pasa a ser:

$$dF_{d_1-d_2} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2} \quad (3.37)$$

Lo que se puede interpretar de la siguiente manera:

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{A_s} \quad (3.38)$$

Donde A_s Representa el área total de la esfera. Con esto se puede deducir que la fracción de flujo radiante recibida por A_2 es la fracción de superficie que consume dentro de la esfera.

3.5.3.2. Calibración experimental para LE

Los datos obtenidos experimentalmente con el método LE o LOSA, facilitan el análisis de la absorción lumínica en una llama, especialmente la causada por las partículas de hollín, como se ha indicado previamente. A partir de esta disminución de la intensidad de la luz, es posible calcular la concentración volumétrica de hollín. Al combinar estos resultados con la técnica LE, se pueden deducir los perfiles de temperatura midiendo la radiación emitida por el hollín. Dicha radiación constituye un parámetro clave no solo para evaluar la tendencia a la formación de hollín, sino también para estudiar la radiación en una llama. Debido a lo anterior es que resulta necesario tener un punto de referencia

desarrollando una calibración óptica de los aparatos de medición, en este caso la cámara utilizada. Para ello se deben considerar las mismas condiciones del experimento, es decir, conservar la distancia óptica al quemador, así como la utilización de los filtros a las longitudes de onda seleccionadas. Finalmente se puede definir la señal calibrada como:

$$S_{\lambda, \text{Calibrada}} = \frac{S_{\lambda}}{\tau_{\text{pyrex}}} \cdot \frac{R(\lambda)}{S_{\text{Referencia}, \lambda}} \quad (3.39)$$

Donde:

- $S_{\lambda, \text{Calibrada}}$ es la señal resultante del proceso de calibración.
- S_{λ} la señal obtenida en el experimento en cuestión.
- τ_{pyrex} el coeficiente de transmisividad del pyrex o vidrio utilizado en las mediciones experimentales para entregar estabilidad a la llama de difusión (este factor puede variar dependiendo de los materiales, y en caso de no ser utilizado es igual a 1).
- $S_{\text{Referencia}, \lambda}$ la señal de referencia obtenida durante el proceso de calibración expuesta a una determinada intensidad lumínica.
- $R(\lambda)$ es la radiancia capturada por el espectrómetro durante el proceso de calibración.

En la figura 3.17 que se muestra a continuación, se pueden observar las radiancias espectrales como función de la longitud de onda a 3000 K desde la esfera de integración siendo iluminada por una lámpara de tungsteno halógena. También se muestra la curva de un cuerpo negro ideal.

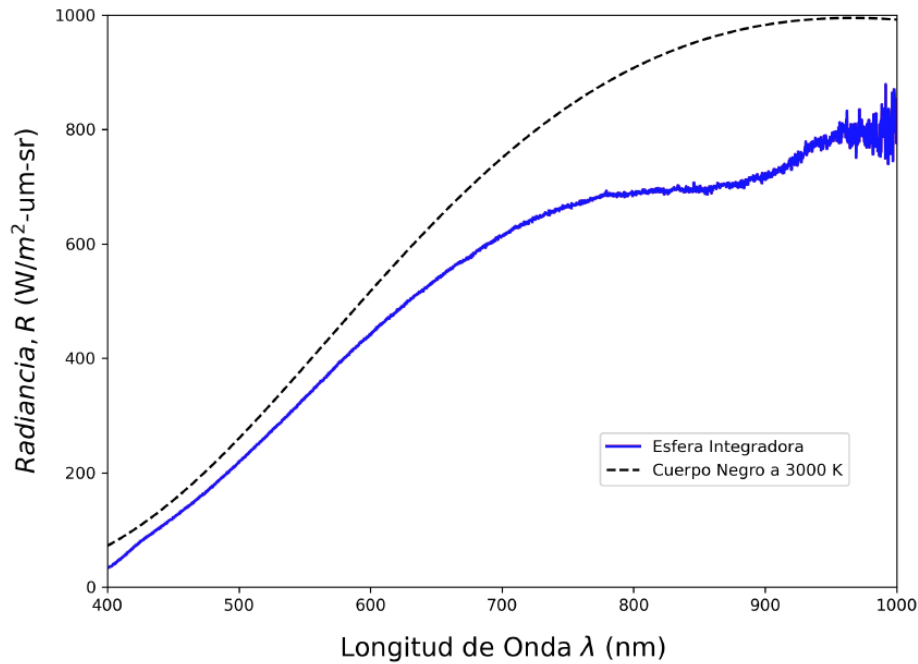


Figura 3.17: Curva de calibración. La curva azul corresponde a la radiancia medida en la esfera de integración y la curva segmentada es la de un cuerpo negro ideal.

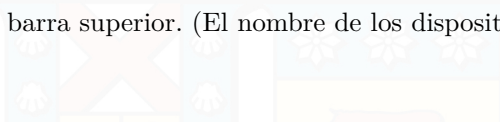
3.5.3.3. Procedimiento de calibración

A continuación se presenta el procedimiento de calibración para utilizar la esfera integradora modelo USLR-V08F-NMNN. Este procedimiento fue realizado por estudiantes del laboratorio EC^2G de la UTFSM.

- Verificar que todos los dispositivos se encuentren conectados correctamente en cada puerto, estos corresponden a: espectrómetro CDS-610 de Labsphere, Detector de intensidad lumínica incorporado en el puerto de la esfera de integración, puerto USB para sincronización y transferencia de datos con la computadora. Además, revisar que el obturador del espectrómetro y del detector se encuentren cerrados, esto se puede verificar en las configuraciones que tiene el obturador (o “Shutter” por su nombre en ingles) las cuales son: cerrado, agujero (pinhole) y, abierto completamente. Por último, comprobar que el equipo se encuentra conectado a la red.
- Encender el equipo con el interruptor (1), posteriormente encender la fuente de alimentación (2) para la lámpara halógena, esto es necesario ya que la lámpara halógena es la principal fuente de calibración y el voltaje debe ser regulado cuidadosamente. Ambos interruptores deben estar encendidos para utilizar el software de HELIOSense, en caso de que la fuente de la lámpara halógena no esté encendida, la lámpara no será detectada en los dispositivos del software, y por

tanto, no se podrá controlar el voltaje para el procedimiento de calibración.

- Comprobados los puntos anteriores ingresar al programa HELIOSense, al momento de ingresar el software buscará los dispositivos conectados. En caso de no reconocer todos los archivos es recomendable pulsar la opción para realizar la búsqueda de los dispositivos nuevamente en el icono de engranaje en la barra superior. (El nombre de los dispositivos debe aparecer en color verde o negro).



Posibles problemas al comenzar

- En caso de que en la lista de dispositivos de la barra izquierda de la interfaz del software HELIOSense no figuren los dispositivos conectados será necesario comprobar que el archivo State Data correspondiente se encuentra cargado como la configuración actual del software. Para ello se debe encontrar la ruta del archivo correspondiente en una carpeta llamada “State File” en la unidad USB perteneciente a la esfera de integración. Se aconseja descargar los archivos contenidos en el USB a una carpeta local para que la ruta de la carpeta mencionada no dependa de la unidad conectada.
- Una vez ubicada la carpeta anteriormente mencionada y desde la interfaz del software HELIOSense en la opción **File** en la barra superior izquierda se debe seleccionar **Open State** y desde ahí se hará click en el archivo XML de State File con el nombre **110690**. Este procedimiento se realiza para que el software cargue una configuración previamente generada por *Labsphere*.

3.5.3.4. Calibración del Espectrómetro

El espectrómetro es el equipo clave para realizar calibraciones radiométricas, ya que mide la intensidad lumínica en diferentes longitudes de onda según su rango de sensibilidad. Esto permite analizar con precisión la radiación emitida por una fuente de luz.

4 | Metodología

4.1. Configuración Experimental

A continuación, se presentan los distintos materiales y métodos utilizados para la aplicación de las técnicas de LE y EMI junto con la medición de la tasa de consumo de combustible y la altura de llama.

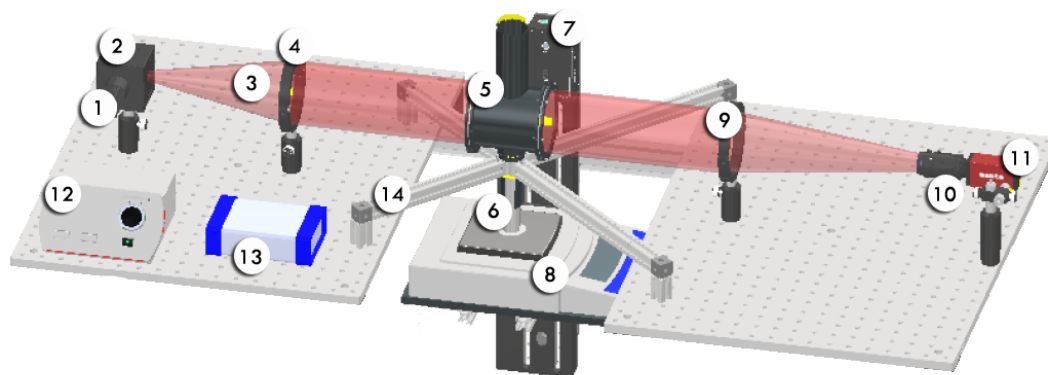


Figura 4.1: Configuración experimental para aplicación de LE y EMI y medición simultánea de tasa de consumo de combustible a una Lámpara de humo estandarizada

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.1 se puede observar el aparato experimental completo, donde los números corresponden a lo siguiente:

1. Cabezal LED Thorlabs M660L4-.
2. Esfera de integración.
3. Luz LED 660 nm.
4. Lente acromática de 75 mm de diámetro con distancia focal de 150 mm.
5. Lámpara de humo estándar con modificación (ver sección 4.1.2)
6. Bujía de la lámpara, es donde se almacena el combustible.
7. Motor lineal Thorlabs LTS300.
8. Balanza analítica Shimadzu UX620H.
9. Lente acromática de 75 mm de diámetro con distancia focal de 300 mm.

10. Lente AF Nikon 85 mm.
11. Cámara Manta G 145B
12. Monitor del LED DC2100
13. Generador de pulsos Quantum 9200 + Sapphire Series, de 4 canales.
14. Soporte de la lámpara

4.1.1. Combustibles utilizados

Los combustibles aplicados en este trabajo son tres de los combustibles de referencia propuestos en la norma ASTM D1322. Se decidió utilizar estos debido a su representatividad. Se utilizó la mezcla 1, 4 y 7 (ver tabla 3.1), sin embargo, para simplificar la nomenclatura, a estos se les llamará 1, 2 y 3 respectivamente, en adelante.

4.1.2. Modificación a la Lámpara de Humo

La lámpara de humo estándar fue ligeramente modificada para permitir la implementación de mediciones por emisión-extinción de luz, altura de llama y consumo de combustible, manteniendo las dimensiones originales establecidas por la norma ASTM D1322. Se rediseñó una nueva lámpara en la cual la ventana circular de vidrio y la pared metálica trasera de la lámpara fueron reemplazadas por ventanas circulares planas de cuarzo de 88 mm de diámetro y 3 mm de espesor, respectivamente. Esta modificación permitió un acceso óptico amplio y sin distorsiones al paso longitudinal del haz de luz (ver Fig. 4.2). El sistema de desplazamiento de la bujía también fue modificado, eliminando el mecanismo original de husillo, dejando así que el movimiento de la bujía dependa solo de el apoyo de ésta en la balanza (ver punto 6 en la figura 4.1). Además, se realizó un nuevo sistema de soporte de la lámpara véase el punto 12 en la figura 4.1 para que de esta manera, no cayera el peso de toda la lámpara sobre la balanza puesto que esto excedía el límite máximo de esa última.

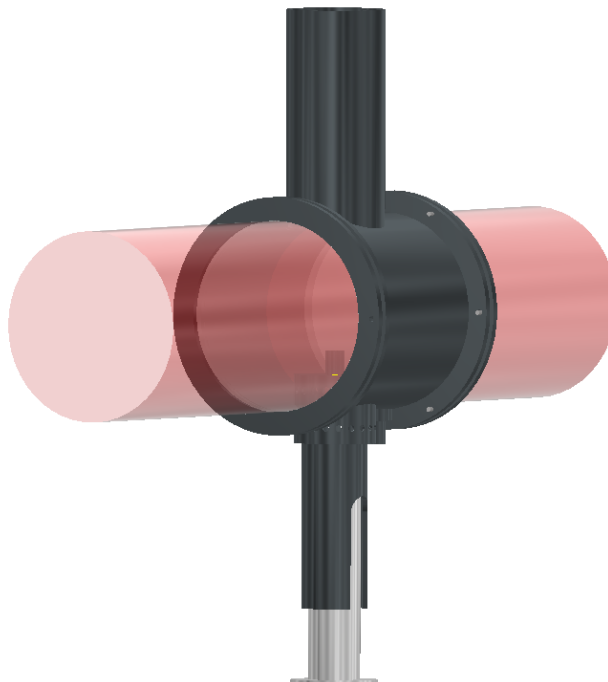


Figura 4.2: Lámpara de humo Estándar, con modificación para permitir el paso de la luz a través del camino óptico.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Medición de Punto de Humo en Lámpara modificada según ASTM D1322

Para asegurarse de que la nueva Lámpara de Humo cumpliera con los rangos de medición admisibles según la norma ASTM D1322, se reemplazó momentáneamente el cuarzo instalado en la parte posterior del cuerpo de la lámpara, por una lata negra en la cual se instaló una regleta igual a la que tiene la Lámpara original. Se realizaron mediciones de SP según la metodología propuesta por la norma ASTM D1322 en ambas lámparas y se compararon.

4.1.4. Mediciones de Extinción y Emisión de luz

El diagrama que se muestra a continuación, explica de forma general la metodología LE y EMI, la cual, es utilizada para el cálculo de la fracción en volumen de hollín y la temperatura de hollín.

En términos generales lo que la figura 4.3 busca explicar, es el cómo, a partir de la metodología experimental y la aplicación de las distintas ecuaciones y métodos matemáticos presentados en la sección

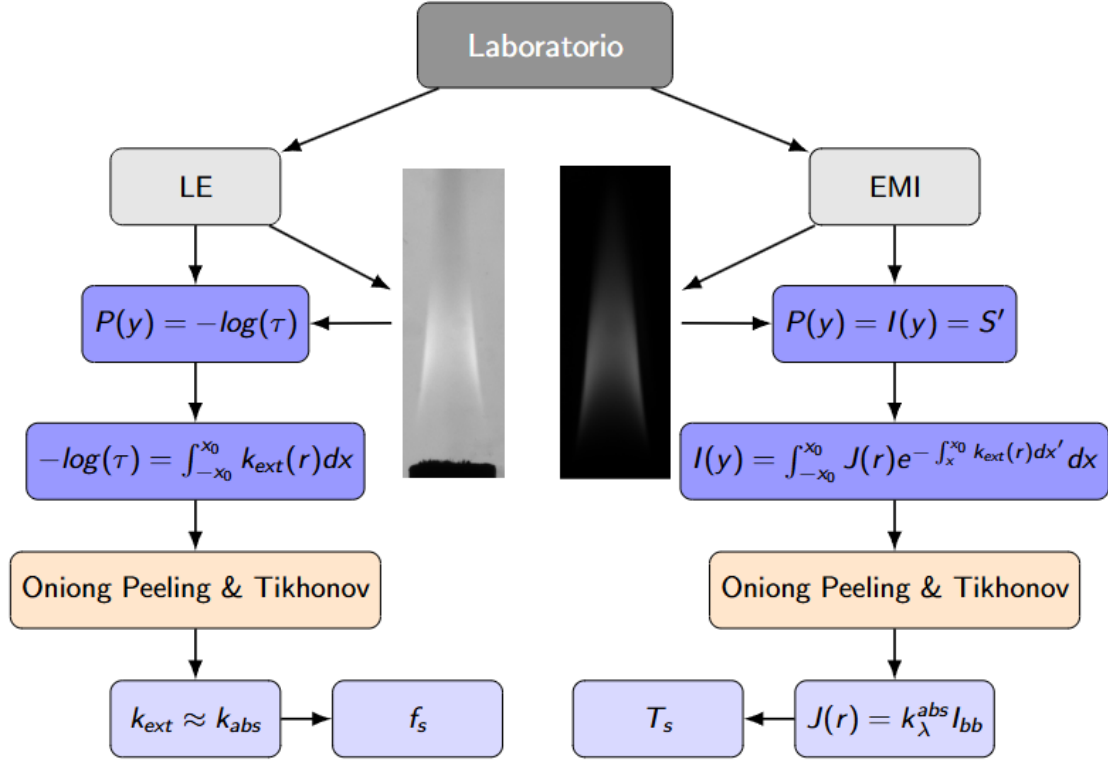


Figura 4.3: Metodología propuesta para el cálculo de la fracción en volumen y la temperatura de hollín.

Fuente: Elaboración propia.

3.5, se puede llegar a conocer la fracción en volumen de hollín y la temperatura de hollín.

En el laboratorio EC^2G se tomaron las imágenes de llama en la Lámpara de Humo según lo descrito en los párrafos siguientes, a partir de dichas imágenes lo que se obtiene es la variable integrada $P(y)$ (color azul oscuro) que para el caso de LE corresponde a $-\ln(\tau)$ y para EMI es la intensidad de luz captada por la cámara cuando el LED está apagado y la llama encendida (S'). Como lo que se busca es generar campos de variables locales y no integradas (en azul claro) en ambos casos de debe aplicar el método de deconvolución de Onion Peeling, que a su vez, posee ciertos problemas de planteo que generan errores en los resultados y por ello se debe aplicar una regularización de Tikhonov. De esta manera se obtienen las variables locales, que para LE corresponde a k_{ext} y para EMI corresponde a $J(r)$, luego f_s y T_s son obtenidos directamente a partir de estas variables con las ecuaciones 3.15 y 3.34 respectivamente.

Para la medición de la extinción de la luz, se generó un haz de luz LED a 660 ± 25 nm, el cual se hace pasar por una esfera de integración para dar uniformidad a la luz, luego por una lente acromática que se encargó de corregir la aberración cromática, siguiendo por el camino óptico se instaló la lámpara de humo, en la cual se generan los diferente tipos de llama a estudiar, luego otra lente acromática y

finalmente la imagen generada es capturada por una cámara Manta 145 B, la cual, se sincroniza con el pulsador de LED con un sincronizador Quantum usando 2 de los 4 canales disponibles.

La metodología experimental consiste en encender la llama, e inmediatamente ajustarla a una altura de 10 mm y dejarla estabilizar a esa altura por 5 minutos, como lo indica la metodología ASTM D1322. Luego, la llama es llevada a una altura cercana al Smoke Point, y se comienzan a realizar las mediciones, subiendo la bujía 0,003 mm en cada una de ellas. Se toman 9 medidas en total tomando puntos anteriores y más allá del Smoke Point. La altura se ajustó con un motor lineal (paso de 0,003 mm) con 2 minutos de estabilización por punto. En cada punto se tomaron 200 fotos a 4 fps, alternando LED encendido/apagado.

4.1.4.1. Escala

Como las dimensiones de la imagen son captadas por la cámara como píxeles, para tener una lectura clara, se hace necesario, realizar un escalamiento de píxeles a milímetros. Esto se realiza instalando una regla en el centro del quemador, la cual es fotografiada utilizando la misma cámara y distancia focal que para las mediciones. Las imágenes obtenidas (ver Figura 4.4) son procesadas para obtener la escala exacta que transforma píxeles a milímetros.



Figura 4.4: Imagen de regla utilizada para generar escala de px a mm.

Fuente: EC^2G .

4.1.4.2. Calibración del sistema óptico

Para garantizar mediciones precisas, se ajustó meticulosamente el sistema óptico. La radiancia espectral de referencia se obtuvo empleando un equipo de calibración Labsphere USLR-V, que incluye una lámpara de tungsteno de amplio espectro (100 W) con capacidad de operación de hasta 2500 nm. Esta fuente lumínica se acopló a una esfera integradora de 8 pulgadas, mientras que las mediciones se realizaron con un espectrómetro CDS-610, previamente calibrado y certificado por el NIST con rango de 350 a 1000 nm.

La configuración experimental, ilustrada en la imagen 4.1, mantuvo la distancia focal fija entre la cámara y el centro del quemador. Se midió la respuesta del sensor para cada el filtro óptico (660 nm), determinando así los factores de calibración correspondientes. Estos valores se aplicaron posteriormente durante el análisis de datos, siguiendo el protocolo establecido en la ecuación 3.39.

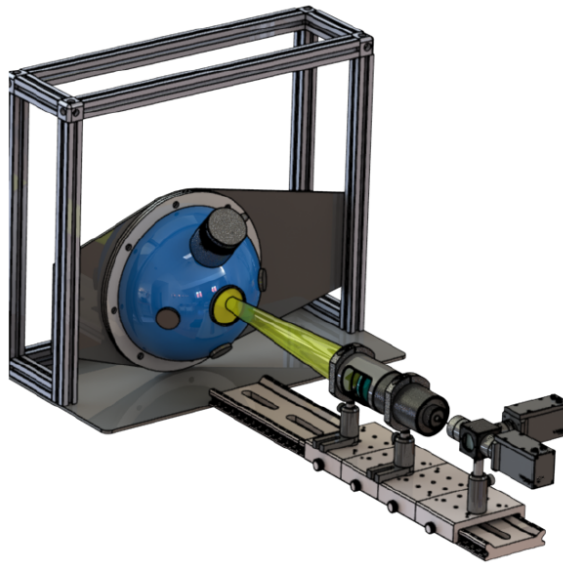


Figura 4.5: Setup experimental utilizado para calibraciones radiométricas.

Fuente: EC^2G .

La figura 4.5 es referencial ya que para las mediciones con la técnica LE y EMI, no se utiliza PMT's, sino que una cámara de 12 bits por pixel.

4.1.4.3. Punto de humo

La medición del punto de humo se propone utilizando la fracción volumétrica de hollín integrada a lo largo de la altura axial de la llama (β_{soot}), de manera similar a lo reportado por [58]. En llamas

de difusión, este parámetro aumenta desde la base, alcanza un máximo en la región dominante de formación de hollín y posteriormente disminuye debido a procesos de oxidación, volviéndose despreciable cerca de la punta de la llama. Por lo tanto, la altura de la llama se define como el primer punto, después del máximo de β_{soot} , donde el hollín se vuelve cero, definiendo un umbral de 0,5 % del valor máximo, con el fin de garantizar robustez frente al ruido experimental y evitar la identificación espuria de cero debido a fluctuaciones locales. La altura correspondiente al cruce de β_{soot} con el umbral se determinó mediante interpolación lineal entre los dos puntos axiales consecutivos que delimitan dicho cruce, proporcionando así una mayor precisión espacial en la medición. Este punto representa el fin efectivo de la región luminosa y la oxidación completa del hollín antes de su emisión al entorno. Para la identificación del punto de humo, se analiza el perfil de cada llama; cuando después del máximo de β_{soot} este no vuelve a acercarse a dicho umbral, significa que existe una “cola de humo”, es decir, se ha superado el punto de humo. El punto de humo corresponde a la mayor altura de llama (HAB) que no presenta esta característica.

Para contrastar los resultados, el punto de humo se midió aplicando umbrales de intensidad de luz (`v2.threshold`), basados en los estudios de [14], [15] y en la versión actualizada del estándar ASTM [3]. También se realizaron mediciones siguiendo la metodología antigua ASTM 1322 [1]. Estos resultados se presentan en la sección 5.5.4.

4.1.5. Medición de la tasa de consumo de combustible

La regulación del flujo de combustible en la Lámpara de Humo se realiza aumentando la exposición de la mecha en el cuerpo de la lámpara, para más flujo o disminuyendo esta para menos flujo. Esto a su vez, se realiza ascendiendo o descendiendo la bujía, que es donde se almacena el combustible. Para ascender y descender la mecha de la lámpara, se utilizó un motor lineal Thorlabs LTS300, con un paso de 3 μm , lo que permitió un desplazamiento altamente controlado de la mecha, para ello la bujía de la lámpara fue posicionada sobre el plato de una balanza analítica Shimadzu UX620H con precisión de 0,001 g, (ver punto 6 y 8 de la figura 4.1), lo que permitió realizar mediciones de consumo de combustible continuamente y con alta precisión.

La lectura de la balanza fue registrada en excel en tiempo real, con un intervalo entre registros de 1 segundo. Luego, a los datos obtenidos se les aplicó una regresión lineal y se calculó la pendiente que corresponde a la tasa de consumo de combustible.

Cabe mencionar que estas mediciones se realizaron 5 veces y una de ellas se realizó en paralelo a

la toma de imágenes, con el fin de tener la misma procedencia de datos para el caso de las mediciones ópticas y las de flujo de combustible.

4.1.5.1. Carbono a hollín

La eficiencia de conversión de carbono a hollín, conocida como *carbon-to-soot conversion efficiency* (CtS), se utiliza en este trabajo como un parámetro global para cuantificar la fracción de carbono del combustible que se transforma en partículas de hollín a lo largo de la llama. La CtS se define como la razón entre el flujo másico de hollín y el flujo másico de carbono inyectado en la llama, según

$$\text{CtS} = \frac{\dot{m}_{\text{hollín}}}{\dot{m}_{\text{carbono}}}. \quad (4.1)$$

El flujo másico de hollín se evalúa como función de la altura axial mediante $\dot{m}_{\text{hollín}}(z) = 2\pi \int_0^\infty \rho_s u_z(z) f_s(r, z) r dr$, donde f_s es la fracción volumétrica de hollín y $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del hollín, asumida constante; se considera que las partículas de hollín siguen la velocidad del flujo de gas y se desprecia la componente radial de la velocidad. La velocidad axial se estima como $u_z(z) = \sqrt{2g(T/T_\infty - 1)z + (Q/A)^2}$, asumiendo que la aceleración axial está dominada por efectos de flotabilidad y utilizando $T_a d$ como la temperatura adiabática para cada mezcla y $T_\infty = 293 \text{ K}$, donde g es la aceleración de la gravedad, Q es el caudal volumétrico de combustible y A es el área de la sección transversal del inyector, tal como se ha aplicado en metodologías previamente reportadas para llamas de difusión laminares dominadas por flotabilidad [48]. Esta formulación permite estimar de manera consistente la eficiencia de conversión de carbono a hollín y comparar la propensión a la formación de partículas entre diferentes combustibles.

4.1.5.2. Estimación de incertidumbre

La incertidumbre de los parámetros reconstruidos se evaluó mediante propagación de errores estadísticos utilizando un esquema de simulación de Monte Carlo. Las principales fuentes de variabilidad consideradas fueron el ancho de banda espectral de los filtros ópticos ($\approx 10 \text{ nm}$), el ruido experimental presente en las imágenes de intensidad y la incertidumbre asociada al factor de calibración radiométrica del sistema óptico (γ).

Para cada condición experimental, se realizaron 500 realizaciones independientes del proceso de reconstrucción. En cada iteración, la señal experimental se perturbó añadiendo ruido gaussiano

de media cero con una desviación estándar obtenida a partir de las fluctuaciones observadas en las imágenes experimentales. Adicionalmente, se permitió que el factor de calibración variara dentro del rango de dispersión estimado a partir de las imágenes de calibración.

El conjunto resultante de soluciones se utilizó para calcular la desviación estándar de cada parámetro reconstruido. La incertidumbre se expresó entonces como el error porcentual relativo:

$$\varepsilon_{\phi}(\%) = 100 \frac{\sigma_{\phi}}{\phi}, \quad (4.2)$$

donde ϕ denota el parámetro de interés (f_s o T_s) y σ_{ϕ} corresponde a la desviación estándar obtenida del conjunto de Monte Carlo.

5 | Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación sistemática de las metodologías descritas en el capítulo anterior. Para las técnicas basadas en la óptica, por cada combustible estudiado (en adelante 1, 2 y 3) y para cada altura de llama (9 casos por combustible), se toman 200 fotos, con las cuales, se aplican los métodos de LE y EMI. Por su parte, las mediciones de la tasa de consumo de combustible fueron realizadas con un $n = 5$. Cabe mencionar que una de ellas fue realizada en paralelo a la toma de imágenes. Tanto para las técnicas basadas en la óptica y la medición del flujo de combustible, las distintas alturas de llamas vienen dadas por el paso del motor ($3 \mu m$), el mínimo posible para ese modelo.

Los resultados obtenidos con las distintas metodologías serán contrastados a fin de analizar la fenomenología de la llama, de los distintos combustibles de referencia a medida que se eleva la mecha, progresando hasta el SP, pasando por éste y por puntos sobre éste.

5.1. Extinción y Emisión de luz

Como se mencionó en el capítulo 4.1, a través de las mediciones de extinción y emisión de luz, se determinan la fracción en volumen de hollín y la temperatura de llama. Los resultados se presentan a continuación.

5.1.1. Fracción en volumen de hollín

Se presentan los campos de fracción en volumen de hollín para los tres combustibles, de los cuales podemos obtener una clara referencia de cuál es la llama (**en adelante caso**) en que el hollín deja de ser oxidado por ésta y se comienza a emitir humo. Los casos determinados por simple inspección como puntos de humo son el caso 7 para el combustible 1 y el caso 6 para los combustibles 2 y 3. Si se observan las tres figuras, teniendo en cuenta que el combustible 1 es el que contiene la mayor proporción de tolueno (40 % v/v) y el combustible 3 es 100 % iso-octano, se puede evidenciar que a medida que la cantidad de tolueno aumenta en el combustible, la fracción en volumen de hollín lo hace

también, tal como lo indican Sirignano et al. en [59]. Además, se tiene una primera aproximación a la altura de la llama antes de que esta se abra. La que se obtiene posteriormente a través del análisis del comportamiento de las curvas de fracción en volumen de hollín integrada.

Cuando se analiza el eje central de la llama (DFD) (ver figura 5.5), para la llama de iso-octano (figura 5.5a), se tiene que la mayor curva de f_S se genera cuando la llama está precisamente en el smoke point, lo que coincide con lo reportado por Vlatakis et al. en [60], donde, si bien se analizan llamas de iso-octano con flujo de contracorriente (CDF), es justamente en el smoke point donde la llama alcanza su peak de concentración de hollín. Esto es lo contrario para el caso de las llamas con mayor cantidad de tolueno (figuras 5.5b y 5.5c), donde ocurre que en el smoke point, la concentración de hollín en el eje axial es la más baja. Esta diferencia indica que el comportamiento no está determinado únicamente por la tendencia global a formar hollín a medida que la llama se enriquece, si no, que este es un mecanismo complejo que varía según la composición del combustible y que puede depender de otros factores como el campo térmico y el equilibrio formación-oxidación.

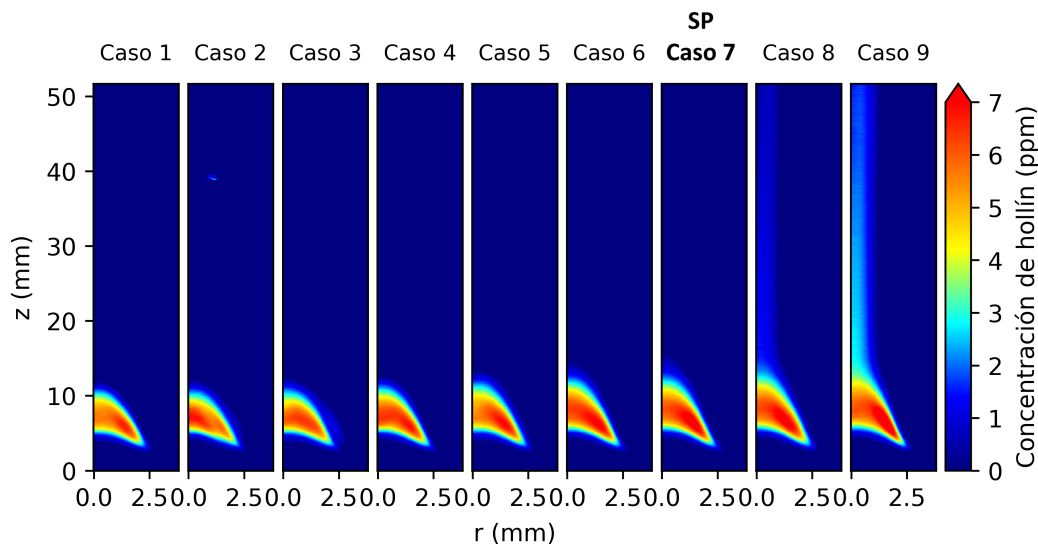


Figura 5.1: Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 1, con progresión de alturas de llama.

La figura 5.4 muestra las fracciones en volumen de hollín máximas para los tres combustibles, cabe mencionar que estas se encuentran, para todos los casos distribuidas hacia las alas de la llama. Bajo este análisis, un hallazgo importante, es que, para todos los combustibles, justo en la medición siguiente al smoke point, la cantidad máxima de hollín disminuye.

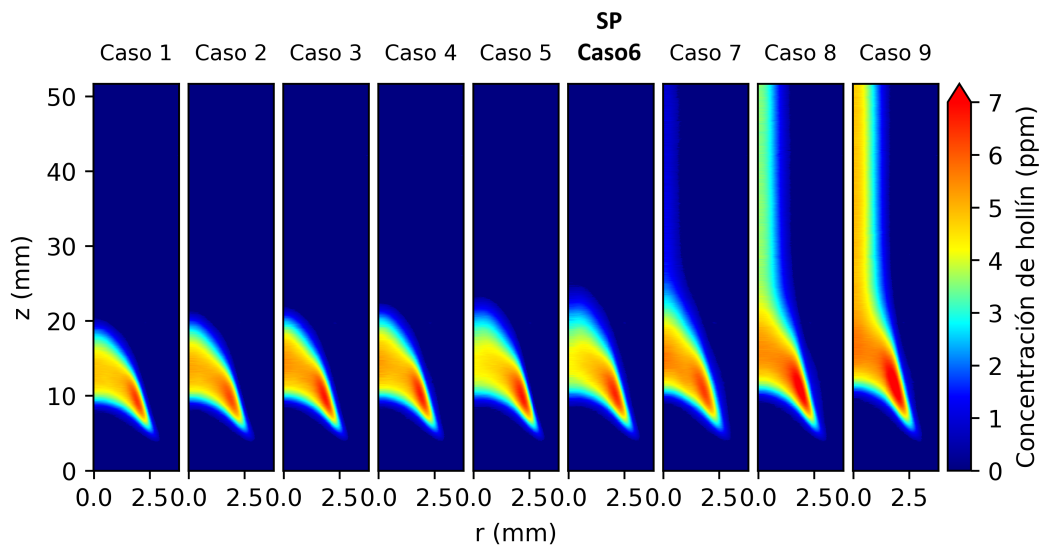


Figura 5.2: Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 2, con progresión de alturas de llama.

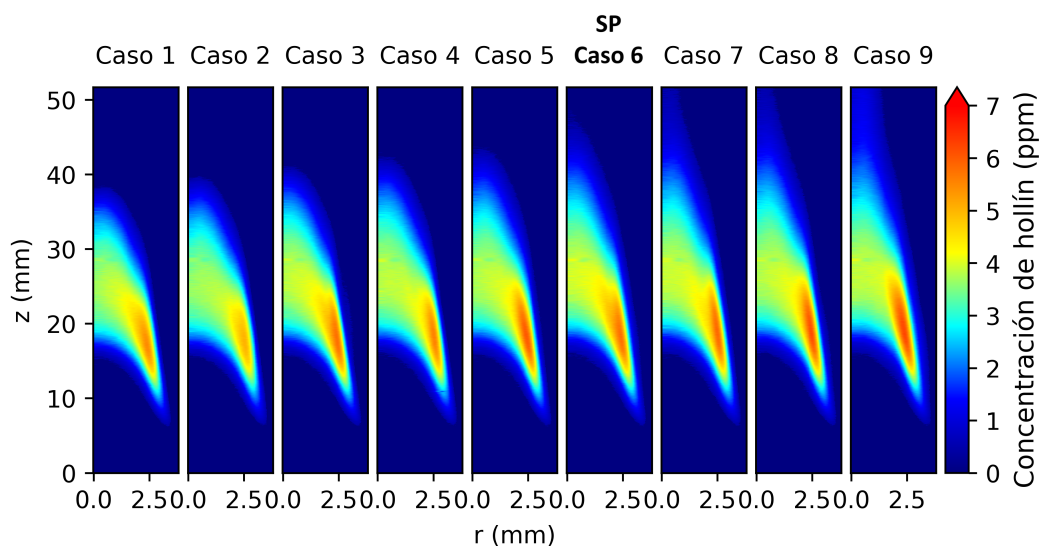


Figura 5.3: Campos de fracción en volumen de hollín para combustible 3, con progresión de alturas de llama.

Este comportamiento es consistente con el aumento del flujo de combustible, que genera una mezcla más rica, una llama más alta y una mayor entrada de aire frío en la zona superior. La dilución resultante reduce la reactividad local y como podremos ver más adelante, también modifica la distribución térmica de la llama.

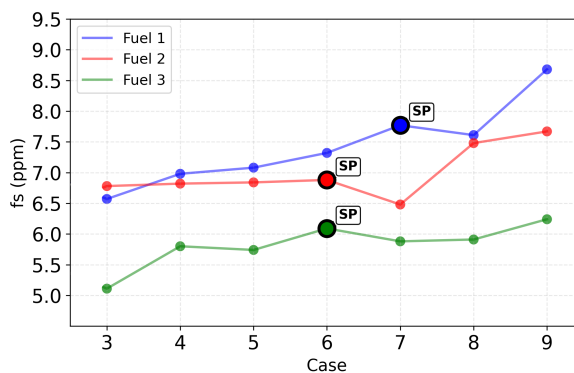


Figura 5.4: Peaks de fracción en volumen de hollín para los combustible 1, 2 y 3.

Por último esta figura logra dejar en evidencia que el combustible con más cantidad de tolueno (combustible 1) presenta una mayor propensión general a la producción de hollín local y por el contrario el combustible 3 (iso-octano) puro una menor propensión.

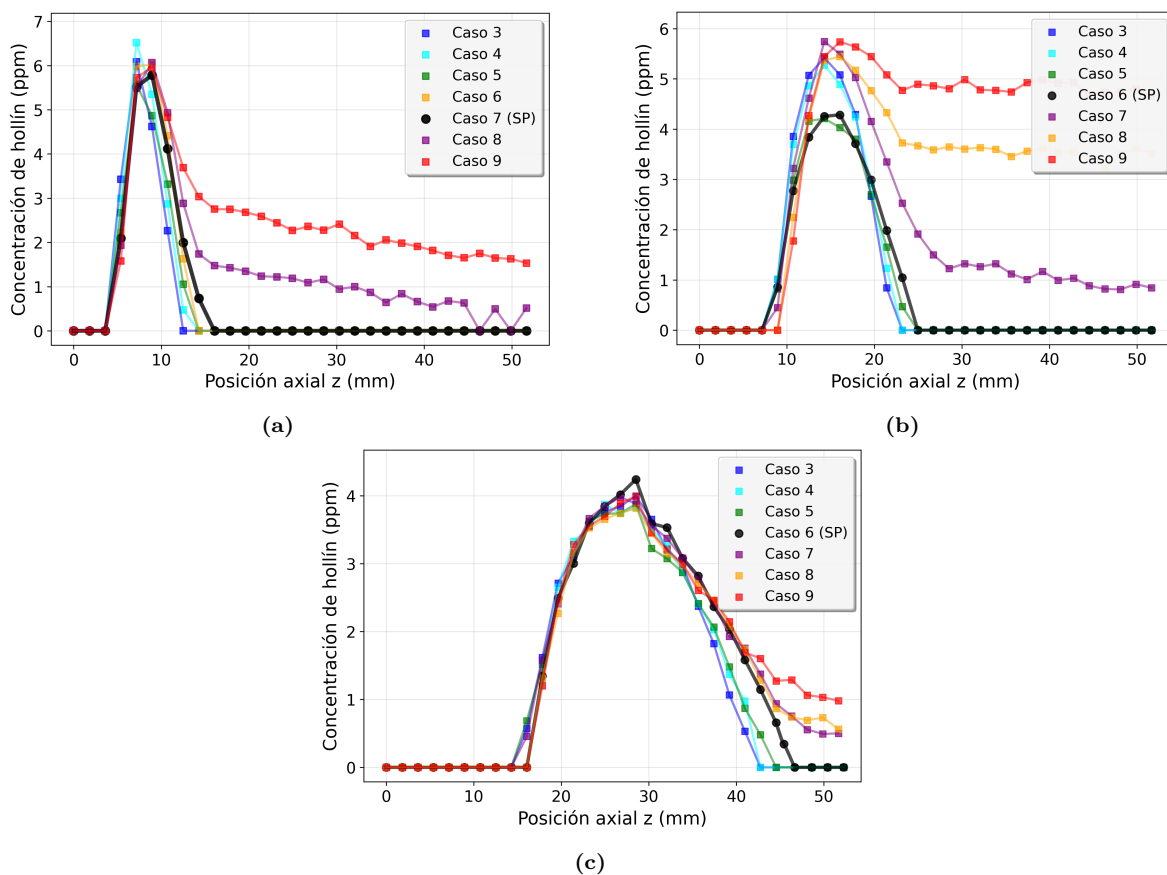


Figura 5.5: Fracción volumétrica de hollín a lo largo del eje de la llama. (a) Combustible 1, (b) Combustible 2, (c) Combustible 3.

5.1.1.1. Análisis de error en f_s

Como se menciona en la sección 4.1.5.2 el error de f_s fue evaluado mediante simulación Monte Carlo con intervalo de confianza del 95 %, mediante el cual, las intensidades experimentales se perturbaban de manera aleatoria siguiendo distribuciones normales caracterizadas por sus desviaciones estándar experimentales. Este enfoque permite capturar de manera natural efectos no lineales del problema inverso y evaluar la robustez del procedimiento completo frente a perturbaciones experimentales.

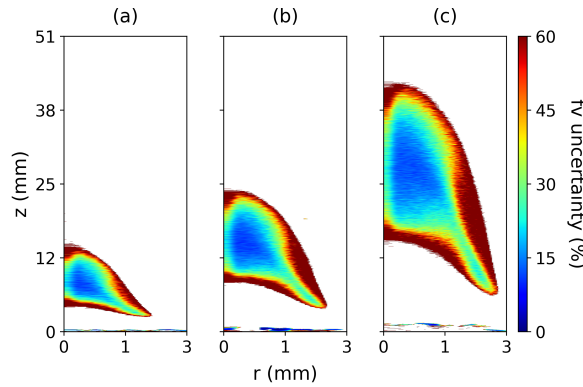


Figura 5.6: Campos de incertidumbre de f_s , error porcentual.

En las regiones centrales de la llama, donde la atenuación es mayor y la relación señal-ruido es favorable, el error relativo típicamente se mantiene por debajo del 10-20 %. Hacia los bordes del dominio y en zonas de baja concentración de hollín, pequeñas fluctuaciones en la señal transmitida se amplifican tras la operación logarítmica y la inversión de Abel, lo que aumenta la dispersión de los resultados. En estas regiones, el error relativo puede alcanzar valores del orden del 40-60 %, comportamiento que también reporta Rosati et al. (2024) [13]. En consecuencia, las estimaciones de f_s son más robustas en áreas con mayor carga de hollín, mientras que los valores cercanos al límite de detección presentan una mayor incertidumbre relativa. Mencionar también, que solo se consideraron regiones físicamente relevantes de la llama, definidas mediante un umbral mínimo de fracción volumétrica. Los errores de este trabajo son asimilables a los reportados por Conrad et al. (2021) [61] y un poco más grande que los derivados de los estudios de Caetano et al. (2013) [62], sin embargo ellos utilizan técnicas de LE y LII.

Las posibles causas de error pueden venir de dos tipos de fuente, primero los errores experimentales, como el ruido de la cámara, la inestabilidad de la llama, suciedad en los lentes o en el cuarzo de la lámpara, variabilidad temporal de la señal, corrección de fondo (fondo no regular), la alineación

óptica, entre otros. Segundo, los errores de cálculo, como la sensibilidad del logaritmo cuando $\tau \rightarrow 1$ (borde de la llama), errores del problema inverso mal condicionado (errores en k_{ext}), incertidumbre en la función de absorción E_m [63], propagación del ruido, entre otros.

5.2. Temperatura de llama

Con respecto a la temperatura de llama, en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se puede observar claramente como esta descende a medida que aumenta la altura de la llama (ver Figura 5.10, disminuyendo significativamente en la punta de la llama después de pasado el smoke point, sobretodo para los combustibles 1 y 2 que son los que tienen mayor contenido de tolueno, llegando a valores cercanos a los 1600 K, para ambos casos, este comportamiento también lo reportaron Consalvi et al. (2017) [64]. En el caso de la temperatura de la punta de la llama enfriada del combustible 3 (100 % iso-octano), esta llega a los 1775 K en el smoke point, lo que es consistente por lo reportado en 2006 por Law et al. en [65], donde se indica que en este punto se estaría en presencia de una mezcla rica. Es de considerar que medir la temperatura en la punta de la llama mediante EMI es delicado ya que hay poca señal sobre ruido.

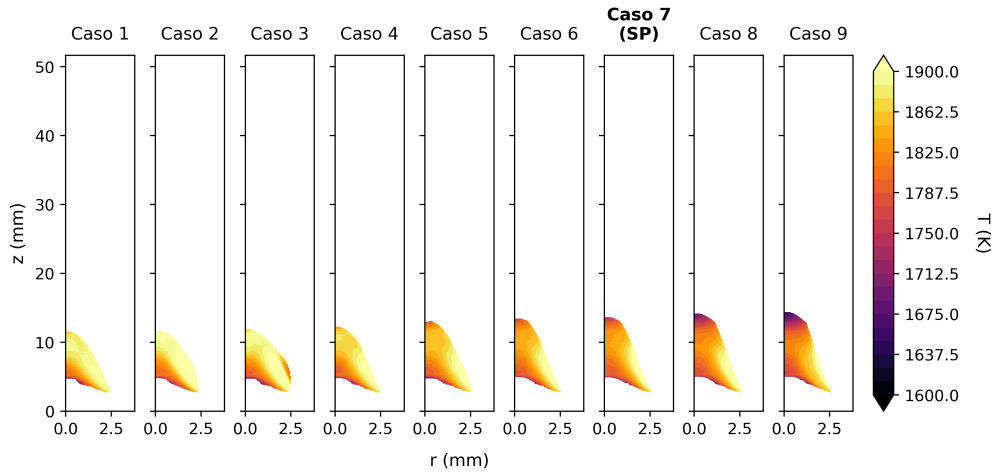


Figura 5.7: Campos de temperatura de llama para el combustible 1.

Con respecto a las temperaturas máximas, esta se ubican sistemáticamente y en todos los casos, en las alas de la llama y muestran un comportamiento ligeramente descendiente a medida que aumenta la altura de cada llama. Por su parte para una llama de iso-octano puro, diluido con N_2 en Vlavakis et al. [60] reportan temperaturas de hasta ≈ 1800 K, más bajas a lo medido en este estudio (≈ 1999 K), sin embargo, en este trabajo el combustible no está diluido, por ende su poder calorífico efectivo

y, por tanto, la temperatura adiabática de llama, no se ve afectada. Otro punto rescatable de [60] es que variaron la tasa de deformación del combustible, observando que a valores mayores de ésta, la temperatura de llama es mayor, esto si bien no se puede comparar directamente con la llama objetivo de este trabajo, al ser una llama difusiva y no de contra corriente, se puede relacionar una alta tasa de deformación con un menor tiempo de residencia de los gases en la zona de reacción de la llama de iso-octano en la lámpara de humo, en otras palabras, se puede deducir que, que a mayor altura de mecha, mayor disponibilidad de combustible, lo que puede causar un aumento en la velocidad de ascenso de las partículas y a su vez al aumentar la altura de la llama de forma más lenta que la velocidad, esto generaría un menor tiempo de residencia, lo que puede ocasionar un menor grado de oxidación del hollín y por ende la visible cola de humo.

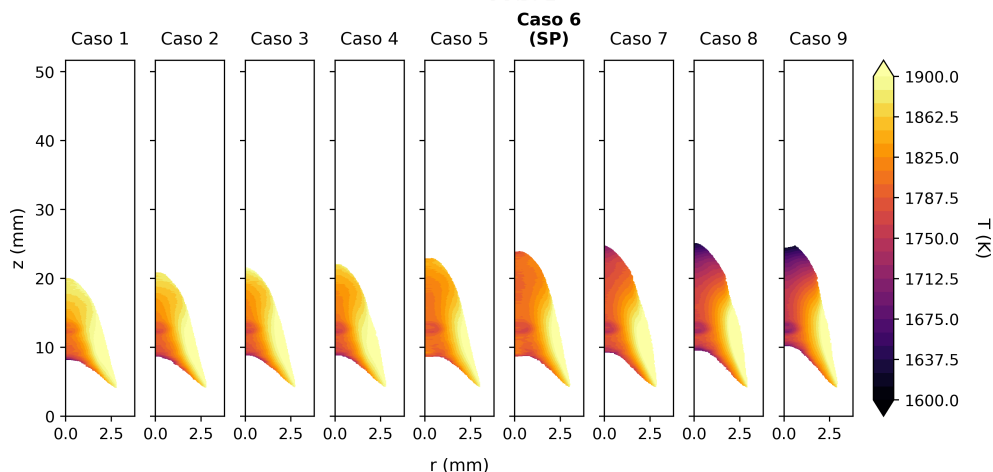


Figura 5.8: Campos de temperatura de llama para el combustible 2.

Cabe mencionar que en Sirignano et al. 2020 [59] al estudiar la temperatura máxima de llama se dieron cuenta de que esta era relativamente constante, al aumentar el porcentaje de tolueno de la mezcla, hasta 70 %, con una mezcla rica de $\phi = 2$ la temperatura máxima se mantiene prácticamente constante en $\approx 1685 \pm 25$ K, comportamiento similar al que ocurre en la las llamas de iso-octano con tolueno de este estudio , sin embargo en este caso los valores son alrededor de los 1900–2000 K, lo que indica que probablemente en la zona de reacción se llega a un ϕ cercano a 1.

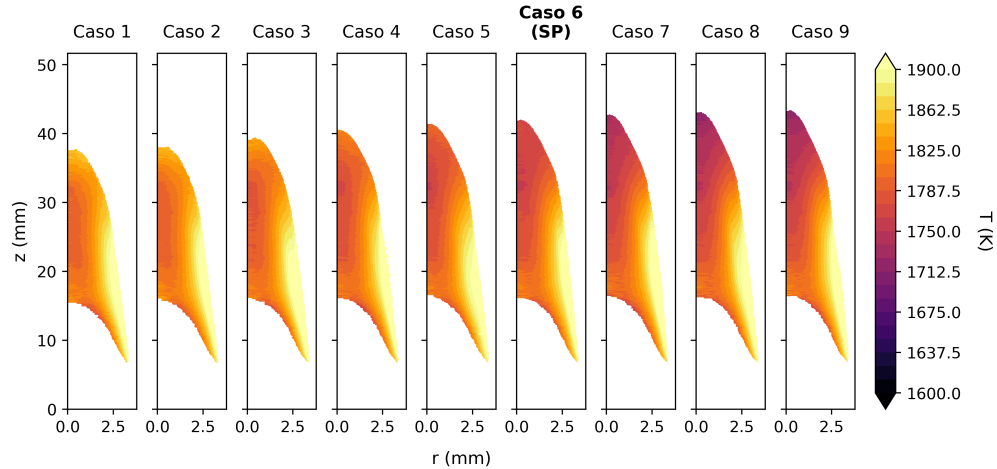


Figura 5.9: Campos de temperatura de llama para el combustible 3.

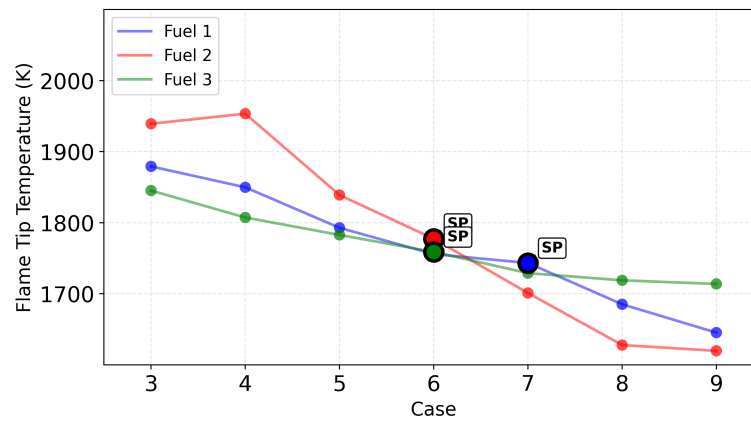


Figura 5.10: Temperatura mínima en la punta de la llama. Valor absoluto para cada caso de cada combustible.

Por último mencionar que los perfiles axiales de temperatura muestran que la evolución de la temperatura para los casos previos al smoke point es positiva, mientras que en el smoke point el perfil de temperatura se mantiene relativamente constante y a su vez en los casos posteriores al smoke point, los perfiles son decrecientes. Esta tendencia coincide con el aumento de las pérdidas por radiación asociadas con las mayores concentraciones de hollín.

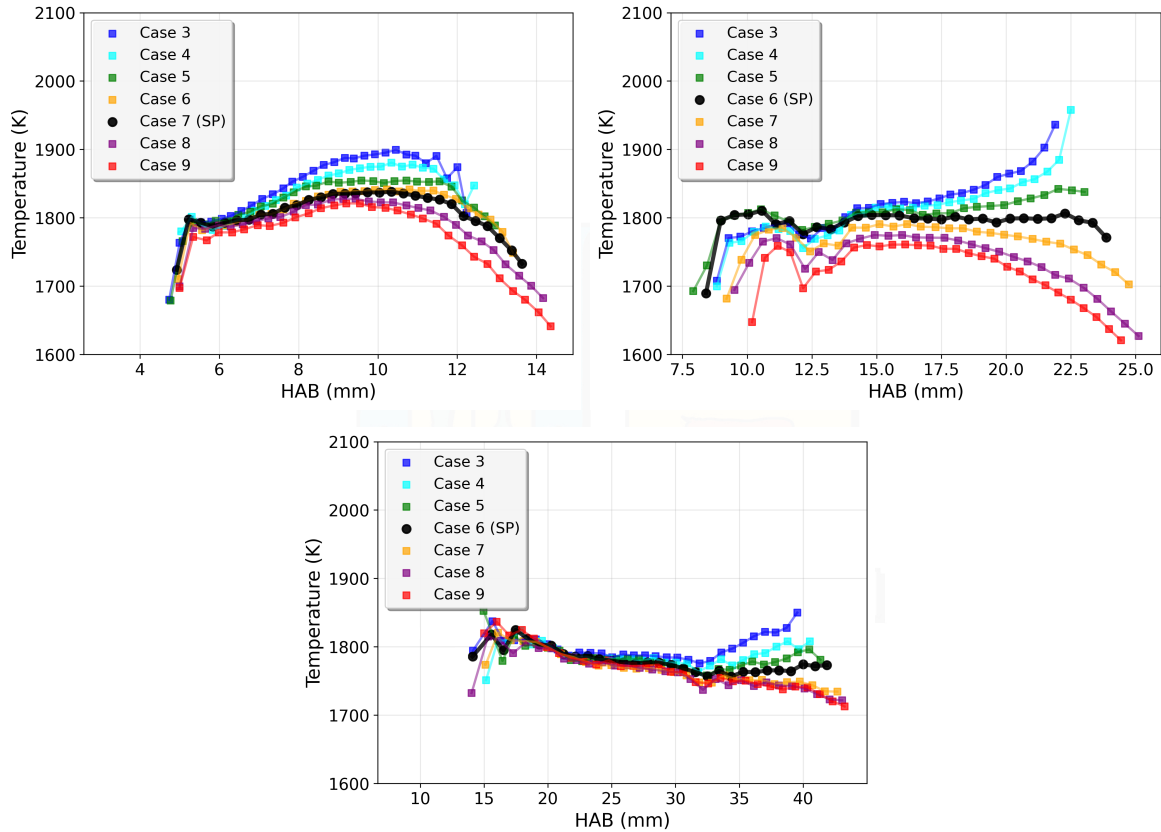


Figura 5.11: Perfiles axiales de temperatura a lo largo del eje de la llama: (a) Combustible 1, (b) Combustible 2 y (c) Combustible 3.

5.2.1. Análisis de error en T

La incertidumbre asociada al campo de temperatura (ver Figura 5.12) se evaluó mediante un enfoque de Monte Carlo (MC), considerando explícitamente las principales fuentes de error experimental que intervienen en el cálculo de la temperatura por pirometría monocromática. En particular, se tuvieron en cuenta las fluctuaciones en la señal radiativa calibrada y la incertidumbre en el coeficiente de extinción obtenido a partir de las mediciones LOSA.

En cada realización Monte Carlo, tanto la intensidad radiativa volumétrica como el coeficiente de extinción fueron perturbados de manera independiente, asumiendo distribuciones normales centradas en los valores medidos y con desviaciones estándar obtenidas directamente de los datos experimentales. Para cada conjunto perturbado, la temperatura fue recalculada utilizando la formulación no lineal de la pirometría de un color.

La estadística Monte Carlo se evaluó únicamente en los píxeles que cumplieron criterios de validez física, excluyendo regiones dominadas por ruido, señal nula o inestabilidades numéricas.

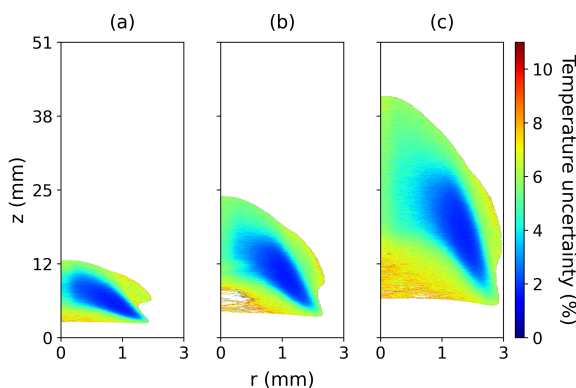


Figura 5.12: Campos de incertidumbre de T_s , error porcentual.

Bajo estas condiciones, el análisis Monte Carlo arrojó una incertidumbre relativa media en la temperatura del orden del, 4,47 % para el combustible 1, 4,64 % para el combustible 2 y 4.96 % para el combustible 3, con un percentil 95 inferior al 10 % para los tres combustibles. Los valores máximos de error, que alcanzan aproximadamente un 10 %, se localizan de manera puntual en los bordes y en la base de la llama, donde la señal radiativa es débil y el cálculo de la temperatura se vuelve más sensible al ruido experimental.

Los niveles de incertidumbre obtenidos en este trabajo son consistentes con los reportados en la literatura para llamas laminares medidas mediante técnicas ópticas. **VER** Escudero et al. reportan incertidumbres relativas en temperatura del orden del 4 % en regiones centrales de la llama, con incrementos localizados hacia la periferia debido a la disminución de la señal óptica. Resultados similares han sido informados por **VER** Jerez y Cruz en estudios de pirometría óptica en llamas laminares, donde se destaca que la dependencia logarítmica de la temperatura reduce significativamente la propagación del ruido experimental.

5.3. Tasa de consumo de combustible

La tasa de consumo de combustible es un parámetro interesante de cuantificar, dado que experimentalmente existen grandes limitaciones para controlar su magnitud en una lámpara de humo, al ser un sistema que funciona por difusión natural. Si bien, en este trabajo se controló la altura de la mecha de forma más precisa que los estudios encontrados en la literatura revisada, la cantidad

de combustible consumida en el tiempo es un parámetro que depende de las condiciones internas de la combustión, del tipo de combustible y la capilaridad de este en la mecha cuando está caliente, la velocidad de la reacción, la temperatura del flujo ascendente y el "cizalle" que esto puede generar, entre otros. En este caso al observar las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se evidencia un comportamiento común y es que justo un punto antes del smoke point el consumo de combustible aumenta drásticamente respecto del consumo previo al smoke point y del aumento de la altura de llama, un comportamiento similar resultó del estudio que hicieron Watson et al. en 2013 [14], quienes utilizaron mezclas de iso-octano con n-heptano y tolúeno y observaron que en el smoke point el flujo de combustible aumenta.

Por otra parte los valores de consumo de combustible para el combustible 3 (iso-octano puro) resultan ser muy similares a los reportados por Graziano et al. quienes dicen observar un flujo de $\approx 0,0016$ g/s a una altura de llama cercana a los 38 mm, sin embargo el flujo en de combustible en el smoke point es menor en el caso de los autores mencionados, pero también lo es su medición de smoke point de 39 mm, el cual, está bastante alejado de lo estandarizado en la norma ASTM D1322 para este combustible. Por otra parte los valores de consumo de combustible para el combustible 3 (iso-octano puro) resultan ser muy similares a los reportados por Graziano et al. quienes dicen observar un flujo de $\approx 0,0016$ g/s a una altura de llama cercana a los 38 mm, sin embargo el flujo en de combustible en el smoke point es menor en el caso de los autores mencionados, pero también lo es su medición de smoke point de 39 mm, el cual, está bastante alejado de lo estandarizado en la norma ASTM D1322 para este combustible (42.8 mm para el iso-octano puro).

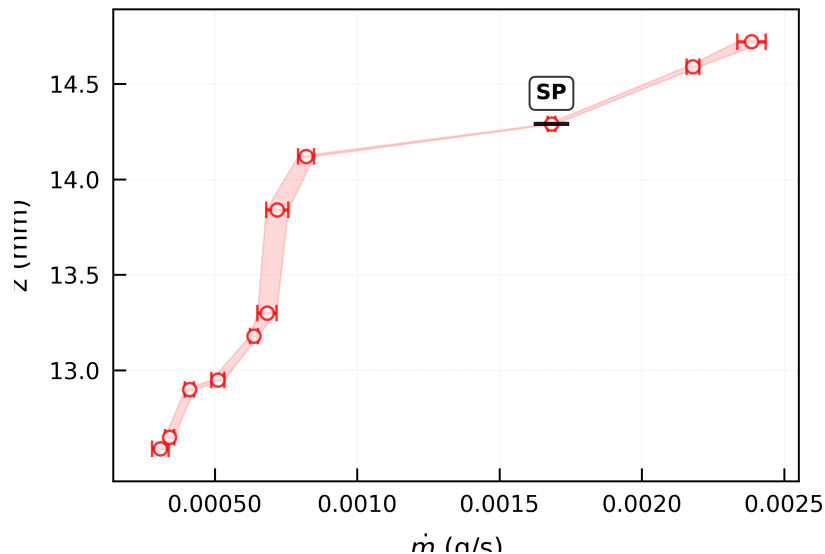


Figura 5.13: Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 1.

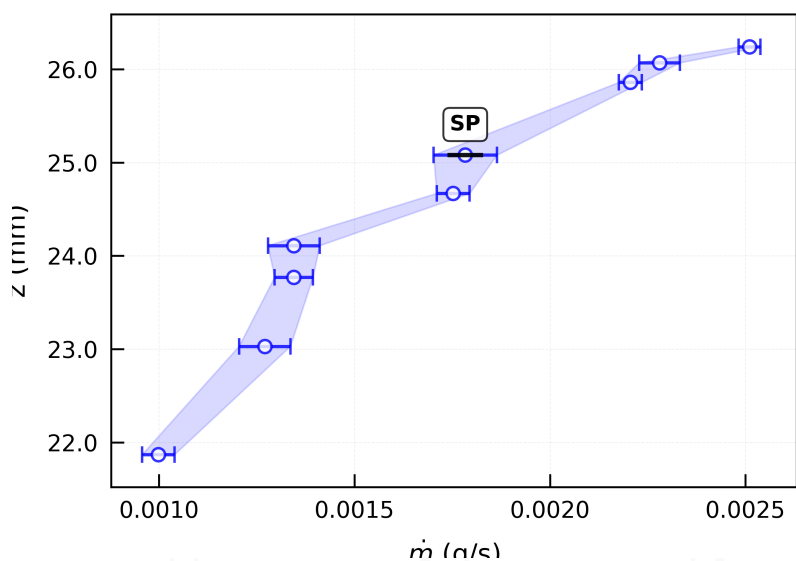


Figura 5.14: Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 2.

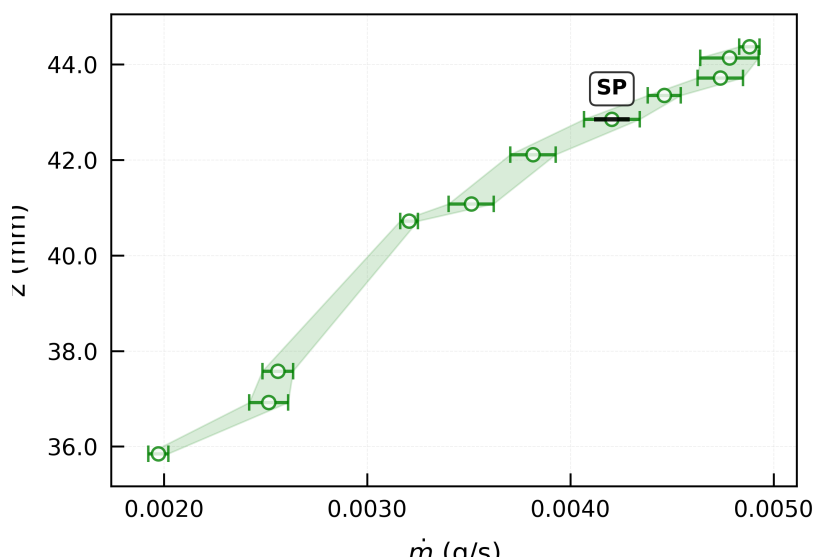


Figura 5.15: Flujo de combustible para distintas alturas de llama, combustible 3.

5.4. Carbon to soot

La eficiencia total de conversión de hollín a partir del carbono mostró un comportamiento esperado en cuanto a la cantidad de tolueno de cada mezcla. A medida que la mezcla posee más cantidad de tolueno, el CtS aumenta, partiendo por un valor promedio de 9,52 % para el iso-octano

puro y llegando a un valor de 17,48 % para la mezcla con 15 % de tolueno y de 18,53 % para la mezcla con 40 % de tolueno (ver figura 5.16. Los valores mencionados, indican que con un 15 % de adición de tolueno, la eficiencia para generar hollín aumenta en un 7,96 %, sin embargo, al añadir un 25 % más de tolueno solo aumenta en un 1,05 %, lo anterior es un indicador de que efectivamente la propensión a la generación de hollín aumenta bastante al añadir pequeñas cantidades de tolueno (aromático) al combustible, sin embargo no aumentará demasiado si se añade más tolueno, probablemente se satura la producción.

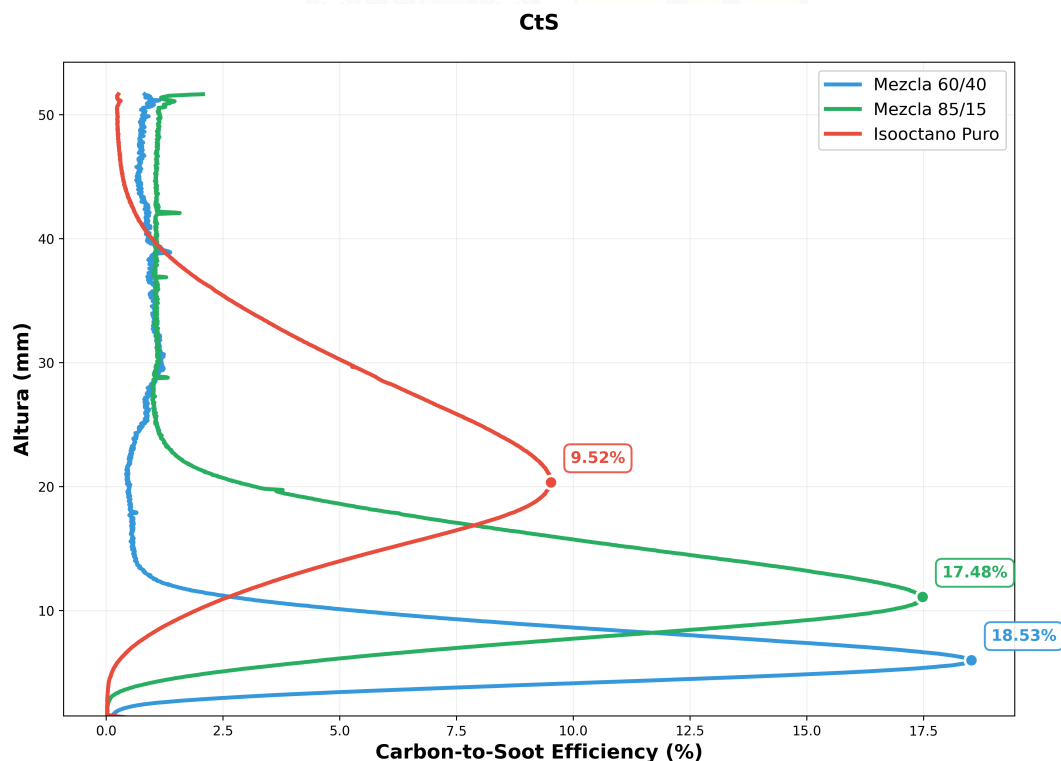


Figura 5.16: Carbon to soot comparación.

Por otra parte, los valores obtenidos para el iso-octano puro, se acercan bastante al valor de 9,5 % reportado el presente año por Verdugo el al. [66] para e-LG, el cual, corresponde a mezclas de LPG renovable con butano, ambos, alcanos ramificados igual que el iso-octano. Los valores de CtS para las mezclas con tolueno, se acercan más a lo medido por Yap el al. (2025) [67] para RP-3 (keroseno de aviación), con un CtS de 22 %, aumentando en un 4 % respecto de las mezclas tratadas en el presente trabajo, esto tiene sentido ya que el keroseno contiene más aromáticos y compuestos pesados que las mezclas de iso-octano y tolueno.

Un comportamiento interesante descubierto en este estudio, es que para los tres combustibles el

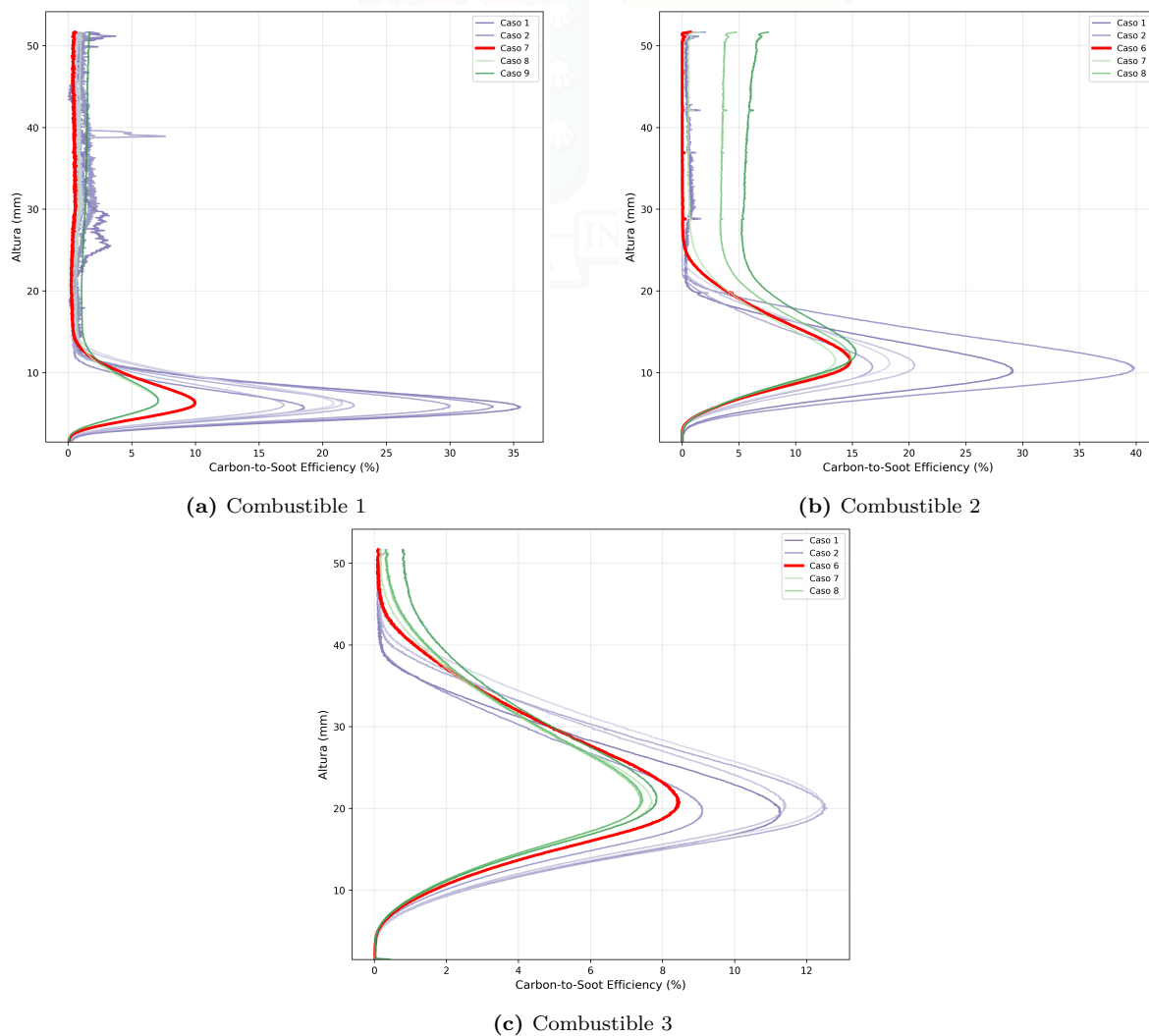


Figura 5.17: Relación Carbon-to-Soot (CtS) para los combustibles 1, 2 y 3, con progresión de alturas de llama.

CtS presenta una disminución de su valor a medida que la llama se acerca al smoke point y en algunos casos este valor disminuye aun más una vez que se pasa el smoke point, esto se puede ver en las figuras 5.17a, 5.17b y 5.17c, donde las curvas en degradé de colores morados son los casos previos al smoke point, las verdes corresponden a las llamas que ya pasaron el smoke point (con humo visible) y la curva roja es la llama en el smoke point. Este es un comportamiento inesperado, dado que se pensaría que al acercarse al smoke point y pasándose de éste, la llama genere más hollín por cantidad de carbono suministrado, sin embargo los resultados de este estudio indican lo contrario. A lo anterior se le pueden atribuir distintos motivos:

- En los casos previos al smoke point, se forma menos hollín en total, pero de forma más eficiente, debido a las temperaturas más elevadas y un posible mayor tiempo de residencia, lo que propicia la generación de hollín por crecimiento de PAH, generando partículas más densas y estables, pero que se logran oxidar dentro de la llama.
- Para los casos posteriores al smoke point, se genera más carga de hollín en total, pero de manera menos eficiente (coalescencia incompleta), formándose mayor cantidad de hollín poroso o fractal. Esto puede deberse entre otras cosas, a una menor temperatura de llama, como lo indicaron Sharma et al. (2021) [68] o bien por una mayor turbulencia en la llama, tal como lo estudiaron Davis et al. (2019) [69], derivando en que el tiempo entre colisiones de partículas sea menor que el tiempo necesario para una fusión completa, entonces se generarían formaciones de agregados con partículas primarias no uniformes, las que luego no lograrían oxidarse, debido a las bajas temperaturas en la punta de la llama, generándose la cola de humo visible.

Dicho lo anterior, el CtS alto no implica necesariamente mayor emisión de hollín, sino una conversión más eficiente bajo condiciones que también favorecen la posterior oxidación completa.

Un último punto importante de mencionar es que para los tres combustibles, el CtS tiene su máximo en aproximadamente la mitad de la llama, lo que es totalmente coherente respecto de compararla con los resultados obtenidos para f_s .

5.5. Smoke Point

A continuación se presentan los distintos métodos utilizados para la medición de smoke point de las llamas generadas con los combustibles de estudio.

5.5.1. Método ASTM D1322

A modo de verificar que la lámpara de humo modificada opere en la condiciones esperadas y como punto de comparación base del sistema general, se midió el Smoke point mediante la metodología propuesta por la norma ASTM D1322, se realizaron 10 reproducciones, obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Mediciones SP (mm) para los tres combustibles en estudio.

	Combustible		
	1	2	3
SP (mm)			
1	14,0	25,2	42,7
2	14,5	25,3	42,6
3	14,4	25,2	42,6
4	14,5	25,1	42,8
5	14,5	25,3	42,7
6	14,4	25,1	42,7
7	14,3	24,9	42,6
8	14,2	25,1	42,6
9	14,3	25,1	42,3
10	14,4	25,1	42,5
Media	14,4	25,2	42,7
Desv. Est.	0,16	0,12	0,14

Las mediciones se realizaron de acuerdo a lo dispuesto en el punto 11 de la norma, es decir, la precisión aplicada fue de 0,5 mm, conviniendo que la capacidad del ojo humano para discernir sobre esta precisión es limitada.

A partir de los resultados se puede decir que la lámpara se encuentra operando en base a lo esperado, dado que los valores para smoke point medidos, son bastante cercanos a los valores de estandar de los combustibles de referencia de la norma.

5.5.2. Determinación de altura mediante binarización

De las fotos tomadas solo se utilizaron las de emisión (100 imágenes por caso), es decir, las fotos sin LED, de esta manera es mucho más fácil para el algoritmo distinguir entre lo que es llama y lo que es fondo. Para la determinación el umbral, primero se realizó un tanteo de los umbrales que dieran resultados similares a lo esperado, esto resultó en un umbral máximo de 12, luego a cada imagen se aplicaron umbrales de intensidad desde 1 a 12 (donde 0 es negro), con ello se obtuvieron 12 alturas por imagen, estas altura fueron promediadas para generar una altura representativa por imagen, para luego promediar las alturas resultantes de las 100 imágenes binarizadas, de esta manera se obtuvo la altura para cada caso de cada combustible. Cabe mencionar que para reducir el error, se aplicó una franja de análisis de 100 px centrados en la imagen, así se identificó el primer punto blanco (de arriba hacia abajo) ubicado en esta franja, luego se asignó el valor de altura (en mm) correspondiente.

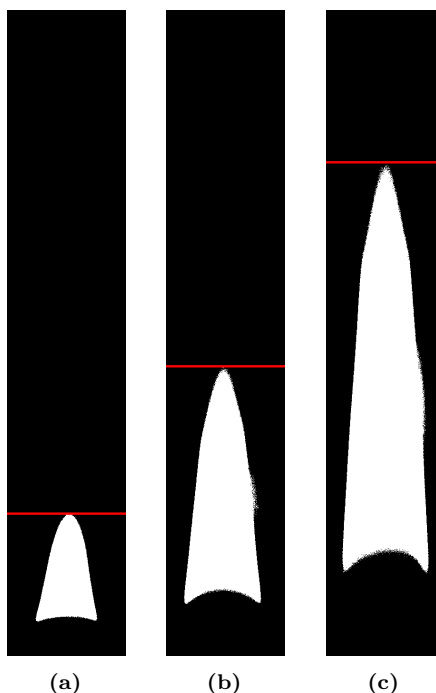


Figura 5.18: Imágenes de llama binarizada. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.

Las imágenes 5.18 muestran los resultados obtenidos para los casos que corresponden al smoke point, dando valores que coinciden con lo esperado sin embargo muestran una mayor incertidumbre que la técnica propuesta en este estudio, dado a que el valor resultante depende en gran medida del umbral de luminosidad escogido, es por esto que para corroborar la eficacia de la técnica, esta se realizó aplicando 12 umbrales distintos (del 1 al 12) para cada llama, a estos resultados se les calculó la desviación estándar. Los resultados fueron los siguientes, en el caso del combustible 1, la altura resultó

en un valor de 14,33 mm con un $\sigma = 0,88$, para el combustible 2 25,18 mm y $\sigma = 1,38$, el combustible 3 marcó una altura de 43,05 mm con $\sigma = 4,8$.

5.5.3. Fracción en volumen de hollín integrada

La fracción en volumen de hollín integrada (β_{soot}) es el parámetro propuesto en este estudio para la medición del punto de humo, pues este no ha sido reportado oficialmente por otros autores para realizar estas mediciones en lámparas de humo. En 2018 Garcés et al. [70] midieron fracción en volumen de hollín integrada en llamas de difusión de etileno en un quemador Gúlder y contrarrestaron su efectividad para medir smoke point contra técnicas de EVM (Eulerian Video Magnification) y PVM (Phase-based Video Magnification) para detectar "alas" en la punta de la llama, indicando que la medición del smoke point a través de la identificación de el punto en que $\beta_{soot} > 0$ en la altura de la llama es un método robusto. Dicho esto, se determina β_{soot} como el parámetro que más se puede acercar a la altura que corresponde al último momento en que la llama no emite humo visible, a medida que se sube la mecha. Si bien, en la mayoría de los casos no iguala exactamente a los valores obtenidos mediante los otros, resulta en valores extremadamente cercanos.

Las figuras 5.19a, 5.19b y 5.19c, muestran la curva generada al graficar la fracción en volumen de hollín integrada v/s la altura de llama, para los combustibles 1, 2 y 3. Como se puede observar, los distintos ensayos (casos), para dichos combustibles, se presentan en escala de grises, que aumenta de intensidad a medida que aumenta la altura de llama medida, la curva roja corresponde a la llama que está en el smoke point. En las tres figuras se puede ver muy claramente cuales son los casos en los que β_{soot} , después del pico, no vuelve a cero, esto significa que el hollín se sigue percibiendo en toda la imagen, o sea que hay una cola de humo, por ende, el caso de mayor altura en el cual $\beta_{soot} \approx 0$ será el que corresponde al smoke point (en rojo). Se probaron distintos métodos para dar con el valor de la altura de llama para los casos en que se está en el smoke point, siendo el método más eficaz el que busca el pico de beta (np.argmax) y luego desde ahí en dirección de z creciente, se identifica el primer valor por debajo de un umbral, este fue definido en un 0,5 % del valor máximo, después se aplica interpolación lineal entre los índices más cercanos para una mayor precisión del valor.

Respecto de los valores obtenidos, estos corresponden a 14,26 mm $\sigma_{\beta_1} = \pm 0,76$ mm, 25,08 mm $\sigma_{\beta_2} = \pm 0,89$ mm y 42,90 mm $\sigma_{\beta_3} = \pm 1,8$ mm para los combustible 1, 2 y 3 respectivamente.

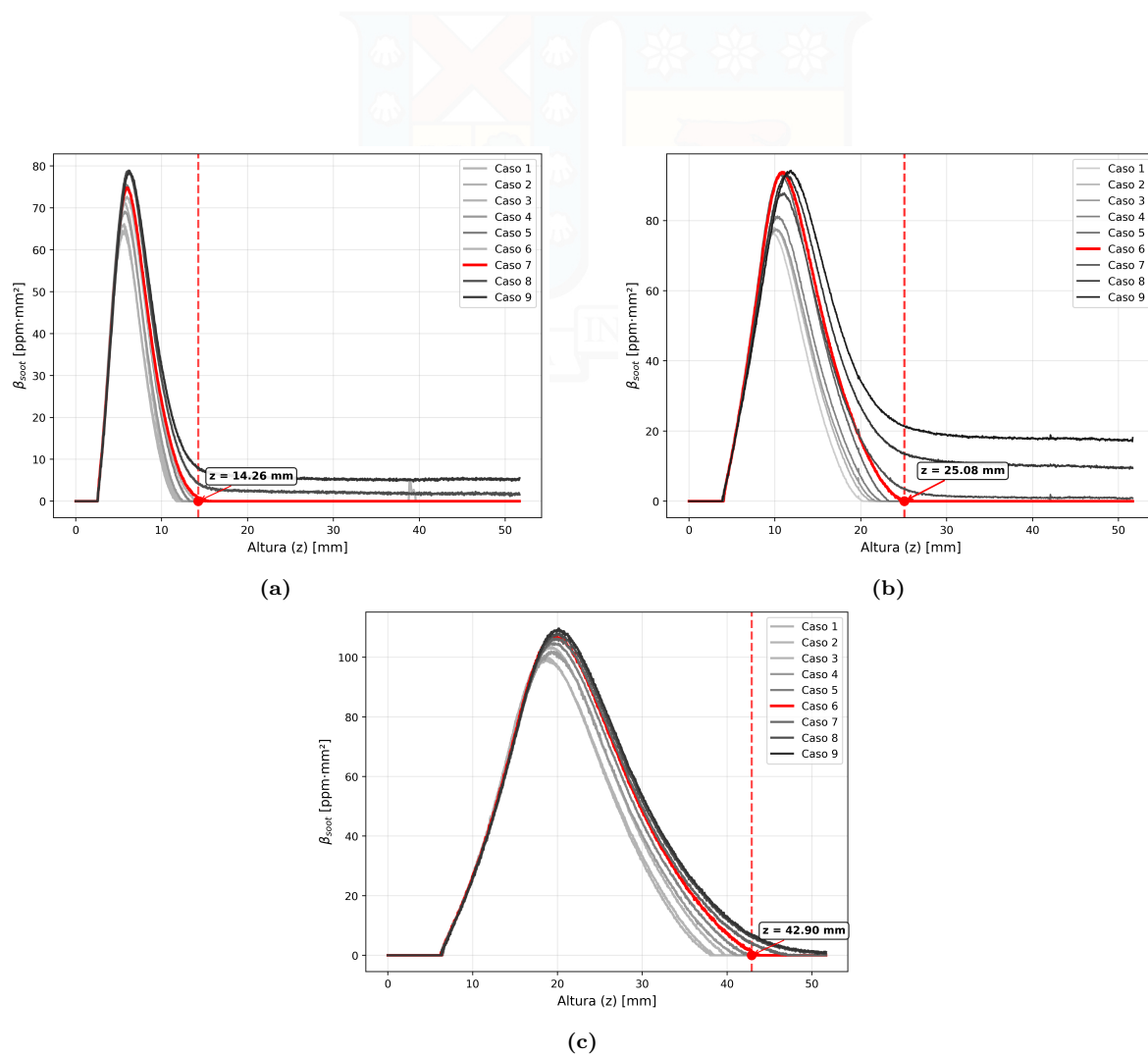


Figura 5.19: Fracción en volumen de hollín integrada radialmente con progresión de alturas de llama. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.

5.5.3.1. Masa total de hollín

Adicionalmente se calcula la carga total de hollín, donde se observan claramente los puntos en los que se traspasa el smoke point, por defecto del algoritmo que calcula la altura de llama mediante la fracción en volumen de hollín integrada, las alturas en las que β no llega a ≈ 0 marca la altura como infinito o en este caso le asigna el mayor valor de altura posible. Es interesante observar en la figura 5.20 como aumenta drásticamente la magnitud de este parámetro cuando se pasa el smoke point, sobre todo para las llamas con porcentaje de tolueno, donde Γ aumenta en orden de 100 - 150 $\text{ppm} \cdot \text{mm}^3$ para el caso el combustible 1 (y en valores incluso mayores para el combustible 2 de alrededor de 300 $\text{ppm} \cdot \text{mm}^3$, para el caso del combustible 3 el aumento después del smoke point es menos drástico, vuelve a aumentar en una orden de 100 $\text{ppm} \cdot \text{mm}^3$).

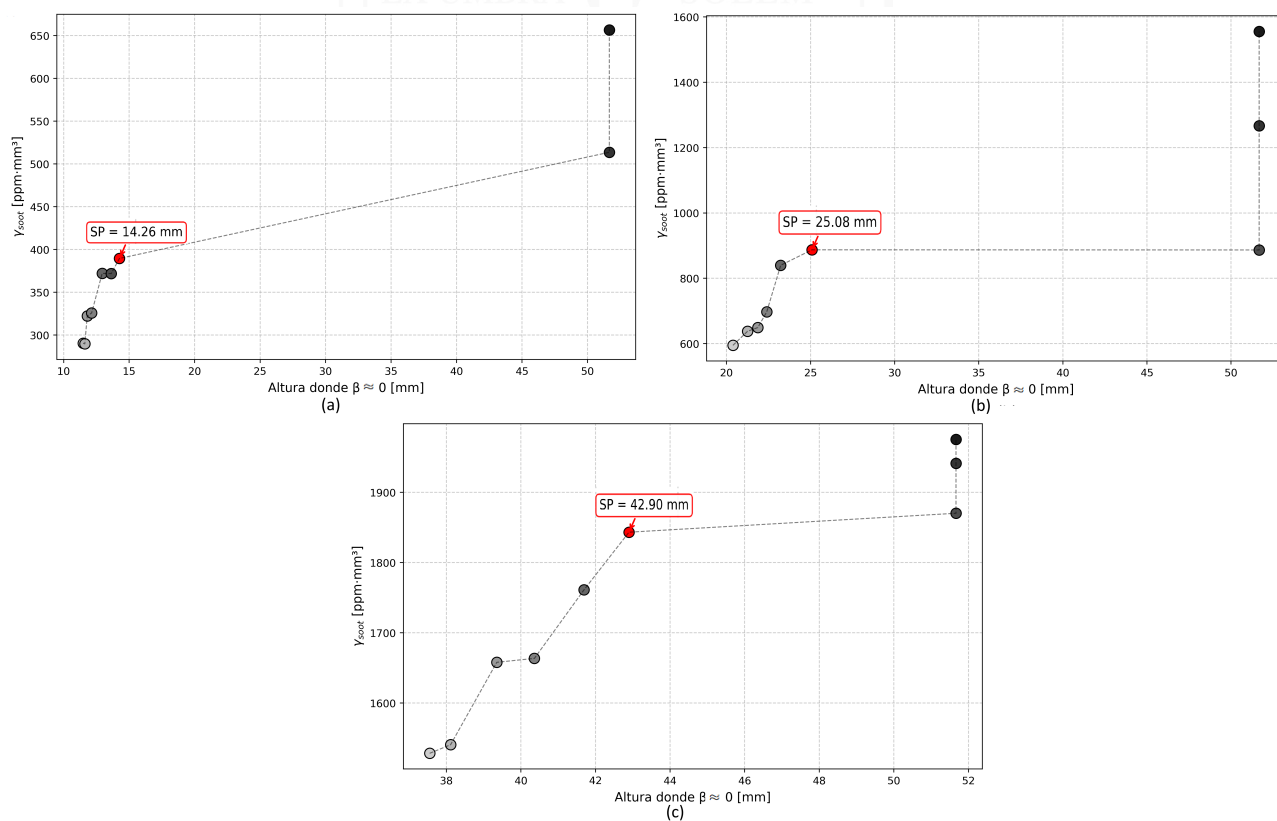


Figura 5.20: Carga de hollín del para distintas alturas de llama combustibles. (a) Combustible 1, (b) combustible 2 y (c) combustible 3.

El combustible 3 presenta los valores locales máximos de fracción volumétrica de hollín más bajos entre los combustibles estudiados, el hollín se distribuye sobre una región espacial significativamente más extensa. Como consecuencia, el hollín total integrado sobre la llama resulta mayor en este caso.

5.5.4. Comparación de métodos para la medición del punto de humo

La Tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos para la medición del punto de humo con las diferentes metodologías aplicadas en este trabajo y sus respectivas incertidumbres de medición asociadas. SP_{β} indica el valor del punto de humo medido utilizando la metodología propuesta en este estudio. SP_{thresh} indica el valor del punto de humo calculado en este estudio mediante el método de binarización basado en umbrales de luminosidad, similar a la norma ASTM actualizada [3]. Adicionalmente, se presentan los valores de referencia establecidos en la norma ASTM D1322 actualizada ($SP_{ASTM_{upd}}$) para cada uno de los combustibles en estudio.

Cabe mencionar que la metodología aplicada mediante la medición basada en umbrales de intensidad luminosa es bastante similar a la propuesta en la norma ASTM actualizada; sin embargo, como se mencionó anteriormente, se basó principalmente en las propuestas de [14] y [15].

Tabla 5.2: Mediciones del punto de humo obtenidas en este trabajo y comparación con valores de referencia ASTM.

Combustible	Mediciones en este trabajo						Valor de referencia $SP_{ASTM_{upd}}$ (mm)
	SP_{β} (mm)		SP_{thresh} (mm)		$SP_{ASTM_{old}}$ (mm)		
	Valor	σ	Valor	σ	Valor	σ	
1	14.26	0.76	14.33	0.88	14.4	1.0	14.7
2	25.08	0.89	25.18	1.38	25.2	1.5	25.8
3	42.90	1.8	43.05	4.8	42.7	1.8	42.8

6 | Discusiones y conclusiones

La evolución espacial de los campos de fracción volumétrica de hollín revela que la transición del punto de humo está gobernada por el acoplamiento entre la química del combustible, la estructura térmica y el balance entre formación y oxidación, más que por un único parámetro global. En combustibles que contienen tolueno, el perfil axial f_s presenta un mínimo local en el punto de humo, lo que indica que la formación temprana de HAP (PAH) hace que los procesos de crecimiento superficial altamente activados sean más sensibles a reducciones de temperatura que a la oxidación. En contraste, para el iso-octano puro, el punto de humo coincide con el máximo axial de hollín, lo que refleja que, en ausencia de precursores aromáticos, la formación de partículas alcanza su máximo justo antes de que el enfriamiento radiativo desestabilice los procesos de oxidación. Aunque los máximos absolutos de f_s se ubican en el ala de la llama para todos los combustibles, el perfil axial captura el balance neto que finalmente determina si el hollín escapa en la punta de la llama.

Los campos de temperatura confirman que los máximos térmicos se ubican en el ala de la llama y alcanzan sus valores más altos cerca del punto de humo, favoreciendo la formación de precursores de hollín. Más allá del punto de humo, se produce un enfriamiento progresivo en la punta de la llama, lo que reduce la eficiencia de oxidación y establece un ciclo de retroalimentación positiva entre la acumulación de hollín, el enfriamiento radiativo y la emisión visible de humo.

El análisis de la eficiencia de conversión de Carbono a Hollín (CtS) revela un comportamiento contraintuitivo: aunque la carga total de hollín aumenta drásticamente más allá del punto de humo, la fracción de carbono del combustible convertida en hollín disminuye. Esto indica que la formación de hollín antes del punto de humo ocurre bajo condiciones termoquímicas más favorables, es decir, temperaturas más altas y mayores tiempos efectivos de residencia, que promueven un crecimiento superficial eficiente y su posterior oxidación. Más allá del punto de humo, condiciones térmicas menos favorables reducen la efectividad de la oxidación, permitiendo que una mayor fracción de partículas incompletamente procesadas escape de la llama.

El análisis de la tasa de consumo de combustible muestra que los combustibles aromáticos presentan un aumento fuertemente no lineal en el consumo al aproximarse al punto de humo, atribuido a la retroalimentación radiativa de mayores concentraciones de hollín y a una evaporación intensificada

por flotabilidad. En contraste, el iso-octano puro mantiene una tasa de consumo prácticamente constante a través de la transición del punto de humo.

Finalmente, se propone la fracción volumétrica de hollín integrada radialmente (β_{soot}) como una métrica alternativa para la determinación del punto de humo. Este parámetro identifica la transición hacia la emisión de humo basándose en una variable físicamente fundamentada directamente asociada con la dinámica del hollín, prediciendo valores de SP dentro de 0.1–0.7 mm de los valores de referencia actualizados ASTM D1322 para los combustibles evaluados. Cabe destacar que el método de β_{soot} presenta una menor incertidumbre de medición que el enfoque basado en umbrales de luminosidad, particularmente para combustibles de baja formación de hollín (Combustible 3: $\sigma_\beta = 1.8$ mm frente a $\sigma_{thresh} = 4.8$ mm), proporcionando un criterio más robusto y reproducible que reduce la dependencia del juicio del operador y de la selección del umbral de intensidad.

Se deben considerar varias limitaciones de este estudio. La determinación de temperatura se basa en pirometría de una sola longitud de onda, la cual es más sensible a incertidumbres de calibración que los enfoques multiespectrales. Se utilizó un único valor de la función de absorción E_m para todos los combustibles, lo que podría introducir sesgos sistemáticos en los valores absolutos de f_s entre combustibles con diferente grado de madurez del hollín. El modelo de velocidad empleado para el cálculo de CtS asume un flujo dominado por flotabilidad con una única temperatura de referencia y descarta el transporte termoforético. Aunque el umbral de β_{soot} del 0.5 % del valor máximo muestra baja sensibilidad a su elección específica, su selección se basó en la comparación con combustibles de referencia. A pesar de estas limitaciones, las tendencias relativas reportadas y el desempeño comparativo de la métrica β_{soot} son robustos dentro de las incertidumbres indicadas. Un trabajo futuro que incorpore diagnósticos multiespectrales y mediciones independientes de velocidad podría fortalecer aún más el marco cuantitativo.

Bibliografía

- [1] American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Smoke Point of Kerosine and Aviation Turbine Fuel*, 1954. 1, 3.3, 3.4.2, 4.1.4.3
- [2] DB Olson, JC Pickens, and RJ Gill. The effects of molecular structure on soot formation ii. diffusion flames. *Combustion and Flame*, 62(1):43–60, 1985. 1, 2.1, 2.1, 3.5.1
- [3] Myriam Reminiac and Pierre Pestiaux. Method and device for determining the smoke point of hydrocarbons, November 9 2010. US Patent 7,829,343. 1, 2.1, 2.1, 3.4.3, 4.1.4.3, 5.5.4
- [4] Julio Pino, Hugo O Garcés, Juan Cuevas, Luis E Arias, Alejandro J Rojas, and Andrés Fuentes. Soot propensity by image magnification and artificial intelligence. *Fuel*, 225:256–265, 2018. 1, 2.1, 2.1
- [5] Guillermo Rubio-Gomez, Lis Corral-Gomez, Jose Antonio Soriano, Arantzazu Gomez, and Fernando J Castillo-Garcia. Vision based algorithm for automated determination of smoke point of diesel blends. *Fuel*, 235:595–602, 2019. 1, 2.1, 2.1
- [6] Fengshan Liu, Jérôme Yon, José Morán, Georgios A. Kelesidis, Felipe Escudero, and Andrés Fuentes. Progress in multi-scale modeling of soot particle aggregation in laminar sooting flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 110:101234, 2025. 1
- [7] Ahmet E. Karataş and Ömer L. Gülder. Soot formation in high pressure laminar diffusion flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(6):818–845, 2012. 1
- [8] T. L. Berry and W. L. Roberts. Measurement of smoke point in velocity-matched coflow laminar diffusion flames with pure fuels at elevated pressures. *Combustion and Flame*, 145(1-2):571–578, April 2006. 1
- [9] Xin Xue, Xin Hui, Peter Vannorsdall, Pradeep Singh, and Chih-Jen Sung. The blending effect on the sooting tendencies of alternative/conventional jet fuel blends in non-premixed flames. *Fuel*, 237:648–657, 2019. 1
- [10] Chaoyang Wang, Guanghua Tang, Hao Yan, Lin Li, Xin Yan, Zhimin Li, and Chun Lou. Investigation of thermal radiation from soot particles and gases in oxy-combustion counter-flow flames. *Processes*, 9(10):1756, 2021. Open Access. 1
- [11] R. Demarco, F. Nmira, and J.-L. Consalvi. Influence of thermal radiation on soot production in laminar axisymmetric diffusion flames. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 120:52–69, 2013. 1
- [12] Juan J. Cruz, Felipe Escudero, Ignacio Verdugo, Paulo Rivera, Nicolás Gutiérrez-Cáceres, Jérôme Yon, and Andrés Fuentes. Sooting propensity and maturity of gasoline/anisole blends in a laminar coflow diffusion flame. *Fuel*, 345:128091, 2023. 1
- [13] V Rosati, JJ Cruz, F Escudero, D Chen, and A Fuentes. Soot properties characterization of aviation jet a-1 laminar non-premixed coflow flame. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 151:111092, 2024. 1, 5.1.1.1
- [14] Roger J. Watson, Maria L. Botero, Christopher J. Ness, Neal M. Morgan, and Markus Kraft. An improved methodology for determining threshold sooting indices from smoke point lamps. *Fuel*, 111(1):120–130, 2013. (document), 2.1, 2.1, 3.4.3, 3.9, 3.5.1, 3.10, 3.5.1, 3.11, 4.1.4.3, 5.3, 5.5.4

- [15] Byoung Chul Ko, Kwang-Ho Cheong, and Jae-Yeal Nam. Fire detection based on vision sensor and support vector machines. *Fire Saf. J.*, 44(3):322–329, 2009. 2.1, 4.1.4.3, 5.5.4
- [16] Barbara Graziano, Tamara Ottenw.älder, Daniel Manderfeld, Stefan Pischinger, and Gerd Grünefeld. Advanced methodology for the detection of smoke point heights in hydrocarbon flames. *Energy & Fuels*, 32(3):3908–3919, 2018. 2.1, 2.1, 3.5.1, 3.5.1
- [17] Lis Corral-Gomez, David Rodriguez-Rosa, Sergio Juarez-Perez, Andrea Martín-Parra, Guillermo Rubio Gomez, and Francisco 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*, 31(11):115004, 2020. 2.1, 2.1
- [18] Steven R. James. Hominid Use of Fire in the Lower and Middle Pleistocene: A Review of the Evidence. *Current Anthropology*, 30(1):1–26, 1989. 3.1
- [19] BP. Statistical Review of World Energy, 2018. Online; acceso 17 de enero del 2019. 3.1
- [20] Hannah Ritchie. Fossil fuels. *Our World in Data*, 2017. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. 3.1.1
- [21] M del P Dorado. Desarrollo y ensayo de nuevos biocombustibles para motores diesel procedentes de diversas semillas oleaginosas y de grasas vegetales usadas. 2001. 3.1.1
- [22] Edmar Salinas Callejas and Víctor Gasca Quezada. Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157):75–82, 2009. 3.1.1
- [23] Olga del Río Alegre et al. Alternativas para la recuperación de biocombustibles oxigenados de caldos de fermentación. 2015. 3.1.1
- [24] ENERGÍAS RENOVABLES. Biocombustibles y microalgas marinas. *CIENCIA E INVESTIGACIÓN*, 68(1-2018):30. 3.1.1
- [25] C. Arden Pope III and Douglas W. Dockery. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6):709–742, 2006. 3.1.1
- [26] T. C. Bond, S. J. Doherty, D. W. Fahey, P. M. Forster, T. Berntsen, B. J. DeAngelo, M. G. Flanner, S. Ghan, B. K.ärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P. K. Quinn, M. C. Sarofim, M. G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S. K. Guttikunda, P. K. Hopke, M. Z. Jacobson, J. W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J. P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S. G. Warren, and C. S. Zender. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11):5380–5552, 2013. (document), 3.1.1, 3.1
- [27] A. K. Geim and K. S. Novoselov. The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3):183–191, Mar 2007. 3.2
- [28] A.D.H Clague, J.B Donnet, T.K Wang, and J.C.M Peng. A comparison of diesel engine soot with carbon black. *Carbon*, 37(10):1553 – 1565, 1999. 3.2
- [29] Jinxiang Xi and Bei-Jing Zhong. Soot in diesel combustion systems. *Chemical Engineering & Technology*, 29:665–673, 2006. 3.2
- [30] Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. ISBN 0-07-028637-X, 1988. 3.2
- [31] Kohse-Hoinghaus K. y Jeffries J.B. Applied Combustion Diagnostics. ISBN 1-56032-938-6, 2002. 3.2.1
- [32] Sieglä D. Particulate Carbon: Formation During Combustion. Springer US, ISBN 978-1-4757-6137-5, 1981. 3.2.1

- [33] David Lee Black, Mardson Queiroz McQuay, and Michel P. Bonin. Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(3):267 – 306, 1996. 3.2.1
- [34] Modest M.F. Radiative Heat. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. McGraw Hill International, ISBN 0-07-112742-9, 1993. 3.2.1
- [35] M. R. Kholghy, G. A. Kelesidis, and S. E. Pratsinis. Reactive polycyclic aromatic hydrocarbon dimerization drives soot nucleation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(16):10925–10938, 2018. (document), 3.4
- [36] H.G.G. Wagner. Soot formation in combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 17(1):3 – 19, 1979. Seventeenth Symposium (International) on Combustion. 3.2.1.1, 3.2.1.3
- [37] H. Gg. Wagner. *Soot Formation — An Overview*, pages 1–29. Springer US, Boston, MA, 1981. 3.2.1.1
- [38] William Bartok and Adel F Sarofim. Fossil fuel combustion : a source book. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*, 2019. 3.2.1.2, 3.2.1.3, 3.2.1.6
- [39] Irvin Glassman and Richard A. Yetter. Chapter 3 - explosive and general oxidative characteristics of fuels. In *Combustion (Fourth Edition)*, pages 75 – 145. Academic Press, Burlington, fourth edition edition, 2008. 3.2.1.6
- [40] Owen I. Smith. Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 7(4):275 – 291, 1981. 3.2.1.6
- [41] Thomas Bourdrel, Marie-Abèle Bind, Yannick Béjot, Olivier Morel, and Jean-François Argacha. Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of Cardiovascular Diseases*, 110(11):634 – 642, 2017. 3.2.2.3
- [42] JJ Cruz, Luis Fernando Figueira da Silva, F Escudero, F Cepeda, JC Elicer-Cortés, and A Fuentes. Soot pyrometry by emission measurements at different wavelengths in laminar axisymmetric flames. *Combustion Science and Technology*, 194(8):1643–1660, 2022. 3.2.2.3
- [43] Qianlong Wang, Guillaume Legros, Céline Morin, Mingfa Yao, Weiwei Cai, and Liqiao Jiang. Optical measurements of temperature fields in sooting flames: influence of soot self-absorption. *Applied Physics B*, 125:1–11, 2019. 3.2.2.3
- [44] Irvin Glassman, Richard A Yetter, and Nick G Glumac. *Combustion*. Academic press, 2014. 3.2.2.3
- [45] TP Jenkins and RK Hanson. Soot pyrometry using modulated absorption/emission. *Combustion and flame*, 126(3):1669–1679, 2001. 3.2.2.3, 3.5.2.4
- [46] S De Iuliis, M Barbini, S Benecchi, F Cignoli, and G Zizak. Determination of the soot volume fraction in an ethylene diffusion flame by multiwavelength analysis of soot radiation. *Combustion and Flame*, 115(1-2):253–261, 1998. 3.2.2.3
- [47] Peter B Kuhn, Bin Ma, Blair C Connelly, Mitchell D Smooke, and Marshall B Long. Soot and thin-filament pyrometry using a color digital camera. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1):743–750, 2011. 3.2.2.3
- [48] F. Escudero, A. Fuentes, J.-L. Consalvi, F. Liu, and R. Demarco. Unified behavior of soot production and radiative heat transfer in ethylene, propane and butane axisymmetric laminar diffusion flames at different oxygen indices. *Fuel*, 183:668 – 679, 2016. 3.2.2.4, 4.1.5.1
- [49] George H Markstein. Correlations for smoke points and radiant emission of laminar hydrocarbon diffusion flames. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 22, pages 363–370. Elsevier, 1989. 3.4

- [50] DL Urban, Z-G Yuan, PB Sunderland, K-C Lin, Z Dai, and GM Faeth. Smoke-point properties of non-buoyant round laminar jet diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(2):1965–1972, 2000. 3.4
- [51] M Megaridis Constantine and A Dobbins Richard. Comparison of soot growth and oxidation in smoking and non-smoking ethylene diffusion flames. *Combustion Science and Technology*, 66(1-3):1–16, 1989. 3.4
- [52] Guillaume Legros, Pierre Joulain, Jean-Pierre Vantelon, Andres Fuentes, Denis Bertheau, and Jose L Torero. Soot volume fraction measurements in a three-dimensional laminar diffusion flame established in microgravity. *Combustion science and technology*, 178(5):813–835, 2006. 3.5.2.1
- [53] W. H. Dalzell and A. F. Sarofim. Optical constants of soot and their application to heat-flux calculations. *Journal of Heat Transfer*, 91(1):100–104, 02 1969. 3.5.2.1
- [54] Clifford J Cremers and Richard C Birkebæk. Application of the abel integral equation to spectrographic data. *Applied Optics*, 5(6):1057–1064, 1966. 3.5.2.2
- [55] Kyle J Daun, Kevin A Thomson, Fengshan Liu, and Greg J Smallwood. Deconvolution of axisymmetric flame properties using tikhonov regularization. *Applied optics*, 45(19):4638–4646, 2006. (document), 3.5.2.2, 3.13
- [56] LH Liu and J Jiang. Inverse radiation problem for reconstruction of temperature profile in axisymmetric free flames. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 70(2):207–215, 2001. (document), 3.5.2.4, 3.15, 3.5.2.4, 3.5.2.4
- [57] A Rodríguez, F Escudero, JJ Cruz, G Carvajal, and A Fuentes. Retrieving soot volume fraction fields for laminar axisymmetric diffusion flames using convolutional neural networks. *Fuel*, 285:119011, 2021. 3.5.2.4
- [58] Hugo O. Garces, Luis Arias, Alejandro J. Rojas, Claudia Carrasco, Andres Fuentes, and Oscar Farias. Radiation measurement based on spectral emissions in industrial flames. *Measurement*, 87:62–73, 2016. 4.1.4.3
- [59] Mariano Sirignano, Anna Ciajolo, and Carmela Russo. Soot formation in premixed heptane-toluene flames. *Fuel*, 265:116920, 2020. 5.1.1, 5.2
- [60] Petros Vlavakis, Fabian P. Hagen, Alexandra Loukou, and Dimosthenis Trimis. Soot formation in iso-octane counterflow diffusion flames. *Combustion and Flame*, 282:114513, 2025. 5.1.1, 5.2
- [61] B. M. Conrad and M. R. Johnson. An uncertainty-based protocol for the setup and measurement of soot-black carbon emissions from gas flares using sky-losa. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(2):1573–1591, 2021. 5.1.1.1
- [62] NR Caetano, FM Pereira, HA Vielmo, and FT van der Lann. Experimental study of soot volume fraction applied in laminar diffusion flames. *Modern Mechanical Engineering*, 3(4):137–141, 2013. 5.1.1.1
- [63] F Escudero, A Fuentes, R Demarco, J-L Consalvi, Franklin Liu, JC Elicer-Cortés, and C Fernandez-Pello. Effects of oxygen index on soot production and temperature in an ethylene inverse diffusion flame. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 73:101–108, 2016. 5.1.1.1
- [64] Jean-Louis Consalvi, Fengshan Liu, M. Kashif, and G. Legros. Numerical study of soot formation in laminar coflow methane/air diffusion flames doped by n-heptane/toluene and iso-octane/toluene blends. *Combustion and Flame*, 180:167–174, 2017. 5.2
- [65] C. K. Law. *Combustion Physics*. Cambridge University Press, 2006. 5.2
- [66] I Verdugo, P Martin, F Escudero, PE Pinto, R Demarco, J Yon, and A Fuentes. Soot propensity of a new renewable carbon neutral lpg fuel. *Proceedings of the Combustion Institute*, 41:105937, 2025. 5.4

- [67] Valentina Yap, Felipe Escudero, Dongping Chen, Andrés Fuentes, and Rodrigo Demarco. Investigating soot formation in rp-3 combustion using numerical simulations and experimental validation. *Fuel*, 406:136959, 2026. 5.4
- [68] Akaash Sharma, Khaled Mosharraf Mukut, Somesh P. Roy, and Eirini Goudeli. The coalescence of incipient soot clusters. *Carbon*, 180:215–225, 2021. 5.4
- [69] Justin Davis, Kartik Tiwari, and Igor Novosselov. Soot morphology and nanostructure in complex flame flow patterns via secondary particle surface growth. *Fuel*, 245:447–457, 2019. 5.4
- [70] Hugo O Garcés, Andrés Fuentes, Pedro Reszka, and Gonzalo Carvajal. Analysis of soot propensity in combustion processes using optical sensors and video magnification. *Sensors*, 18(5):1514, 2018. 5.5.3

