UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE

CALIBRACIÓN DE TÉCNICA INCANDESCENCIA INDUCIDA POR LÁSER PARA LLAMAS DE DIFUSIÓN

CRISTINA AMARO ROJAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	SR. RODRIGO DEMARCO BULL.
PROFESOR CORREFERENTE	:	SR. ANDRÉS FUENTES CASTILLO.

NOVIEMBRE 2016

Agradecimientos

Me siento afortunada de pensar en tanta gente que me acompañó durante este proceso. Primero quiero agradecer a mi familia, a mi madre Cristina y a mi hermana Raisa, por la linda familia que somos y por como nos apoyamos en todo momento. Al pensar en mi familia no puedo no mencionar a Miguel, ese amigo, partner, hermano que estuvo conmigo de principio a fin, hasta cuando ni yo me soportaba, él confió en mí y yo confié en él.

Durante este proceso universitario quise crecer y no solo venir a estudiar, ahí entre otras personas quiero agradecer al CAAIND'15, que nos transformamos en un equipo versión familia, y esa amistad traspasó el año de trabajo y espero que traspase muchos años más. Arturo (Especialmente a ti, gracias por tanto), Carol, Francisca, María Cecilia , Jean, Jose y Nicole, Gracias.

A mis profesores Rodrigo y Andrés por los conocimientos entregados y esas enseñanzas que a veces traspasaron incluso el ámbito universitario, junto a ellos gracias a los niños de la oficina, por las conversaciónes y por la ayuda. Y no podían faltar mis compañeros de trabajo, Miguel y Arturo, con quienes compartimos frustraciones, alegrias, y aprendizajes.

En fin gracias a todos aquellos que de alguna manera fueron parte de este proceso a mis amigos de colegio, compañeros , amigos que conocí en la universidad por las conversaciones, el apoyo y los momentos vividos.

Finalmente Diego gracias por haber estado cuando comencé a escribir esta historia y todo se veía tan cuesta arriba.

A quien me formó, educó y entregó infinito amor, no me queda más que darle las gracias cada segundo que me queda de vida. Mamá, gracias por ser mi apoyo incondicional.

Resumen Ejecutivo

Hoy en día la combustión en procesos industriales domina el suministro mundial de energía, generando contaminantes perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud que se deben minimizar. Es precisamente esto lo que motiva a buscar formas para conocer en detalle este proceso y así encontrar la manera de hacer que sea más eficiente. Este trabajo busca calibrar la técnica de diagnostico óptico incandescencia inducida por láser, la cual es una técnica no intrusiva, para que se pueda medir la fracción en volumen de hollín y así poder caracterizar llamas de difusión.

Lo primero que se realizó fue la correcta sincronización de los equipos para el desarrollo de la técnica LII, luego se tomaron imágenes de una llama ya estudiada mediante la técnica Light of signal attenuation (Luz de la señal atenuada) y con ellas finalmente se calibró la técnica, realizando las correcciones que interfieren en la toma de señal de LII.

La llama de difusión estudiada estaba compuesta por 180.2 scc/m de etileno y 95.2 l/m de aire comprimido. Se obtuvo una relación lineal entre ambas técnicas en la zona en estudio escogida, que es donde autores han señalado que se encuentra la mayor gradiente de hollín. Se obtiene también que dentro de las correcciones las más importantes son la de capa láser que permite aplicar el perfil pseudo-gausseano a lo largo de toda la llama y la de absorción que es la responsable de darle la simetría a los resultados de la llama estudiada.

Se concluye que se obtiene una buena relación lineal entre ambas técnicas y que la técnica es altamente dependiente de la calidad de la técnica con la que se calibró, en este caso LOSA.

Palabras Clave. Hollín, técnica de diagnostico óptico incandescencia inducida por láser, calibración, técnica Señal de luz atenuada, corrección, sincronización.

ABSTRACT

Recently, the combustion in industrial processes controls the global supply of energy, generating pollutants that are harmful to the environment and to our health, and that should be diminshed. This has been the motivation to discover, in detail, this process and, in that way, to look for more efficient options. This study looks to calibrate the diagnostic technique the optical incandescence induced by lasers, which is a non-intrusive technique in which one can measure division of soot and can characterize flames of diffusion.

The first thing that was done was the correct synchronization of the equipment for the development of the LII technique. Then, images were taken of the flame already studied using the Light of signal attenuation technique. Lastly, the technique was calibrated with it, completing the corrections that interfered with the measurement of the LII.

The studied flame of diffusion was made up of 180.2 scc/m of ethylene and 95.2 l/m of compressed air. A lineal relationship between both techniques was obtained the selected study area, which is where authors have pointed out that the highest level of soot is found. It has also been found that, within the corrections, the laser layer is the most important. This layer allows the application of the profile pseudo-gausseano along the length of the flame and the absorption that is responsible for giving the results of the studied its symmetry.

It has been concluded that a good lineal relationship between both techniques was obtained and that the technique is highlt dependent on the quality of the technique which was used for calibration, in this case LOSA.

Keywords. Soot, diagnostic technique the optical incandescence induced by laser, calibration, light of signal attenuation, correction, synchronization.

Índice de Contenidos

1. Introducción **1**

2. Objetivos **5**
2.1. Objetivo General 5
2.2. Objetivo Específico 5

3. Antecedentes **6**
3.1. Llamas de difusión 6
3.1.1. Concepto de Flamelet Laminar 7
3.2. Hollín y su Formación 7
3.3. Mecanismos Físicos 10
3.3.1. Sub-mecanismos Físicos 11

4. Técnica Incandescencia Inducida por Laser **16**
4.1. Parámetros importantes técnica LII 18
4.1.1. Energía de excitación láser y longitud de onda 18
4.1.2. Perfil de intensidad del láser 20
4.1.3. Región de detección espectral 20
4.1.4. Detección de ancho de puerta y tiempo 20

5. Configuración Experimental **22**
5.1. Sistema experimental 22
5.2. Equipos e instrumentos utilizados 23
5.2.1. Láser 23
5.2.2. Cámara ICCD 25
5.2.3. Generador de pulso 26
5.2.4. Osciloscopio 27
5.2.5. Quemador 29
5.2.6. Lentes y filtros 29
5.2.7. Medidor de potencia 32
5.2.8. Controlador de flujo 33
5.3. Especificaciones de estudio 34
5.3.1. Tiempos relevantes 37

6. Calibración **39**
6.1. Metodología múltiples puntos de extinción de luz 39
6.1.1. Corrección de la capa láser 40
6.1.2. Corrección de la absorción del haz de láser 43
6.1.3. Corrección de auto-atenuación 44
6.2. Light of sight attenuation 46

7. Resultados y conclusiones **49**
7.1. Análisis del Error 52

Bibliografía **56**

Índice de Tablas

1.1. Suministro total de energía primaria en Chile. (Fuente: Instituto Nacional de Estadística , INE.) 2

5.1. Especificaciones del láser. 25

7.1. Componentes individuales que contribuyen a la incertidumbre individual y expandida de f_v. **fuente:** Laser-induced incandescence calibration in a three-dimensional laminar diffusion flame, Fuentes (2007) 54

Índice de Figuras

1.1. GRAFICO SUMINISTRO DE ENERGÍA. 1
1.2. GRÁFICO CONCENTRACIÓN EN PPM DE C02. 3

3.1. GRÁFICO MECANISMOS FÍSICOS TÉCNICA LII 11

5.1. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL. 22
5.2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL 23
5.3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL :Láser. 24
5.4. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL: Cámara ICCD. 26
5.5. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL: Generador de pulso. 27
5.6. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL: Generador de pulso. 27
5.7. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Osciloscopio. 28
5.8. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL: Sincronización pulsos cámara. . 28
5.9. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Quemador. 29
5.10. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Filtro 400nm. 30
5.11. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Filtro 400nm. 30
5.12. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Generador de plano. 31
5.13. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Fotodiodo. 31
5.14. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Medidor de potencia. 32
5.15. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Responsividad potenciómetro. . 32
5.16. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:ESTABILIZACIÓN LÁSER. . . 33
5.17. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:flujómetro. 34
5.18. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Consola flujómetro. 34
5.19. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Llama. 35
5.20. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Amplificador de fotones. 37
5.21. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL:Laboratorio mientras se toman imágenes. 37

6.1. MAPA LÁSER. 41
6.2. MAPA LÁSER CORREGIDO. 41
6.3. EFECTO AISLADO MATRIZ DE COMPENSACIÓN. 42
6.4. Imagen de la llama sin correción de capa láser 42
6.5. Imagen de la llama con correción de capa láser 42
6.6. EFECTO ATENUACIÓN DE MANERA AISLADA. 43
6.7. GEOMETRÍA PROCESO DE CORRECCIÓN. 45

6.8. EFECTO AUTO-ATENUACIÓN DE MANERA AISLADA. 46

7.1. VARIACIÓN DE LA SEÑAL LII EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HOLLÍN A DIFERENTES ALTURAS. 49
7.2. Mediciones SLII' a distintas alturas sobre el quemador. 50
7.3. VARIACIÓN DE LA SEÑAL LII EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HOLLÍN A DIFERENTES ALTURAS PRIMERA SENSIBILIZACIÓN α. 51
7.4. VARIACIÓN DE LA SEÑAL LII EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HOLLÍN A DIFERENTES ALTURAS SEGUNDA SENSIBILIZACIÓN α 51
7.5. Comparación Técnica SLII y LOSA. 55

1 | Introducción

Desde la revolución industrial a mediados del siglo XIX, la combustión de combustibles fósiles ha sido y continúa siendo la principal fuente de energía. A continuación se muestran los suministros de energía primaria para el mundo y para Chile hasta el año 2013. Se puede observar que el carbón, el gas natural y el petróleo corresponden a las principales materias primas para la obtención de energía.

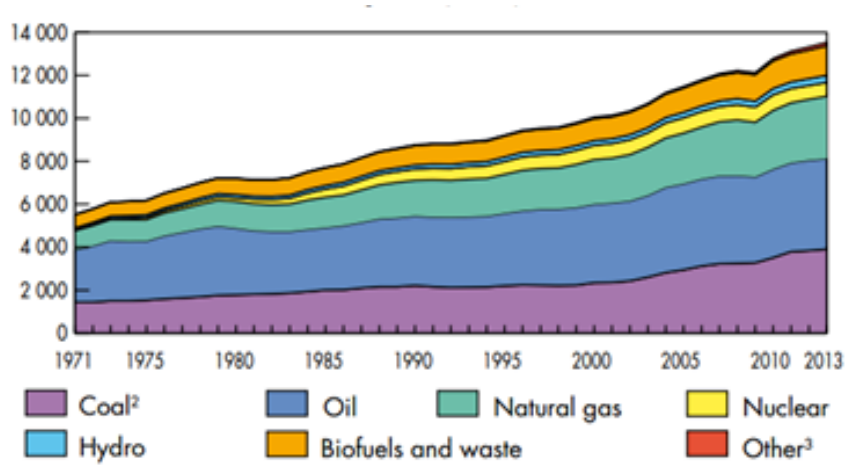

Figura 1.1: El suministro total de energía primaria en el mundo. Se muestra en función del combustible. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía, AIE.)

Tabla 1.1: Suministro total de energía primaria en Chile.
(Fuente: Instituto Nacional de Estadística , INE.)

PRODUCTO	Producción bruta de energía (teracalorías)				
	2009	2010	2011	2012	2013
Total de energía primaria	102,933	89,580	92,486	126,018	143,704
Petróleo crudo	1,957	2,271	2,491	3,532	3,850
Gas natural	23,568	18,198	14,773	11,505	9,017
Carbón	3,708	2,388	2,583	3,737	15,245
Hidroelectricidad	22,283	18,863	17,785	17,336	16,973
Energía eólica	68	280	290	351	477
Leña y otros	51,280	47,494	54,464	89,299	97,816
Biogás	69	86	100	72	134
Energía Solar	...	...	...	185	191

Este uso de combustibles fósiles ha llevado a problemas climáticos que han sido estudiados desde hace ya muchos años. El esquema PER (Presión-Esquema-Respuesta), utilizado por organizaciones internacionales como la OCDE y la Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas, agrupa los indicadores en estas tres categorías y define a los factores que se encuentran en presión como los indicadores que describen la intensidad o tendencias de las actividades humanas al considerar que éstas tienen un impacto en el medio ambiente. En este ítem se encuentran las emisiones de GEI, gases efecto invernadero, y las emisiones de dióxido de carbono. Estas emisiones provocan lo que se conoce como forzamiento radiativo positivo. El termino forzamiento radiativo ha sido utilizado por la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) para señalar una perturbación externa impuesta al balance radiactivo del sistema climático de la tierra, por lo tanto lo que está sucediendo es que estas emisiones provenientes principalmente de la combustión de combustibles fósiles están aumentando las temperaturas. Según estudios del Instituto Scripps de Oceanografía, institución responsable de las mediciones respectivas en el laboratorio de Mauna Loa (Hawai), la emisión de C02 hasta el 10 de enero del 2016 se muestra en la figura 1.2

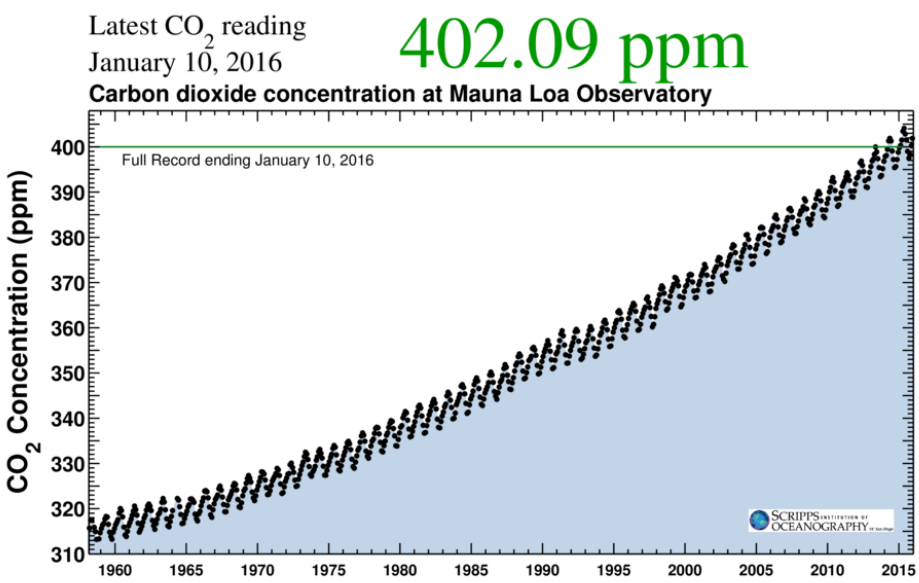

Figura 1.2: Concentración en ppm de CO2 desde el comienzo de las mediciones hasta el día 10 de enero 2016. (Fuente: Instituto Scripps de Oceanografía.)

Se entiende que el impacto del hollín no sólo significa un impacto en el clima terrestre, también significa un impacto para las personas, esto es problemas respiratorios y cardiovasculares Pope et al. (1999), en el ecosistema como lo sugiere Heines and Peters (1973), impacto en el deterioro de materiales de construcción . Estudios como los que sugieren los autores Schwartz (1994), Dockery and Pope (1996) señalan que existe una relación directa entre los niveles de material particulado con diámetro menor a 10 μm y el número de muertes y hospitalizaciones diarias debido a enfermedades pulmonares y cardiovasculares. Pope III et al. (2002) también muestra la relación entre la mortalidad por el efecto del cáncer de pulmón y las enfermedades cardiovasculares con niveles de diámetro menor a 2,5 μm.

En momentos donde la combustión domina el suministro mundial de energía y donde hay numerosos incendios a diario es necesario estudiar los principios de la combustión y la caracterización de la emisión de partículas de hollín y así por medio de hacer más eficiente la combustión en procesos industriales, lograr disminuir las emisiones contaminantes. También es importante estudiarlo para el caso de incendios y aumento de temperatura del entorno, ya que en términos de radiación el hollín juega un rol fundamental en la iniciación y propagación del fuego.

Finalmente lo mencionado anteriormente motiva al desarrollo de técnicas de diagnóstico para medir propiedades de la combustión y que sean capaces de entregar información importante para entender el comportamiento de ésta y sobretodo de la formación de hollín. Una de las técnicas reconocidas como de las más prometedoras se encuentra la incandescencia inducida por láser (LII), tanto para realizar mediciones cuantitativas del volumen del hollín y el tamaño de partícula. Mediante esta técnica, utilizada por primera vez en el laboratorio de investigación de energía de la Universidad Técnica Federico Santa María, se caracterizará el hollín de una llama de difusión de etileno para después validarlo con la literatura.

Es necesario considerar que en la mayoría de las veces, las llamas de difusión generadas son turbulentas, lo que puede significar la imposibilidad de estudiarla dado su complejidad debido a su inestabilidad. Una manera de evitar esta dificultad es estudiarla como llama laminar y con esta información utilizarla para analizar y comprender llamas de difusión turbulenta mediante el concepto de llamas laminares de Flamelet.

2 | Objetivos

2.1. Objetivo General

El objetivo es dejar a punto el sistema óptico para realizar mediciones de hollín mediante la técnica de diagnóstico óptico de Incandescencia Inducida por Láser (LII), obtener datos cualitativos de la producción de hollín de una llama de difusión de etileno y posteriormente realizar la calibración mediante la técnica ya realizada de light of signal attenuation (LOSA) y así poder aplicarla a otras llamas de difusión.

2.2. Objetivo Específico

- Aprender el manejo de los equipos necesarios para la técnica LII.
- Sincronización de los equipos para la técnica.
- Alineación de la óptica necesaria para la técnica de diagnóstico.
- Obtener set de imágenes de buena calidad con la técnica para un adecuado procesamiento.
- Calibración de la técnica mediante la comparación de una llama específica de etileno estudiada y validada por la técnica de Light of signal attenuation.

3 | Antecedentes

3.1. Llamas de difusión

Una llama de difusión es en la cual inicialmente el combustible y el oxidante están separados, llegando a una zona de reacción desde lados contrarios. La velocidad de esta combustión depende de la naturaleza del combustible y de la velocidad en que los gases frescos se aproximan a la zona de combustión.

Existen dos tipos de llama de difusión, estas son laminar y turbulenta. Aquello que las diferencia es el número de Reynolds al que ocurre la reacción, es decir, a pequeñas velocidades presenta un flujo laminar mientras que a altas velocidades o número de Reynolds presenta flujo turbulento. Las llamas de difusión laminar presentan la ventaja de ser más fáciles de modelar y estudiar, ya que son generalmente estables y homogéneas. Pero es necesario considerar que en la práctica la mayoría de las llamas son de tipo turbulentas, por lo que existe inestabilidad en la combustión, lo que dificulta su estudio. Este problema se resuelve utilizando el concepto de flemelet, el que indica que se puede modelar una llama turbulenta mediante un conjunto de llamas laminares y estables, permitiendo entender el comportamiento de las llamas del tipo turbulentas.

La llama que se utilizará en este estudio será una llama de difusión normal en donde en un tubo co-anular circula por el centro un combustible, en este caso etileno, con cierta velocidad y por el anillo exterior circula el oxidante. Por lo general hay más aire que combustible en esta configuración, y dependiendo de la cantidad de aire determinará la forma de la llama. En el caso que exista exceso de aire es más alargada y punta cerrada, en el caso de existir déficit la llama se asemeja a una forma cónica abierta. Estudios han

mostrado que la temperatura puede aumentar la tendencia a generar hollín, esto se explica por el efecto de la temperatura tanto en el proceso de pirólisis y al proceso de oxidación, lo que en llamas de premezcla significa que a mayor temperatura menor tendencia a generar hollín. Por otro lado, en llamas de difusión se estudió que no existe ataque oxidativo sobre los precursores, por lo tanto mientras más alta la temperatura mayor es la tasa de formación de hollín.

En llamas de difusión la composición de oxidante afecta la tendencia a generar hollín, donde McLintock (1968) señaló el flujo volumétrico necesario de combustible para que este empiece a liberar hollín o smoke point. La composición fue caracterizada por el índice de oxigeno, el cual se determina como

$$OI = \frac{flujo\ de\ oxígeno}{flujo\ de\ oxígeno + flujos\ de\ inerte} \tag{3.1}$$

El estudio mostró que una tendencia general para distintos inertes es un índice de oxigeno entre 0.1 y 0.4, en los indices de bajo oxígeno (OI) la zona de formación de hollín se alarga debido a la disminución en el flujo de oxígeno, es decir, conlleva a una pequeña disminución en la tendencia a generar hollín.

3.1.1. Concepto de Flamelet Laminar

El concepto de flamelet es aplicable a un régimen de combustión turbulento donde las reacciones químicas se producen a un ritmo que ocurren en láminas delgadas en un flujo turbulento. Estas láminas son llamadas flamelets laminares. Esta forma de visualizar una llama turbulenta como el conjunto de llamas laminares, originó la idea de emplear perfiles de llamas laminares para calcular propiedades y fluctuaciones de llamas turbulentas.

3.2. Hollín y su Formación

De manera sencilla se conoce al hollín como partículas sólidas que se generan debido a la combustión incompleta de hidrocarburos. Como manera de simplificación se puede caracterizar las partículas de hollín mediante la aglomeración de partículas singulares de

carácter esférico. El tamaño puede variar entre 0.01 y 0.05 μm Palmer and Cullis (1965).

La composición del hollín es en general envejecida por el efecto de la alta temperatura de la llama. En la producción de partículas de hollín los hidrocarburos gaseosos livianos son convertidos en carbono sólido en escasos milisegundos. La propensión a formar hollín es una función compleja que depende del tipo de llama, temperatura de llama y la naturaleza del combustible Glassman and Yaccarino (1981).

Se puede considerar que el proceso de formación de hollín se puede dividir de manera simple en tres etapas, pirólisis, nucleación y crecimiento superficial, coagulación y aglomeración. Es necesario también señalar que de manera simultanea al proceso de formación ocurre el proceso de oxidación. La formación de hollín se realiza en zonas muy ricas con falta de oxigeno y cuando se alcanzan altas temperaturas.

- **Pirólisis:** Proceso que tiene una duración segun Smith (1982) de pocos μs en el que compuestos orgánicos como hidrocarburos alteran su estructura molecular debido a altas temperaturas generando cadenas cortas. Principalmente se producen hidrocarburos no saturados, poliacetilenos, hidrocarburo aromático policíclico (PAH) y especialmente acetileno (C_2H_2). Estos precursores de hollín son los que generan núcleos (partículas pequeñas de hollín), las cuales crecen en las etapas de crecimiento superficial, coagulación y aglomeración. Las primeras partículas o núcleos se forman a partir de la coalición de PAHs, estos núcleos crecen formando partículas primarias que finalmente forman aglomerados. Estos núcleos tienen un tamaño según Schraml et al. (1999) de 1.5 a 2 nm. Haynes and Wagner (1981) indican que los procursores más abundantes en llamas de difusión laminar son C_2H_2, C_2H_4, CH_4, C_3H_6

- **Nucleación:** Proceso de formación de las primeras partículas de hollín a partir de precursores macromoleculares, en fase gaseosa. Los núcleos se forman a una temperatura entre 1300 y 1600 K y generalmente donde existen altas concentraciones y temperaturas más altas, según lo señala Tree and Svensson (2007). Estos núcleos de hollín son compuestos de carbono y con alrededor de 1 % en peso de hidrógeno, como lo señala Heywood et al. (1988).

- **Crecimiento:** El crecimiento de los núcleos de hollín se puede dar de tres formas,

estas son crecimiento superficial de las partículas, coagulación y agregación. En el caso del crecimiento superficial a la superficie de los núcleos de hollín se añade masa. Esta etapa ocurre principalmente luego de que nacen los núcleos y es menor cuando son maduros. Este proceso significa un aumento de su tamaño entre 10 y 30 veces su tamaño original. En el caso caso de la coagulación que ocurre de manera simultanea al crecimiento, ocurre alrededor de los 0.05 ms. y de igual forma que la etapa de crecimiento ocurre cuando las partículas están en etapa joven y de tamaño menor. En este proceso dos partículas sólidas colisionan fundiéndose en una mas grande, lo que significa que disminuye el número de partículas y aumenta el tamaño de partícula.

La presencia de hollín es ventajosa en ciertas ocasiones, por ejemplo en el caso que se quiera obtener una buena transferencia de calor por radiación. Esta característica es en general buscada para el caso de las instalaciones industriales. La alta emisividad del hollín viene dada de la alta capacidad de la absorción a temperatura ambiente que posee el carbón, de color negro.

La formación de hollín es una competencia entre la velocidad de pirólisis del combustible puro y la velocidad de oxidación del radical OH, ambos procesos aumentan con la temperatura pero afecta de mayor forma a la oxidación, ya que esta aumenta más rápidamente. Esto explica porque en llamas de premezcla, donde existe algo de oxígeno presente en el proceso de pirólisis hay menos formación de hollín y en llamas de difusión, donde el oxígeno no está presente en la zona de pirólisis aumenta el hollín al aumentar la temperatura Glassman and Yaccarino (1981). En llamas premezcladas, el hollín alcanza un máximo a medida que aumenta la temperatura, por encima de este máximo, disminuye la formación neta de hollín. En llamas de difusión, la cantidad de hollín formado aumenta monotónicamente con el aumento de la temperatura Showry (2015).

Dado que la tasa de crecimiento de las partículas de hollín no tiene una fuerte relación con la composición del combustible, las emisiones de hollín se atribuyen a las diferencias en el número de núcleos formados inicialmente. Frenklach et al. (1985) encontraron que las pequeñas cantidades de oxígeno mejoran la formación de hollín sobre la pirólisis en una atmósfera inerte.

Oxidación es el proceso de conversión de carbono o hidrocarburos en productos de combustión como CO, CO_2,H_2O. Ocurre en la superficie de hollín y puede pasar en cualquiera de las etapas de formación. Fenimore and Jones (1969) vieron la importancia del OH para la oxidación y también otras especies como los átomos de óxigeno pueden tener importancia en determinadas condiciones, luego autores Nagle and Strickland-Constable (1962) indican la importancia de la temperatura para que ocurra, ya que si no llegan a una temperatura lo suficientemente alta, las partículas no se oxidan. Se estima que esta debe ser mayor a 1300 K. Se considera que tiene dos etapas, absorción que es un ataque oxidativo del oxígeno a la superficie y la liberación desde la superficie del oxígeno que reaccionó con parte del componente del combustible, lo que genera productos de combustión. Bartok and Sarofim (1991) señalan que la especie dominante es OH en condiciones dosadas, ricas en combustible, mientras que en mezclas pobres se oxida por OH y por O_2.

El proceso de formación de hollín finaliza con los fenómenos de absorción y condensación. En estos procesos se hacen presentas las siguientes especies compuestos de azufre, cenizas, formación total de partículas de hollín, hidrocarburos parcialmente quemados e hidrocarburos no quemados. Durante los procesos de condensación y absorción, esas especies de agrupan de forma que se genera principalmente la siguiente estructura: hollín con cenizas rodeados de compuestos orgánicos volátiles (Hidrocarburos) y compuestos de azufre absorbidos, también en menor cantidad se encuentran compuestos líquidos de ácido sulfúrico, sulfato e hidrocarburos.

3.3. Mecanismos Físicos

Este estudio está basado fundamentalmente en un balance de transferencia de calor y masa, describiendo la interacción que existe entre un haz de luz de láser y las partículas de hollín presentes en la zona reactiva como lo presentan autores como Eckbreth (1977), Melton (1984), Dasch (1984a), Dasch (1984b), Hofeldt (1993), Snelling et al. (2000), Bladh and Bengtsson (2004).

Hay que tener en consideración ciertas simplificaciones en la representación de la interacción entre la radiación del láser y la materia de hollín, entre ellas, que se asume que

las partículas son esféricas, considerándolas un material homogéneo que no cambia sus propiedades ópticas y físicas con la temperatura.

Es necesario señalar que los fenómenos involucrados en una partícula singular de hollín cuando es expuesta a la radiación del láser son: radiación, absorción, sublimación y conducción de calor. A grandes rasgos, ya que el proceso se explicará con detención más adelante, el proceso comienza con parte de la energía del pulso del láser que es absorbida por la partícula y de esta forma incrementa su energía interna, aumentando su temperatura. Partículas de hollín quitarán energía de la superficie de otras partículas de hollín debido a las colisiones y de esta forma se producirá el fenómeno de conducción de calor. La emisión visible e infrarroja incrementan fuertemente la transferencia de calor y por tanto contribuyen a una pérdida de energía, ésta es la señal obtenida por la técnica LII. Como se llega a altas temperaturas, alrededor de 4000K, parte de la materia de carbón de la partícula se sublima y da lugar a pérdida de energía y masa.

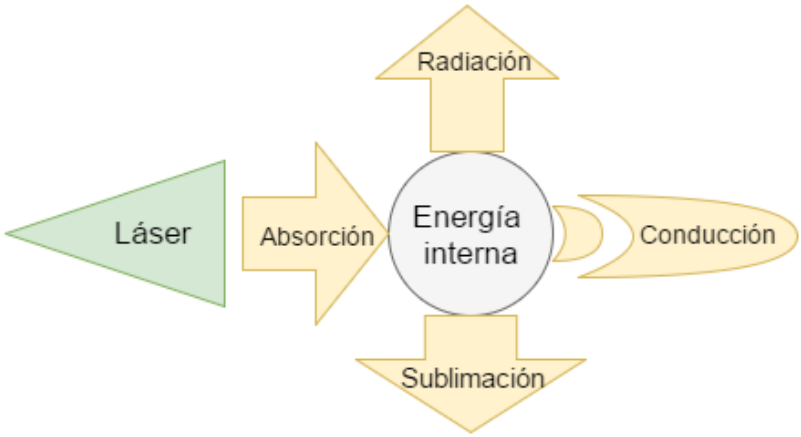

Figura 3.1: Mecanismos físicos que ocurren al calentar las partículas de hollín mediante la técnica LII.

3.3.1. Sub-mecanismos Físicos

3.3.1.1. Absorción de la radiación láser

Es el único proceso del modelo de transferencia de calor y masa que contribuye al almacenamiento de energía interna de la partícula. El término se refiere a la absorción de la sección transversal de la partícula de hollín ponderado con el perfil de intensidad del pulso

láser, el cual puede ser modelado según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{abs} = C_{abs} F g(t) \tag{3.2}$$

En donde F es la fluencia del láser y g(t) es la distribución temporal de la energía del láser. La absorción de la sección transversal de una partícula esférica puede ser simplificada usando el supuesto que las partículas son más pequeñas que la longitud de onda de la radiación entrante, la que se puede escribir como

$$C_s, abs = \frac{\pi^2 \cdot D^3 \cdot E(m)}{\lambda} \tag{3.3}$$

Donde E(m) es la función de absorción, la cual depende del índice refractivo de la partícula de material, m, dado por

$$E(m) = -Im\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) \tag{3.4}$$

La absorción total transversal de una partícula agregada, gracias a la aproximación teórica de Rayleigh-Debye-Gans para agregados poli-fractales, podrá ser relacionada con la sección transversal de las partículas primarias C_{abs} multiplicado por el nº de agregados.

$$\dot{Q} = C_{abs} \cdot F \cdot g(t) \cdot Np = \frac{\pi^2 \cdot D^3 \cdot E(m) \cdot Np \cdot F}{\lambda} g(t) \tag{3.5}$$

Donde Np corresponde al número de partículas primarias por agregado.

3.3.1.2. Conducción de calor

Representa la pérdida de energía en la superficie de las partículas debido a las colisiones con las moléculas de gas que las rodean y es el principal contribuyente a la forma de caída de la señal LII después del pulso del láser. Es necesario señalar que la conducción de calor durante el proceso de LII, a altas temperaturas, ocurre principalmente en el régimen de transición para lo cual no existe una teoría simple. La conducción de calor dependerá del ratio de colisión de la molécula-partícula (es decir es un proceso presión-dependiente) y de la probabilidad de intercambio de energía durante las colisiones. Si es muy alta la densidad

del número de moléculas, la probabilidad de colisiones de partículas con la molécula será de mucha mayor eficacia, aumentando de esta forma la transferencia de calor. Por el contrario si existe una baja densidad de número de moléculas, pocas moléculas realmente golpearán una partícula de hollín.

$$\dot{Q}_{cond} = h_{cond} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot (t - ts) \tag{3.6}$$

Este termino de la ecuación es complicado por el hecho de que depende del tamaño de partícula que puede ser del mismo orden o menor que el promedio del camino libre en el gas circuncidante, como consecuencia el coeficiente de transferencia de calor h_{cond} debe tener en cuenta tanto el regimen molecular libre y continuo, en estos casos el coeficiente de transferencia se puede expresar como

$$h_{cond} = \frac{2k_\infty}{D_s + G\lambda_{mfp}} \tag{3.7}$$

Donde k_∞ es el coeficiente de conductividad térmica del gas, D_s diámetro de partícula, G es un factor que depende de la geometría and λ_{mfp} es el trayecto libre medio del gas circundante.

$$G = \frac{8f}{\alpha(\gamma + 1)} \tag{3.8}$$

Donde f es el factor de Eucken, α es el factor térmico de acomodación (que a menudo se considera 0.9) y γ de calor especifico.

3.3.1.3. Sublimación

Como las partículas de hollín se acercan a temperaturas de alrededor de 4000K, dado que se usa pulsos de laser de alta energía, la pérdida de energía por sublimación de partes de la materia en varias especies gaseosas será importante. La sublimación, además de contribuir a la pérdida de energía, contribuye a la pérdida de masa de las partículas. El modelo utilizado será el entregado por Snelling et al. (2000) y Smallwood et al. (2002) considerando una partícula primaria singular. La energía perdida por sublimación puede ser escrita por

$$\dot{Q}_{sub} = \frac{\Delta Ht \cdot dM}{M_{\upsilon} \cdot dt} \tag{3.9}$$

Donde ΔHt es la entalpía de vaporización, M_v peso molecular del gas. Como el proceso de sublimación depende del área de la superficie de la partícula es razonable asumir que la agregación puede influir en el proceso, la pérdida de calor debido a la sublimación para un agregado puede ser modelado por tanto como la suma de la pérdida de partículas primarias singulares de acuerdo a

$$\dot{Q}_{sub} = N_p \frac{\triangle\ Ht \cdot M}{M_{\upsilon} \cdot dt} \tag{3.10}$$

3.3.1.4. Radiación

La radiación tanto en el espectro visible como en el infrarrojo representa el último mecanismo de pérdida de energía y es el proceso responsable de producir la señal que será detectada por la técnica LII. La teoría RDG-PFA (Rayleigh-Debye-Gans poli-disperse fractal aggregates) señala que la radiación de hollín puede ser modelada como la sumatoria de la radiación de partículas primarias individuales, de la siguiente forma.

$$\dot{Q}_{rad} = \pi \cdot N_p \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon(d, \lambda) M_{\lambda}^{b}(T, \lambda) d\lambda \tag{3.11}$$

En donde la emisividad en el límite de Rayleigh y la ley de radiación de Planck juegan un rol fundamental. $\varepsilon(d, \lambda)$ corresponde a la emisividad espectral que se define de la siguiente forma.

$$\varepsilon(d, \lambda) = \frac{4 \cdot \Pi \cdot D_p \cdot E_{m_{soot}}}{\lambda} \tag{3.12}$$

y $M_{\lambda}^{b}(T, \lambda)$ corresponde a la radiancia espectral de un cuerpo negro.

3.3.1.5. Energía interna

El último proceso representa la transferencia de energía hacia y desde el material de hollín por los otros procesos en términos de energía interna. La energía interna puede ser

expresada en términos de una partícula de hollín esférica por

$$\dot{Q}_{int} = \frac{\pi}{6} \cdot D^3 \cdot N_p \cdot \rho_s \cdot C_s \cdot \frac{dT}{dt} \tag{3.13}$$

Donde ρ_s corresponde a la densidad del hollín y C_s corresponde al calor específico del hollín.

Se asume que la agregación no afecta el ratio de cambio de energía interna y que el balance puede ser escrito como la suma de partículas primarias individuales. Se prevé que la transferencia de energía interna tenga una despreciable influencia sobre el proceso LII al utilizar pulsos en nanosegundos para partículas primarias aisladas, pero ser realmente importante para agregados.

3.3.1.6. Balance de calor y masa

Los procesos físicos mencionados anteriormente nos lleva finalmente a la ecuación de balance de Calor y Masa para la energía y masa involucrada en el proceso LII, la cual puede ser expresada como

$$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{sub} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{rad} \tag{3.14}$$

$$\frac{\pi}{6} \cdot D^3 \cdot N_p \cdot \rho_s \cdot C_s \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{\pi^2 \cdot D^3 \cdot E(m) \cdot Np \cdot F}{\lambda} g(t) + N_p \frac{\triangle\, Ht \cdot M}{M_\upsilon \cdot dt} + h_{cond} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot (t - ts) + \pi \cdot N_p \cdot \int_0^\infty \varepsilon(d, \lambda) M_\lambda^b(T, \lambda) d\lambda$$

4 | Técnica Incandescencia Inducida por Laser

Las técnicas ópticas ofrecen una alternativa no intrusiva de estudio. Estas detectan y analizan la radiación electromagnética emitida por un objeto. Los objetos sólidos y líquidos emiten radiación por medio de la ley de radiación de Planck. Los gases emiten y absorben solo determinadas bandas o líneas espectrales debido a su escasa interacción molecular. El espectro de emisión de cada gas es diferente porque cada tipo de molécula tiene una frecuencia de resonancia particular.

Técnicas como la de incandescencia inducida por láser (LII) están fundamentadas en el análisis de emisión estimulada. La radiación térmica y luminosa de las llamas nos proporciona información acerca de su concentración y estructura geométrica.

La técnica de visualización LII es una herramienta útil de diagnóstico para medidas de alta resolución tanto espacial como temporal de partículas de hollín. Se puede obtener información de la masa, la fracción de volumen, así como el tamaño de las partículas de hollín en todo tipo de llamas.

Para ello se utiliza un láser de pulso de alta energía para calentar rápidamente las partículas de hollín hasta temperaturas mucho mayores que la de la llama, y las señales de incandescencia emitida por las partículas de hollín irradiadas proporciona información sobre la concentración de las mismas debido a que el tamaño de las partículas se encuentra en régimen de Rayleigh (el tamaño de partícula es mucho menor que la longitud de onda utilizada).

En detalle el método se basa en el calentamiento del hollín contenido en un cierto volumen, hasta aproximadamente la temperatura de vaporización por medio de un pulso

láser de alta energía. La energía del láser es absorbida por la nube de hollín y este último emite una radiación cercana a la de un cuerpo negro. La radiación emitida se registra con un sistema apropiado. Resolviendo las ecuaciones de balance de energía y de masa, y teniendo en cuenta los fenómenos relevantes en la absorción de la energía y las pérdidas de calor, es posible determinar la temperatura y el diámetro del hollín en cualquier instante de tiempo. Así se puede estudiar las relaciones entre la señal LII, la concentración volumétrica de hollín y su tamaño: considerando la ley de Planck para un cuerpo negro, con algunas simplificaciones como las que se nombraron y también considerando que el hollín absorbe la suficiente energía láser como para elevar al máximo su temperatura para longitudes de onda entre 400 y 700 μm.

En resumen se señala que la señal LII tiene una relación lineal con la fracción volumétrica de hollín, ademas por el tamaño de las partículas primarias se consideran cuerpos negros que irradian de acuerdo a la ecuación de Planck.

$$f_v = N_p \cdot \frac{\Pi \cdot D_p^3}{6} \tag{4.1}$$

Se entiende la linealidad de la señal LII y f_v como lo señalan Quay et al. (1994) , Ni et al. (1995) , Bengtsson and Aldén (1988), Axelsson et al. (2001), Shaddix et al. (1994).

$$S_{LII} \propto f_v \tag{4.2}$$

La señal LII es proporcional al diámetro medio del hollín . La relación fundamental de la señal LII para la medida de concentración de hollín se escribe de la manera siguiente Melton (1984).

$$S_{LII} \propto N \cdot D^{3+\frac{0,154}{\lambda_{det}}} \tag{4.3}$$

Donde λ_{det} corresponde a la longitud de onda de detección, expresada en micrones. La técnica proporciona datos sobre la fracción de volumen de hollín. Del comportamiento temporal del enfriamiento se deduce la distribución de tamaño del hollín. Sin embargo, se necesita una temperatura de referencia para el enfriamiento que es desconocida, la cual se puede estimar mediante otro método como por ejemplo el método de los 2 colores o a

partir de un cálculo teórico. Sin embargo, para este cálculo hace falta conocer el índice de refracción. La determinación del tamaño y de la concentración de hollín se realiza considerando que el hollín se compone de partículas primarias.

4.1. Parámetros importantes técnica LII

Para la aplicación de LII, donde concentraciones cualitativas de partícula o tamaño son requeridos, los parámetros críticos según Kohse-Höinghaus and Jeffries (2002) son la excitación y longitud de onda del láser, el perfil de intensidad del láser, la región espectral de detección y la puerta de detección y tiempo.

4.1.1. Energía de excitación láser y longitud de onda

La longitud de onda de excitación es un factor que afecta directamente la relación señal-ruido. Cuando la luz interactúa con el hollín en la cámara de combustión, la luz dispersada está dentro del régimen de Rayleigh (es decir que la dimensión del hollín es muy pequeña en comparación con la longitud de onda), donde la eficacia de absorción del hollín varía aproximadamente de forma inversa con la longitud de onda a valores constantes de índice de refracción y tamaño Dec (1992). Por lo tanto, el hollín se calentará más eficientemente a medida que la longitud de onda se haga más corta. A pesar de este límite, cuando se utiliza la luz UV (bajas longitudes de onda) para calentar el hollín pueden aparecer interferencias, más precisamente fluorescencias, causadas por los hidrocarburos poli-aromáticos (PAHs) y moléculas C2 generadas por el láser Shaddix and Smyth (1996), Schraml et al. (2000), Bengtsson and Aldén (1995). Al trabajar con una longitud de onda infrarroja, la eficacia de absorción del hollín es menor, lo que significa que se necesita una mayor cantidad de energía para calentarla y elevar su temperatura a niveles de incandescencia, lo que viene a ser una gran desventaja al utilizar este tipo de fuentes láser. El uso de una longitud de onda de 532nm, permite obtener un buen equilibrio entre la eficacia de excitación y la relación señal-ruido.

La excitación producida por el láser usualmente se logra con una duración de pulso de 15 ns o menor y de fluencia de energía alrededor de 0.2 J/cm2. Estudios anteriores han

demostrado que a una fluencia de 0.2 J/cm2 a 532 nm (o 0.4 J/cm2 a 1064 nm.) las partículas de hollín comienzan a evaporarse como lo señala Dasch (1984a) y Kohse-Höinghaus and Jeffries (2002). Para fluencias por debajo del límite de vaporización, la energía incidente del láser solamente aumenta la temperatura de la partícula de hollín, siendo una señal débil la cual está fuertemente dependiente de la fluencia del láser u bajo el valor de fluencia aumenta la temperatura y genera una señal S_{LII} débil dependiente de la fluencia .

Con respecto a la selección de la longitud de onda, un amplio rango puede ser utilizado siempre cuando la partícula exhiba suficiente absorción de esa longitud de onda. En general el objetivo de la selección es minimizar la potencial interferencia que puede acompañar el proceso de excitación láser como la excitación presente a partir de otras especies presentes. En el caso del diagnóstico del hollín, las interferencias usualmente incluyen Fluorescencia Inducida por Laser (LIF) de los hidrocarburos poli-cíclicos aromáticos, por lo tanto se debe buscar aquellas longitudes que permitan eliminar este tipo de interferencia.

La selección de la longitud de onda de excitación para evitar posibles interferencias en las mediciones es una poderosa característica de la técnica LII y uno de los más explotados actualmente. Es necesario considerar que el proceso de excitación mediante esta técnica calienta las partículas de hollín a velocidades muy altas, por lo que puede afectar las propiedades físicas de éstas.

Las medidas cualitativas se establecen a partir de la relación directa entre la señal de incandescencia emitida por el hollín y su concentración volumétrica. De forma general, la mayoría de los autores utilizan el método LII para obtener medidas directas de la concentración de hollín y sólo en pocos casos realizan la calibración previa y necesaria para obtener resultados en base cuantitativa. A pesar de ello, las medidas realizadas sin calibración permiten establecer relaciones entre los diferentes fenómenos estudiados y evaluar de forma adecuada la influencia de ciertos parámetros que afectan directamente a los procesos de formación del hollín en la cámara de combustión. Los parámetros claves que se determinan incluyen número de concentración, tamaño de partícula y fracción de volumen de hollín.

4.1.2. Perfil de intensidad del láser

El perfil espacial de la intensidad del láser es un parámetro importante en el comportamiento observado cuando la fluencia del láser es variado. Para un perfil espacial uniforme (Ej. perfil rectangular), la señal del láser logra un máximo y luego decrece asintóticamente a un valor constante.

Como se mencionó el comportamiento del láser como función de la fluencia del láser depende de si el perfil de haz es uniforme o gaussiana. La señal S_{LII} se incrementa cuando en un haz gausseano de intensidad de lasér aumenta su región transversal.

A partir de una perspectiva de aplicación como diagnostico, el efecto del perfil de la intensidad del láser es importante y deberá caracterizarse para cada sistema, para de esta forma implementar de manera correcta la técnica.

4.1.3. Región de detección espectral

La respuesta espectral del detector es importante puesto que el fondo y las interferencias inducidas por el láser son de preocupación en la captura de imágenes. Las longitudes de onda más corta favorecen la detección dado que la radiación luminosa natural de hollín disminuye bruscamente hacia el lado UV, sin embargo, se debe tener cuidado en la selección del ancho de banda espectral sobre la cual las mediciones son obtenidas. Contribuciones de emisión de C_2 generados por el calentamiento láser pueden introducir interferencias entre regiones de longitud de onda entre 420 y 620nm aproximadamente. Las interferencias de C_2 son particularmente importantes en llamas donde la concentración es larga (>2ppm).

El uso de filtros que tienen sus cumbres de transmisión de $\lambda \leq 450$nm eliminan las transferencias asociadas a las emisiones de C_2. Las interferencias de los PAHs están desplazadas hacia el rojo, por lo que se supone que la forma más efectiva para minimizar ambas interferencias es utilizar una fuente láser infrarrojo.

4.1.4. Detección de ancho de puerta y tiempo

Primero debemos clarificar a que nos referimos con estos dos conceptos, ancho de la puerta o "gate"se considera el tiempo que está abierto el obturador para tomar cada imagen

y con tiempo o "delay"nos referimos al tiempo necesario de retraso con que se debe tomar las imágenes. Lo segundo que debemos clarificar es que la señal LII varía con el tiempo por lo que se necesita la selección de ventana temporal. Al realizar el set up, se deja un ancho de puerta entre 10 y 50 ns, la razón de este tiempo es minimizar los efectos de las diferencias del tamaño de partícula que surgen cuando se utiliza retraso en la toma de imágenes. Por otro lado, el hacer esto podría tener la desventaja de que se produzca una interferencia dada la vaporización de especies o la fluorescencia de especies PAHs que se pueden minimizar o evitar con la utilización de un filtro adecuado.

El tiempo o ”*Delay*” es útil para discriminar la fluorescencia de las especies que fluorecen con el láser, este tiempo es mas corto que la caída de la señal LII, por lo que este retraso se aprovecha para eliminar la fluorescencia. Esta técnica provoca que se mida des-proporcionadamente partículas más grandes a medida que aumenta el tiempo de retraso (Para esto es necesario recordar que dentro del proceso de formación de hollín se van formando aglomerados).

En la mayoría de las aplicaciones el enfoque de ancho de puerta o ”*gate*” es recomendada, pero bajo ciertas condiciones experimentales que indiquen en que momento se produce el decaimiento y así poder determinar donde se presentan las ventajas.

Medir la energía de pulso es un procedimiento simple, donde un medidor de intensidad (Power Meter) es insertado en el camino del rayo durante su utilización y retirado posteriormente. Durante la experimentación, un reflejo del pulso láser es supervisado por medio de un fotodiodo, el cual está conectado a un osciloscopio para poder observar temporalmente este pulso. Esta medida puede ser usada como input para las señales LII y también revelar cualquier variación de la energía de pulso.

Debido a la alta energía de los pulsos del láser, la luz de láser debe ser atenuada antes que alcance el sensor de la cámara CCD. Esto es realizado utilizando filtros en serie para disminuir la intensidad de la luz de láser hasta que sea lo bastante bajo para ser alcanzada por el sensor de la cámara, que en este caso tenían una longitud de onda de 400nm.

5 | Configuración Experimental

5.1. Sistema experimental

La simplicidad del método LII es uno de sus aspectos más atractivos: el montaje experimental consiste en un láser pulsado de alta energía, una óptica de focalización, una óptica de recepción, un sistema de adquisición de datos apropiado y un fotodetector.

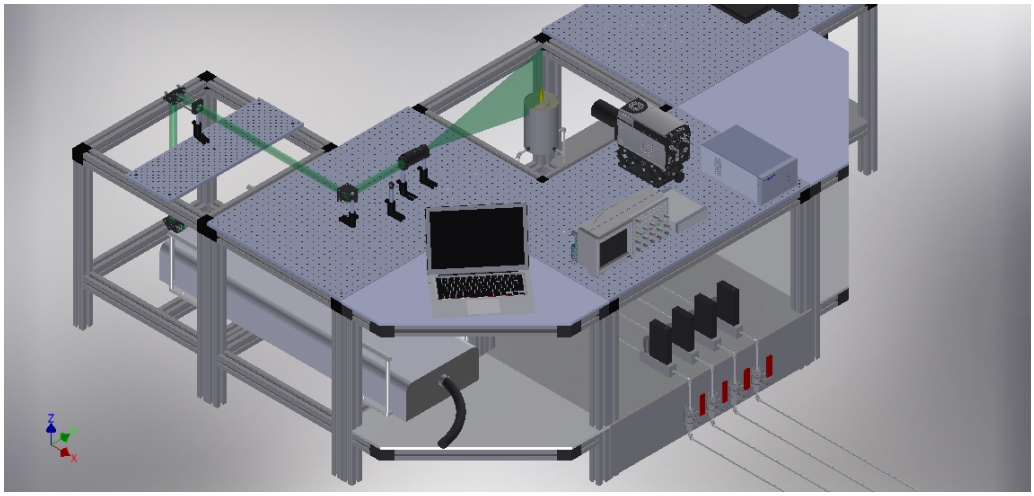

Figura 5.1: Configuración experimental vista desde arriba.

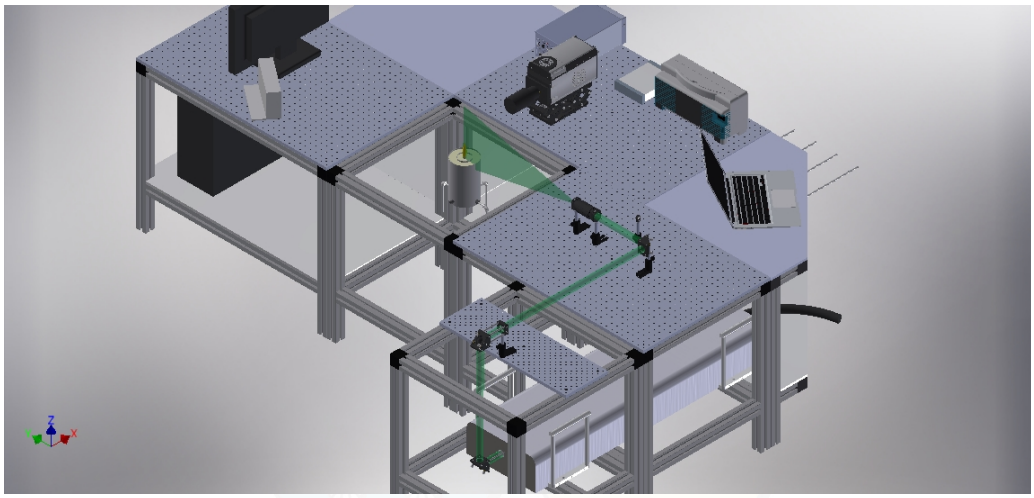

Figura 5.2: Configuración experimental vista desde atrás.

El método LII puede ser aplicado como un punto, una línea o para medidas con lamina láser para visualización 2D Kohse-Höinghaus and Jeffries (2002) Smallwood et al. (2002). Los elementos experimentales son similares en cada caso con apenas algunas diferencias en la óptica de focalización y recepción para obtener unas medidas en concreto.

5.2. Equipos e instrumentos utilizados

Los instrumentos que se utilizaron fueron un láser, una cámara, un filtro de 400nm, un generador de plano, espejos y lentes, un osciloscopio, un medidor de potencia, un generador de pulso y el quemador. El sistema de triggering usando un generador de pulso es utilizado para controlar el tiempo de la exposición del detector de tiempo con respecto al pulso del láser.

5.2.1. Láser

Será el responsable de emitir la luz a una longitud de 532 nm para elevar la temperatura de las partículas de hollín con un tiempo de pulso de láser de 15ns. A continuación se muestra el plano del láser y su controlador. Para su utilización, fue necesario contar con gafas de seguridad, que filtren las longitudes de onda que puedan dañar la vista de quienes están realizando las mediciones. El modelo utilizado fue un LPY707G-10, el cuál

corresponde a un sistema de alta energía con homogeneidad espacial.

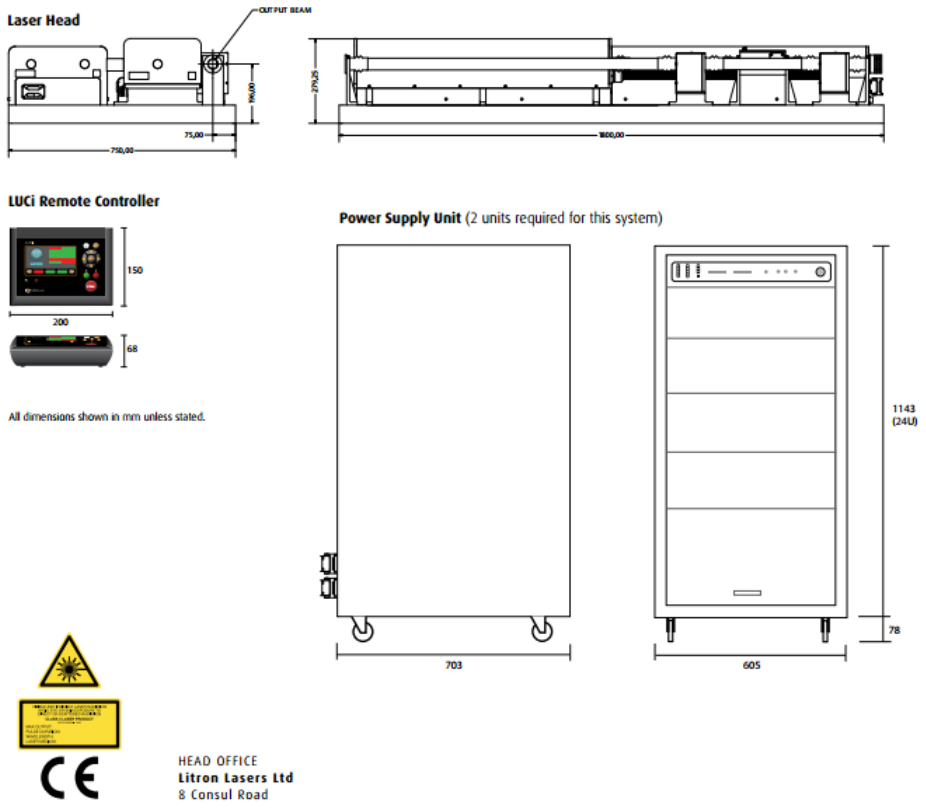

Figura 5.3: Plano del láser y controlador utilizado.

5.2.1.1. Especificaciones láser

El láser posee los lentes para generar disparos de 266 nm, 534 nm y 1064 nm. A continuación se muestran las especificaciones de la longitud de onda utilizada en el experimento a 534 nm. Especificaciones generales importantes son alta energía del pulso, resonador telescópico que hace que salga un haz de láser de baja divergencia y espacialmente uniforme, tren estabilizado de perfil.

Tabla 5.1: Especificaciones del láser.

Modelo LPU707G-10	
Ratio de repetición	10 (Hz)
Output Energy	435 (mJ)
Estabilidad del pulso	<4 ()
Diámetro del haz	3/8"
Voltaje	220-259
Duración pulso láser	15ns
PSU Type	LPU1000

5.2.2. Cámara ICCD

La cámara utilizada corresponde a una Andor iStar 334T que tiene una matriz total de pixeles de 1024x1024, posee una escala de captura de ns, tiene lector de ruido de 50 kHz, 2 MHz, 3 MHz y 5 MHz. La cámara posee además un intensificador de manera de poder observar de buena forma la imagen, ya que ésta es sumamente débil. Para esto se utilizó una ganancia (gain) de 2000 y un tiempo de exposición de 17 μs, y ratio de lectura 5MHz a 16 bit. Una característica importante es que posee un generador de retardo digital (DDG) controlado por su software, que cumplirá un rol importante al momento de sincronizar.

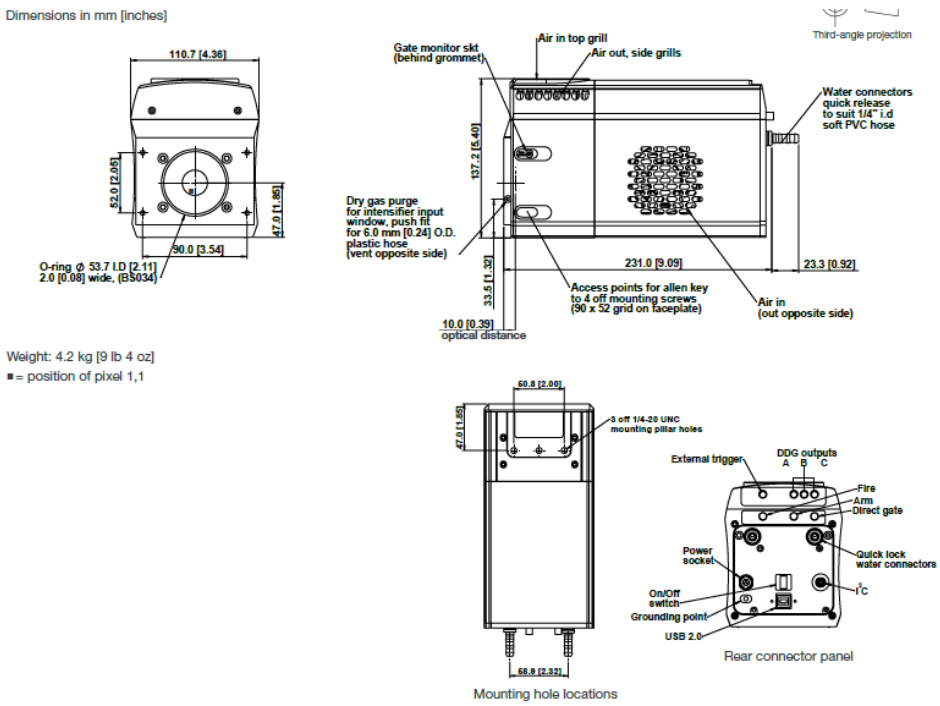

Figura 5.4: Plano de cámara utilizado.

5.2.3. Generador de pulso

Corresponde al modelo Quantum Sapphire. Este equipo fue fundamental para controlar el triggering externo, posee hasta 4 canales de sincronización y puede ser controlado tanto internamente como externamente. Mediante el generador de pulso se logró la sincronizar el láser y la cámara para determinar el instante preciso después de 70 nanosegundos de lanzado el disparo por el láser, con el objetivo de que realmente capturar la señal de LII (momento en que las partículas están encandeciendo).

Figura 5.5: Generador de pulso utilizado vista frontal.

Figura 5.6: Generador de pulso utilizado vista trasera.

5.2.4. Osciloscopio

Modelo: Tektronix TDS2024C. Un osciloscopio mide las salidas del amplificador de la cámara y de su exposición, el cual fue un instrumento fundamental para tener la certeza que la cámara está realmente tomando la foto el tiempo que se necesita y en el momento que se requiere, de manera de poder asegurar que la sincronización entre el generador de pulso, el láser y la cámara fue la adecuada.

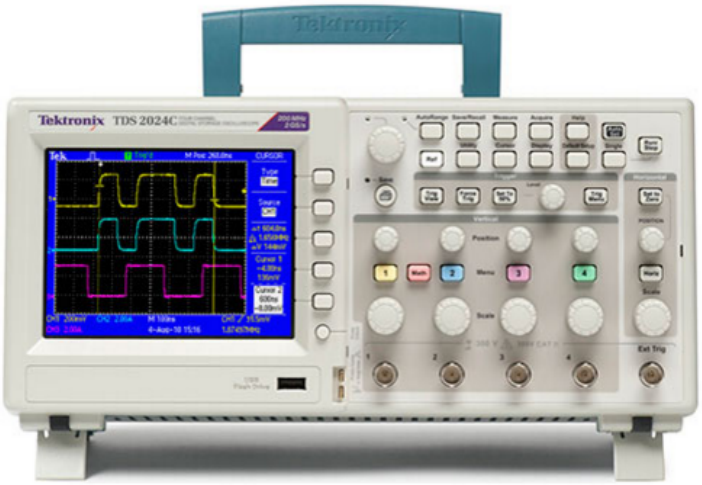

Figura 5.7: Osciloscopio utilizado.

A continuación se muestra la imagen de lo que fue la calibración de la cámara, donde se pueden ver los tiempos de exposición, amplificación, apertura de obturador y preparación para tomar la imagen de la cámara.

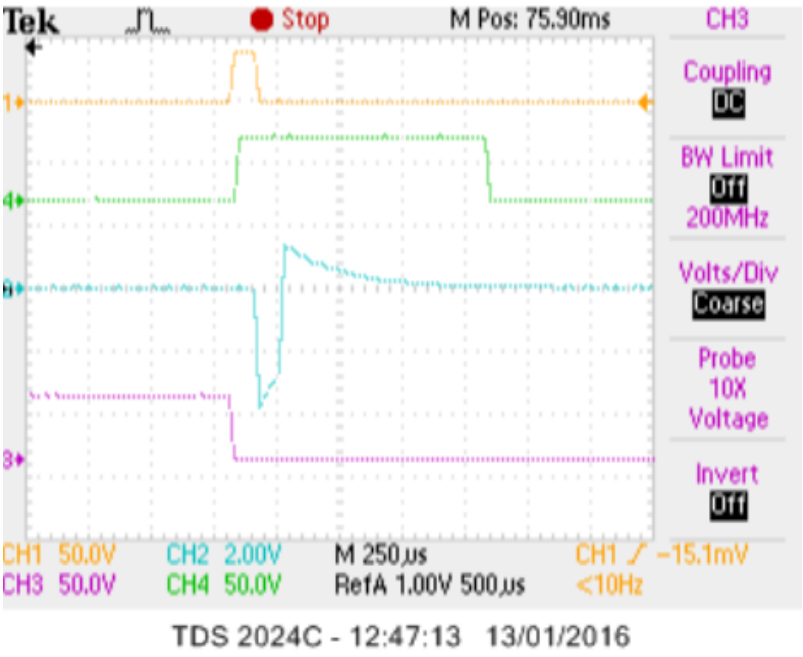

Figura 5.8: Sincronización pulsos cámara.

5.2.5. Quemador

El quemador utilizado, del tipo Gülder, el cual es un quemador axisimétrico que genera llamas laminares de difusión. El quemador se puede ver en la ilustración 5.9 y observar su geometría. Se observan esferas de vidrio y material poroso que permite homogeneizar el flujo del oxidante, en este caso aire a condiciones ambiente. El diámetro interior del quemador (donde se genera la llama) mide 1 cm, mientras que el diámetro total del quemador mide 10 cm. Los parámetros con que se utilizó el quemador se señalan más adelante. La llama estudiada tiene una altura visible de 80 mm aproximadamente.

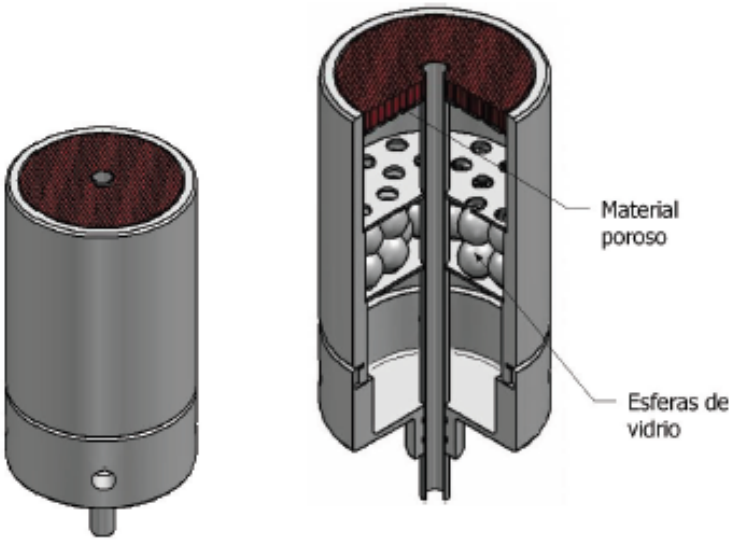

Figura 5.9: Quemador Gülder utilizado.

5.2.6. Lentes y filtros

En este grupo de materiales ópticos el papel más importante lo juega el filtro de 400 nm, que se ubica delante de la cámara. Este filtro es fundamental para eliminar la mayor cantidad de ruido y observar de manera más nítida la imagen de la llama y el hollín, el modelo del filtro utilizado corresponde a Thorlabs FBH400-40 donde el centro de longitud de onda es 400 nm con un ancho de banda de ±40 nm y un diámetro de 25mm.

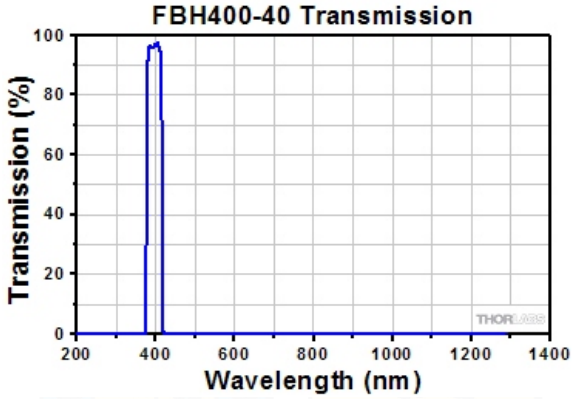

Figura 5.10: Curva de transmisividad para el filtro FBH400-40. Fuente: Thorlabs.

Figura 5.11: Filtro FBH400-40. Fuente: Thorlabs.

Otro papel fundamental cumple el generador de plano, que es el que permite transformar el haz de luz que sale desde el láser en un plano que corta de manera axial la llama de etileno en estudio y que se ubica de forma perpendicular a la cámara encargada de tomar la imagen de estudio.

Figura 5.12: Ejemplo generador de plano utilizado.

Los lentes son fundamentales para guiar el pulso desde el láser a la llama, son los encargados de generar el camino necesario para que el haz que sale del láser llegue de manera precisa y con distancia adecuada del generador de plano que finalmente llegará a la llama de difusión laminar en estudio.

El fotodiodo PDA55 de THORLABS es un detector de silicio amplificador de fotones diseñado para la detección de señales de luz de 10 MHzes. Es utilizado para detectar la distribución temporal del pulso del láser, si bien no es fundamental en la configuración de la técnica en sí, es necesario para ubicar los tiempos necesarios para la cámara, ya que se utilizó para detectar la pasada del láser inmediatamente anterior a la pasada por el generador de plano.

Figura 5.13: Ejemplo fotodiodo utilizado.

5.2.7. Medidor de potencia

El medidor de potencia fue necesario para asegurarse que la potencia entregada por el láser fuera estable, se utiliza un modelo:Thorlabs S142Cque posee un sensor de fotodiodo que recibe fotones que inciden hacía el independiente de la forma ángulo de incidencia. Fue importante esta medición ya que las fotos fueron tomadas en momentos que se encontraba estable la potencia. El tiempo que demora en estabilizarse el láser es de alrededor 10 minutos y luego de esto al prenderse el sistema de refrigeración se encuentra preparado para que la variación de la potencia no genere alteraciones en la calidad de la imagen.

Figura 5.14: Modelo power meter utilizado

La responsividad entregada por el proveedor

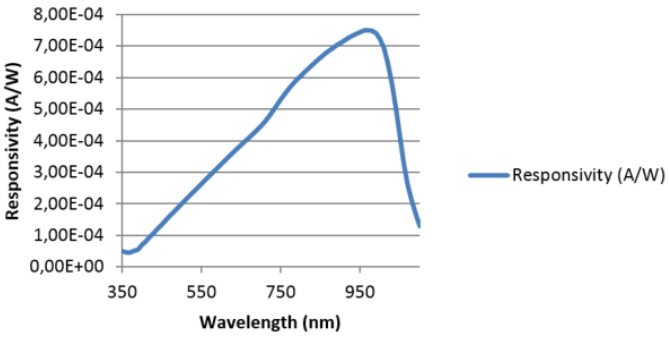

Figura 5.15: Responsividad Thorlabs S142C. Fuente: Thorlabs.

Con respecto al medidor de potencia nos fue principalmente útil para asegurarnos que la potencia del láser era estable, luego de un tiempo de estabilización de 10 minutos logramos

obtener el resultado que se puede apreciar en la siguiente imagen.

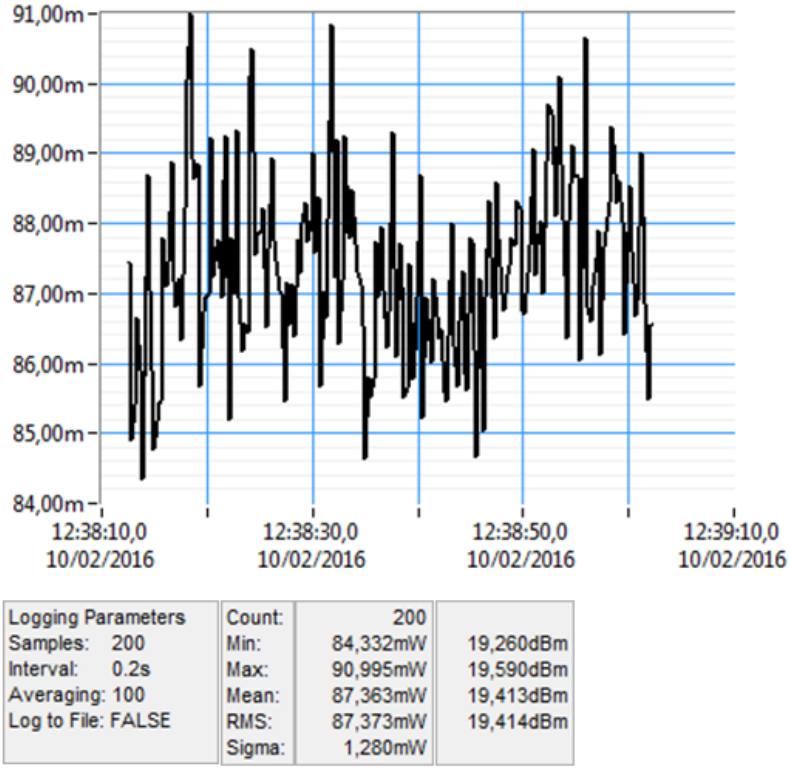

Figura 5.16: Gráfico potencia de láser.

5.2.8. Controlador de flujo

Modelo: Brooks SLA5850. Para configurar la llama, se hace necesario programar los flujos que pasaran por la línea de combustible y aire en donde se transportará etileno y aire respectivamente (C_2H_2). Este controlador permite estabilidad y precisión de los flujos a utilizar.

Figura 5.17: Modelo flujómetro utilizado.

Posee un consola digital, que permite ingresar y controlar los flujos a utilizar.

Figura 5.18: Modelo consola flujómetro utilizado.

5.3. Especificaciones de estudio

Se utilizó una llama de difusión laminar de aire y etileno con una altura de aproximadamente 80mm como se puede ver en la siguiente figura.

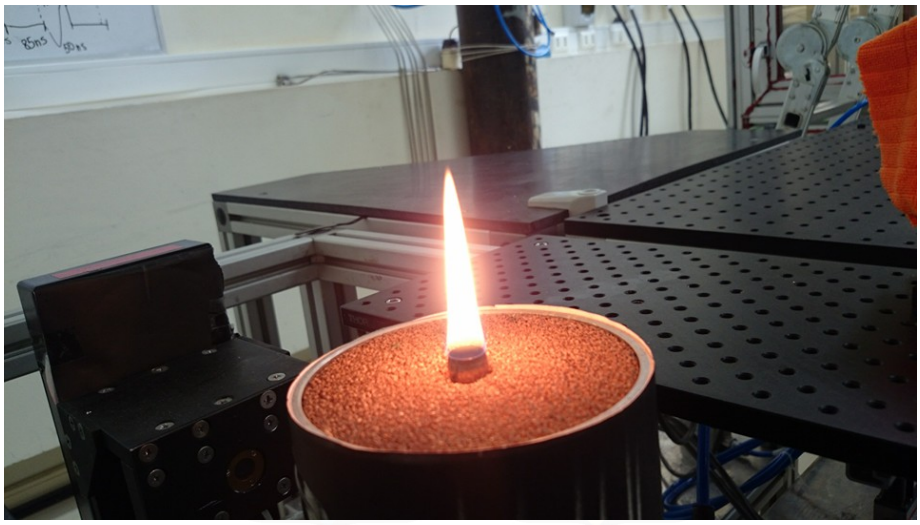

Figura 5.19: Foto llama utilizada para el experimento.

El etileno (C_2H_4) es un hidrocarburo formado por dos átomos de carbono enlazados mediante doble enlace que se encuentra en forma natural en las plantas. Es un gas incoloro e inflamable sumamente utilizado en la industria. Como lo señala Savel'ev et al. (2008) el etileno presenta propiedades parecidas a las que se presentan en la combustión de un material sólido, ya que tiene una alta producción de hollín. Es por esto que se elige al etileno como combustible de alimentación del quemador:

Las características importantes del etileno son

Peso molecular: Wgas= 28,054 kmol/kg

Poder calorífico inferior: $\triangle$ H gas = 1.322,96 MJ/kmol = 47.158 kJ/kg

Densidad a 15ºc y 1 atm =ρ gas = 1,19 kg/m^3

Temperatura de llama adiabática: T_{ad} = 2.523 K

Para una llama de etileno se debe conocer las siguientes propiedades típicas de las partículas de hollín generadas en la combustión de este combustible:

Coeficiente medio de absorción: K_s= 11,92 m^{-1}

Fracción volumétrica de hollín γ_s = 5,55 $x10^{-6}$

Temperatura de emisión T_s= 1.722 K

Flujo de aire = slm[standard liter per minute (litros estándares por minuto)]

Flujo de combustible = sccm[standard cubic centimeters per minute (centímetros cúbicos estándares por minuto)]

Estudios de investigaciones de etileno se refieren a valores de fracción radiactiva que se encuentran entre 0,25 y 0,38.

Sobre los aspectos de seguridad del etileno con respecto a riesgos se encuentran posibles fugas lo que puede llevar a generar asfixia, ya que al ser un combustible que es más pesado que el aire por lo que alcanza grandes distancias y con el aire formar mezclas explosivas y provocar llamas. El etileno se puede utilizar sin problemas con materiales debido a que no es corrosivo.

Con respecto a la extinción en caso de liberar etileno, en caso de provocar incendio se debe extinguir con dióxido de carbono, polvo químico y agua pulverizada. En las mediciones es necesario que se extinga la llama mientras sigue fluyendo aire por el quemador, además se utilizó compresor y campana de ventilación.

Y en cuanto al almacenamiento con respecto al cilindro de gas principalmente para su movilización no se debe arrastrar, si no levantar, y protegiendo de golpes. Se debe almacenar en un lugar fresco y ventilado.

Como se mostró anteriormente, debido a que la señal es muy débil se amplifica la imagen. Pero ésta no es lineal, se comporta de la siguiente manera:

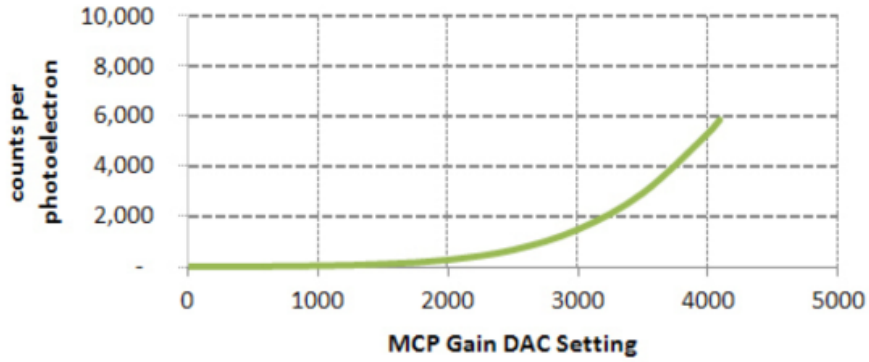

Figura 5.20: Amplificador de fotones cámara Andor.

Finalmente se muestra una imagen del laboratorio en el momento que se tomaban mediciones.

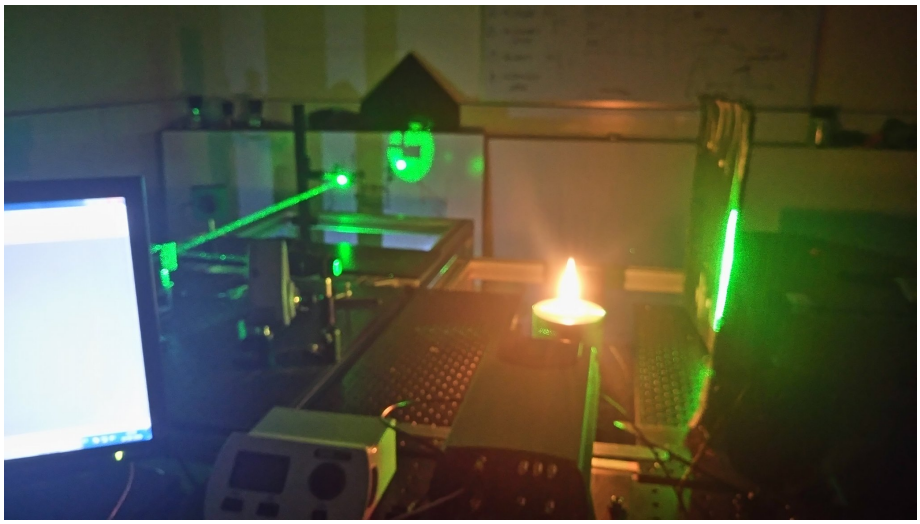

Figura 5.21: Laboratorio mientras se toman imágenes.

5.3.1. Tiempos relevantes

Duración pulso láser = 15ns

Tiempo de exposición= 17μs

Retardo DDG= 30885 ns

Ancho de banda a DDG= 30ns

Retardo cámara 170 ns

Q-switch 195μs

Es necesario aclarar que 195 μs corresponde al Q-switch que es el retardo que existe entre la lámpara de activación y la activación de conmutación.

6 | Calibración

6.1. Metodología múltiples puntos de extinción de luz

El método de calibración utilizado es uno de los propuestos por Pastor et al. (2006), en donde se señala que la interpretación cuantitativa de la señal LII requiere la implementación de una calibración que permita establecer una relación entre la fracción en volumen de hollín y la señal LII tomando en cuenta los factores que afectan a la medición, los cuales se pueden apreciar en la siguiente expresión

$$C_v(x, y) = C_{calib} \cdot S'_{LII}(x, y) \tag{6.1}$$

Donde $S'_{LII}(x, y)$ corresponde a la señal corregida de LII y en adelante $C_v(x, y)$ será el obtenido por técnica Light of signal attenuation(LOSA) técnica a la cual nos referiremos más adelante brevemente.

El método de calibración propuesto corrige la señal LII mediante múltiples puntos de extinción de luz, de esta forma se calcula C_{calib} mediante la comparación de mediciones de fracción en volumen de hollín con una técnica de extinción de luz con la señal corregida de LII a diferentes posiciones radiales. Para calcular el factor de calibración C_{calib} se debe encontrar los máximos de la señal corregida obtenida por LII y los máximos obtenidos por LOSA a las distintas alturas radiales.

Para la adecuada calibración mediante este método es necesario considerar factores que afectan la medición de la señal S_{LII} como lo son:

- Corrección capa láser, busca homogeneidad en la distribución del haz de luz del láser.
- Efectos de atenuación con el láser, el cual se produce debido a la disminución de intensidad al ir avanzando a través de la llama.
- Efecto de auto atenuación, el cual ocurre en dirección a la cámara por las partículas de hollín que se encuentran desde la zona en interés hasta el sistema de colección de imágenes, también es conocido por "trapping".

Por lo que la señal corregida se define de la siguiente forma

$$S'_{LII}(x,y) = S_{LII}(x,y) \cdot M_{compensación} \cdot C_{absorción} \cdot C_{auto-atenuación} \tag{6.2}$$

A continuación presentamos en detalle la corrección de cada efecto.

6.1.1. Corrección de la capa láser

Al realizar las mediciones la intensidad de luz recibida no es la misma a distintas alturas de la llama debido a la capa del láser y a la apertura que posee, esto como consecuencia de un perfil pseudo gausseano. Esto se puede corregir en el momento del procesamiento de la imagen obteniendo lo que se llama una matriz de compensación, de esta manera poder corregir las no homogeneidades de la intensidad del láser. Para esto se tomaron imágenes del láser sobre una nube de humo de Etilenglicol, luego de promediar 200 imágenes se obtiene un perfil gausseano, el cual se aplica a toda la imagen y se obtiene una matriz de compensación homogénea. A continuación se puede ver la imagen obtenida como promedio de la imagen y la matriz de compensación.

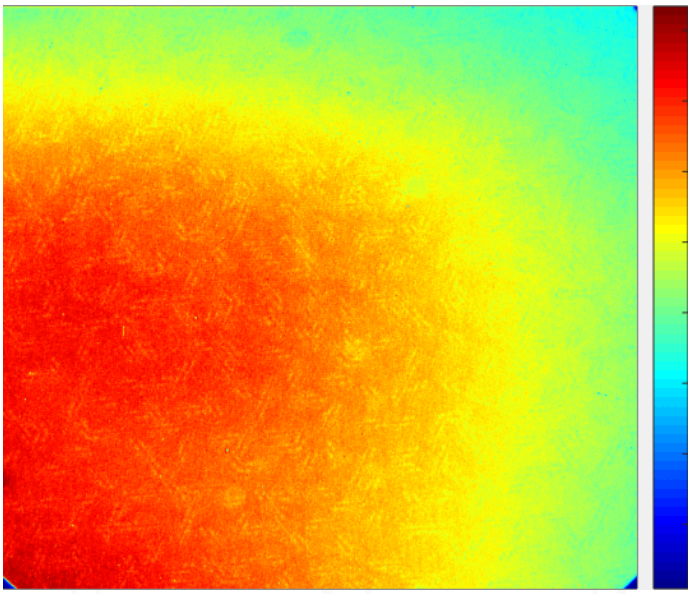

Figura 6.1: Mapa obtenido luego de promediar 200 capturas de Etilenglicol.

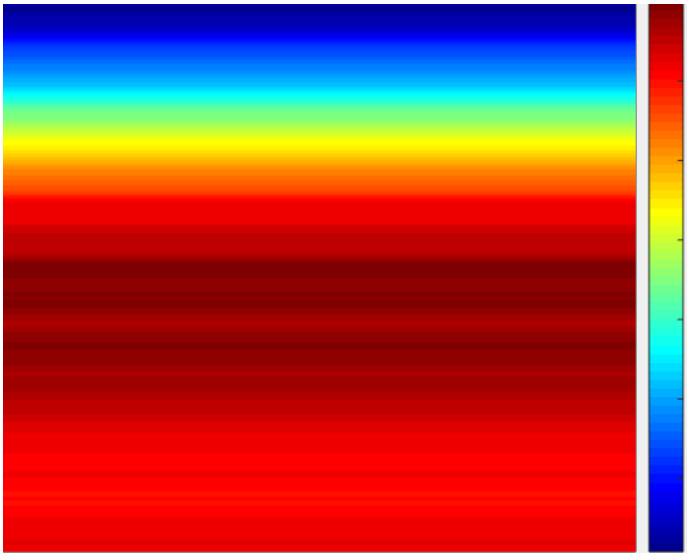

Figura 6.2: Mapa láser corregido.

El efecto de esta corrección se puede ver reflejado en la siguiente imagen.

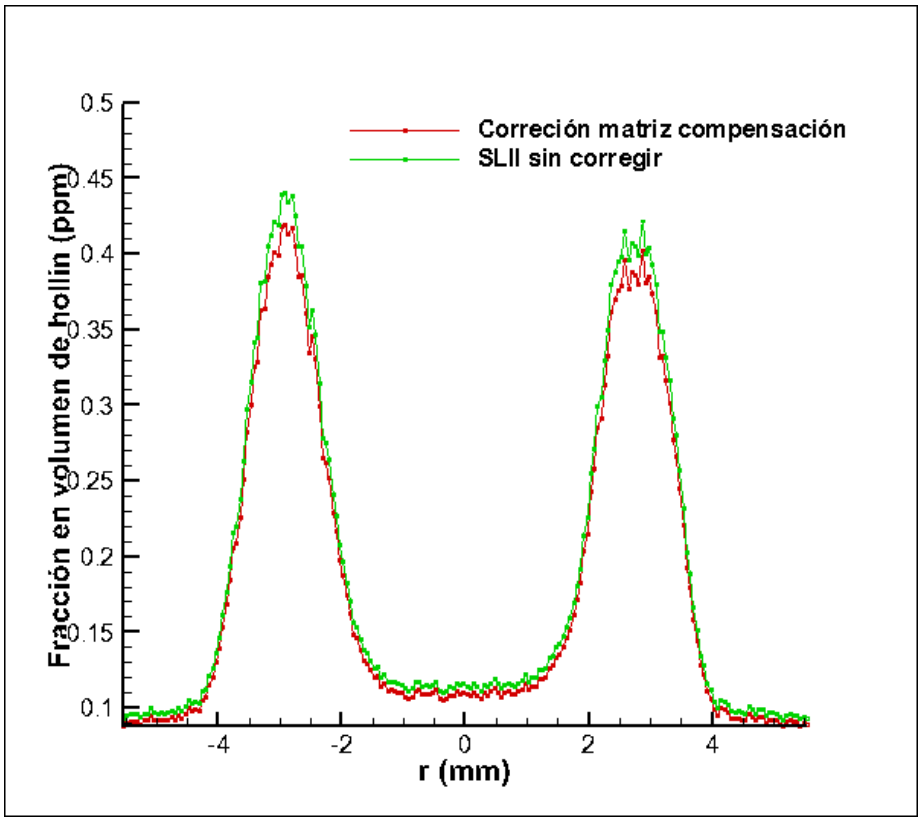

Figura 6.3: Curvas reflejan la corrección de la matriz de compensación de manera aislada.

En las imágenes 6.4 y 6.5 se pueden apreciar en que cambia la correción de la capa láser a la imagen ya procesada.

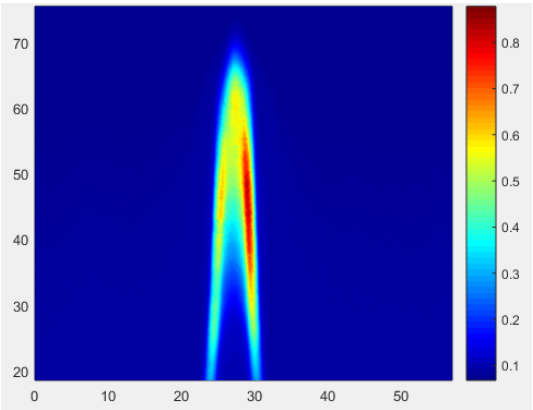

Figura 6.4: Imagen de la llama sin correción de capa láser

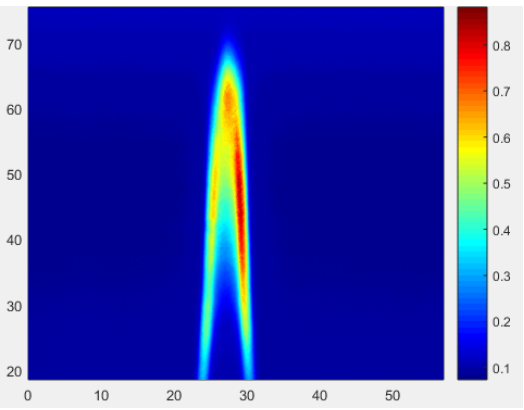

Figura 6.5: Imagen de la llama con correción de capa láser

6.1.2. Corrección de la absorción del haz de láser

A medida que la luz pasa por un medio, ésta se va atenuando por lo que disminuye la intensidad del haz, este es el problema que intentamos solucionar con esta corrección, es decir que la intensidad al finalizar la llama debiese ser la misma que al iniciar el recorrido de la llama. En casos como estos, en que la luz se absorbe se usa el modelo ley de Beer-Lambert para corregir este fenómeno de atenuación, que depende de cambios en el coeficientes de absorción, de la fracción en volumen de hollín obtenido por light of signal attenuation, de la longitud de onda, y el valor del indice de refracción. Para obtener los datos se consideran la atenuación ocurrida en el camino óptico. La señal se corrige pixel al pixel a través de la línea de observación a una altura dada, considerando el efecto atenuador hasta ese pixel. Por lo tanto es posible calcular la intensidad que recibe cada pixel de la siguiente forma

$$C_{auto-absorción}(x,y) = exp\left[\frac{6 \cdot \pi \cdot E_{m_{soot}} \cdot d}{\lambda_a} \cdot \sum_{j=1}^{j=x} C_v(j,y)\right] \tag{6.3}$$

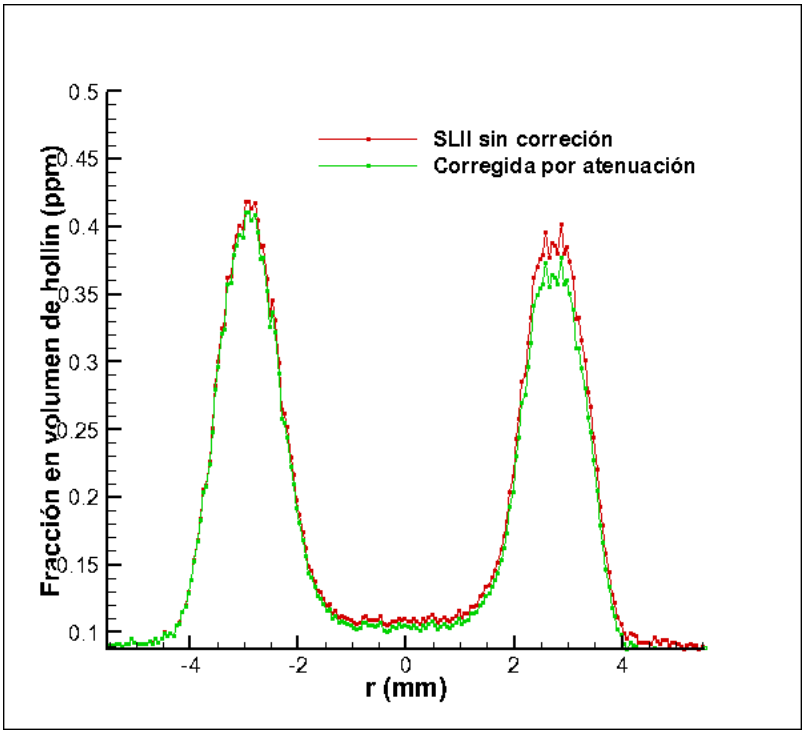

Figura 6.6: Curvas reflejan la corrección de la atenuación de manera aislada.

6.1.3. Corrección de auto-atenuación

Esta ocurre cuando la señal excitada por la incandescencia del láser es atenuada por partículas que se encuentran entre ellas mismas y el sistema de colección en este caso la cámara, por lo que es importante solucionar este problema. Nuevamente se utiliza el modelo de ley de Beer-Lambert, el problema se torna relativamente sencillo al hablar de una llama laminar simétrica. Para esta corrección se debe considerar que la llama está compuesta por anillos concéntricos que contienen la misma cantidad de hollín, lo cual es base para la corrección. Una forma de simplificar el problema, es que la señal sigue una línea derecha hacia el sistema de colección, lo cual es cierto, ya que en el setup se consideró que el sistema de colección con el haz de láser quedarán de manera perpendicular a la señal del láser. La señal que es generada en la línea central de la llama, la cual atraviesa anillos de radio r que se deben corregir de acuerdo a la ecuación Beer-Lambert, donde cada anillo hace un recorrido de largo $L(x, r)$, que en este caso era del largo de un pixel. Para la señal LII se debe calcular el coeficiente de auto-atenuación o "trapping"de la siguiente forma:

$$C_{auto-atenuación}(x, y) = exp\left[\frac{6 \cdot \pi \cdot E_{m_{soot}}}{\lambda_t} \cdot \sum_{r=x-1}^{r=1} [L(x, r) \cdot C_v(r, y)]\right] \tag{6.4}$$

Una forma de ilustrar los parámetros utilizados en esta corrección se puede apreciar en esta imagen.

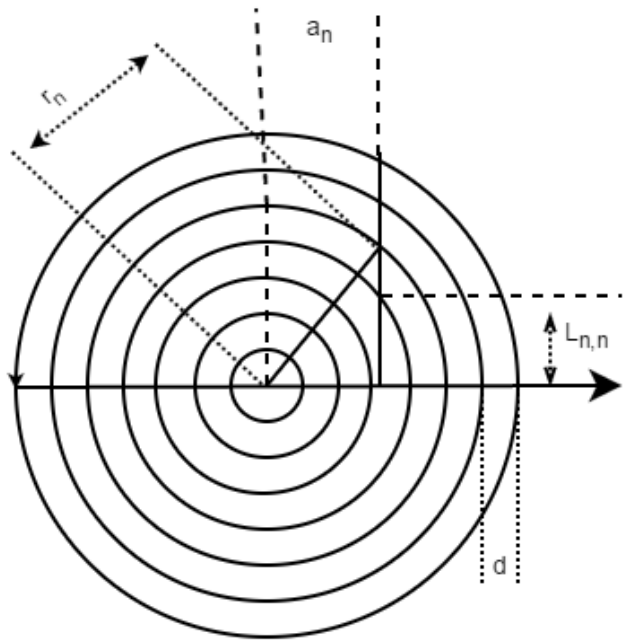

Figura 6.7: Geometría utilizada en calibración de auto-atenuación.

Donde $L(x, r)$ se obtiene mediante la siguiente geometría:

$$L_{n,m} = (r_m^2 - a_n)^{1/2} - L'$$

$L' = 0$ en casos donde m=n; de lo contrario

$$L' = (r_{m+1}^2 - a_n^2)^{1/2}$$

Los cambios de esta corrección se pueden ver en la imagen a continuación:

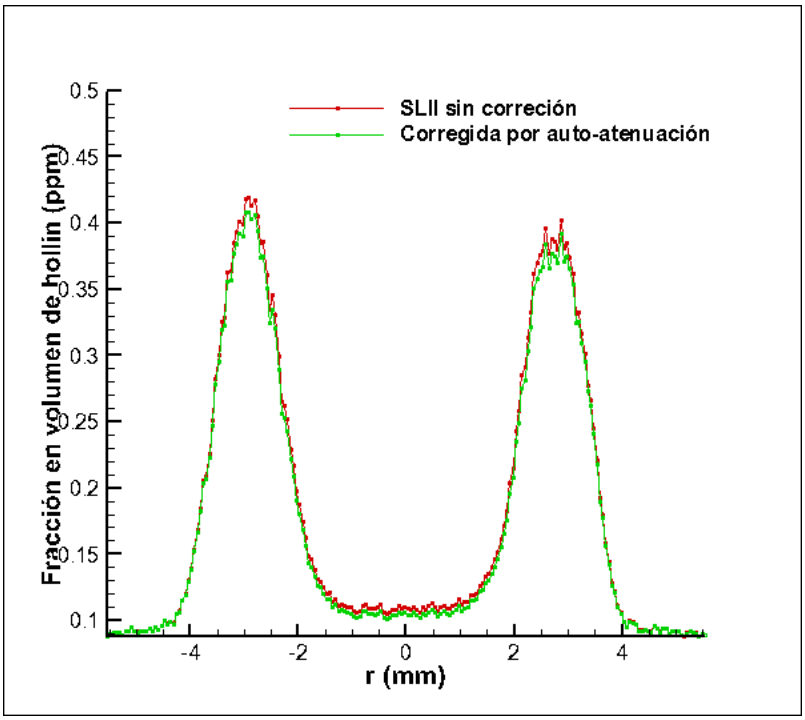

Figura 6.8: Curvas reflejan la corrección de la auto-atenuación de manera aislada.

Luego de obtener la señal de LII corregida se debe obtener el factor de calibración, el cual es la pendiente de la tendencia que debiera presenta en 45° entre la fracción en volumen de hollín y la señal corregida.

6.2. Light of sight attenuation

La técnica de atenuación LOSA (Line of sight attenuation) o LE (Light Extinction) se utiliza para la medición de la fracción en volumen de hollín. Se basa en el paso de un haz de luz a través de una llama, para luego medir por medio de detectores de atenuación de la intensidad de la luz con lo que se puede estimar finalmente la cantidad de hollín presente en el camino óptico del haz. La teoría de dispersión indica que la extinción de la luz se produce debido a la combinación de absorción y la dispersión de las partículas por la que cruza la luz. La idea es medir la cantidad de luz que es absorbida y dispersada y así caracterizar el medio que produjo este efecto. Asumiendo que la dispersión del material particulado es insignificante, el cálculo de la extinción de luz se puede simplificar. Para esto se debe comprobar que las partículas son significativamente más pequeñas que la longitud de onda

que se utiliza, para esto se utiliza el criterio de límite de Rayleigh el cual señala que:

$$\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \leq 0{,}3 \tag{6.5}$$

Al comprobarse este criterio se puede utilizar esta técnica obteniendo la intensidad antes y después de pasar por la llama, al dividir el segundo por el primero da como resultado la transmisividad (τ):

$$\tau = \frac{I_\lambda}{I_{0,\lambda}} = \exp[-\int_{-\infty}^{+\infty} k_{e,\lambda} dl] \tag{6.6}$$

Donde

I_λ: Intensidad luego de pasar por la llama.

$I_{0,\lambda}$: Intensidad antes de la llama.

$k_{e,\lambda}$: Coeficiente de extinción local.

l: Longitud de la trayectoria de la llama.

Se considera $A_\lambda = -ln(\frac{I_\lambda}{I_{0,\lambda}})$

Luego se puede obtener la ecuación que nos entrega la fracción de hollín

$$f_v = \frac{k_{e,\lambda} \cdot \lambda}{6 \cdot \pi \cdot E(m)} \tag{6.7}$$

$$E(m) = -Im(\frac{|m^2 - 1|}{|m^2 + 2|}) = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2} \tag{6.8}$$

Donde:

f_v: Fracción en volumen de hollín.

$E(m)$: Función de absorción del índice de refracción compleja de hollín

Legros et al. (2006) señalaron que $k_{e,\lambda}$ era casi contante en la región de la llama ubicada entre x=15 mm y x=50 mm de altura sobre el quemador por lo cual la relación anterior sería apropiada. Pero se señala que para longitudes mayores ya no se justifica k constante, sin embargo de todas formas el espesor k es útil para obtener el factor de calibración, ya que $k_{e,\lambda}$ es proporcional al promedio de la fracción en volumen de hollín

$$f_{vm} \propto \int_{LZ} I_{lii(z)} dL \tag{6.9}$$

Tenemos:

$$k_{e,\lambda} = \zeta \int_{LZ} I_{lii(z)dL} \tag{6.10}$$

El objetivo es el coeficiente de proporcionalidad $k_{e,\lambda}$ para obtener la relación de la señal obtenida por el coeficiente de absorción local y para ello llegar a la fracción de hollín. Para ello se puede realizar un histograma de tres ejes o dimensiones, en donde la dimensión vertical señale los pixeles de referencia, y en las dimensiones horizontales la intensidad LII y el coeficiente de absorción, en este gráfico se observa una tendencia a la adición de intensidad de LII hacia el aumento del coeficiente de absorción de manera lineal. La inversa de la pendiente de la regresión lineal es quien representa el factor de calibración ζ.
En efecto si:

$$f_{vm} \propto \zeta \cdot S_{LII} \tag{6.11}$$

Donde:

$$\int_{LZ} f_{vm} dz \propto \zeta \int_{LZ} S_{LII} dz \tag{6.12}$$

o

$$\int_{LZ} k_{e,\lambda} dz \propto \zeta \int_{LZ} S_{LII} dz \tag{6.13}$$

El coeficiente ζ de calibración debe ser capaz de deducir la integral de la señal de LII $\int_{LZ} S_{LII} dz$, por lo tanto una vez determinado el valor de ζ se calibra el conjunto de la señal S_{LII}.

7 | Resultados y conclusiones

El procedimiento fue aplicado a toda la llama, pero al igual que en el estudio usado por Pastor et al. (2006), nos enfocamos en la zona de la llama que contiene altas gradientes de concentración de hollín, esto es, desde los 20 a los 40 mm sobre el quemador. Como se señaló anteriormente la calibración se realizó seleccionando los máximos de LOSA y de señal LII corregida (SLII'), los cuales son proporcionales como se muestra en la figura a continuación, donde se revela la relación lineal entre ambas técnicas.

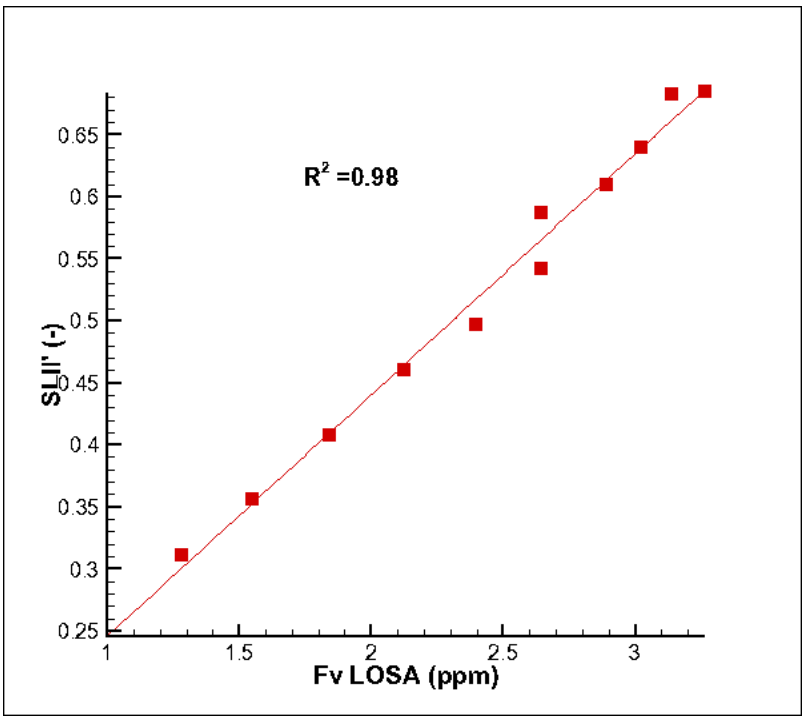

Figura 7.1: Tendencia lineal entre la señal corregida de LII y la fracción en volumen de hollín obtenida por LOSA.

En la figura 7.2 muestra una serie de mediciones SLII corregida a distintas alturas, la distribución muestra un incremento en la atenuación y en el máximo volumen a medida

que nos acercamos al inyector de combustible.

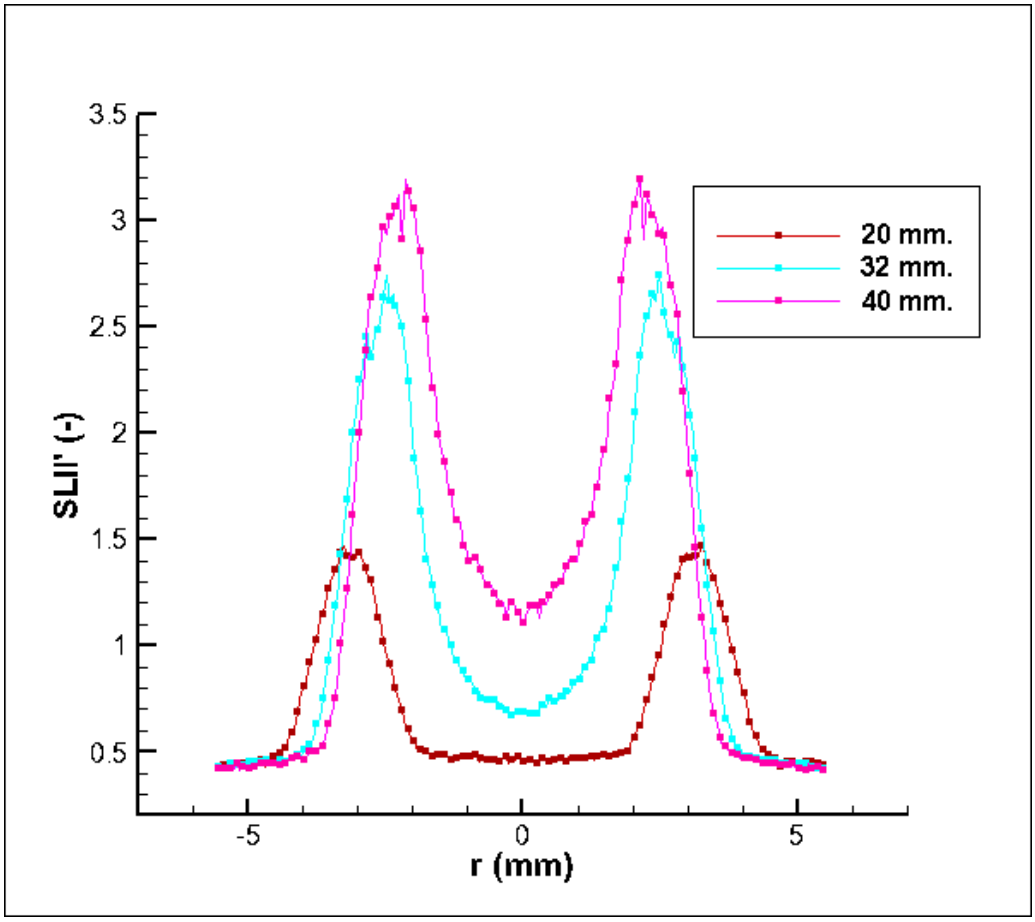

Figura 7.2: Curvas reflejan la fracción en volumen de hollín medida por la técnica de incandescencia inducida por láser a distintas alturas.

.

También es necesario considerar que en el proceso de calibración de LOSA existe un parámetro importante que es el parámetro alpha α , la elección de este parámetro afecta a la calibración de la técnica LII. En términos concretos la variación de alpha (α) afecta a que tanto se suaviza la curva y también los máximos a cada altura. En la imagen 7.3 se puede observar el cambio del coeficiente C_{calib} al sensibilizar este valor. Se realizaron dos sensibilizaciones al valor de α que se utilizó para la calibración realizada en la sección anterior. En las imágenes se puede ver comportamiento de las curvas al variar α y lo que significa el cambiarlo en términos de R^2.

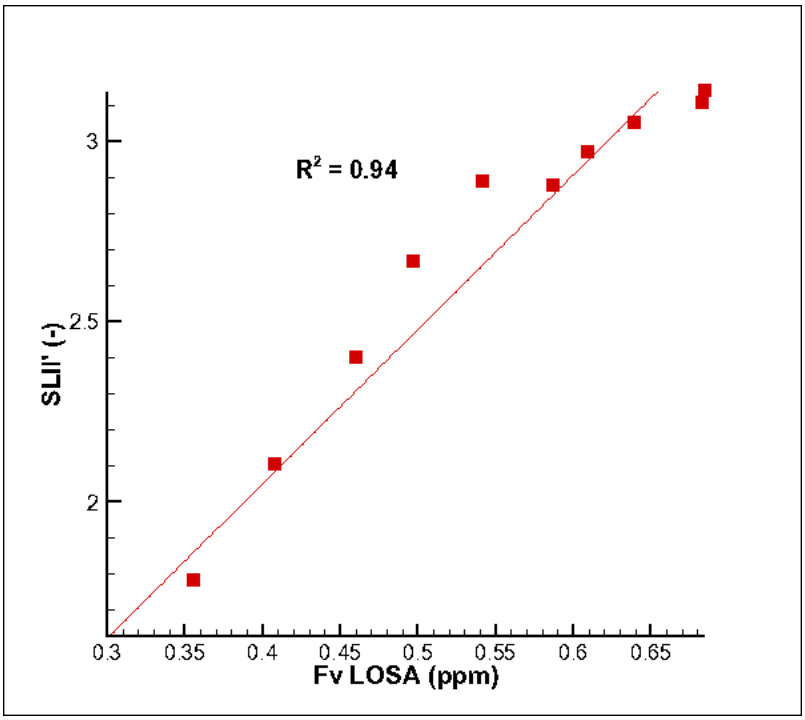

Figura 7.3: Tendencia lineal entre la señal corregida de LII y la fracción en volumen de hollín obtenida por LOSA al variar α en LOSA.

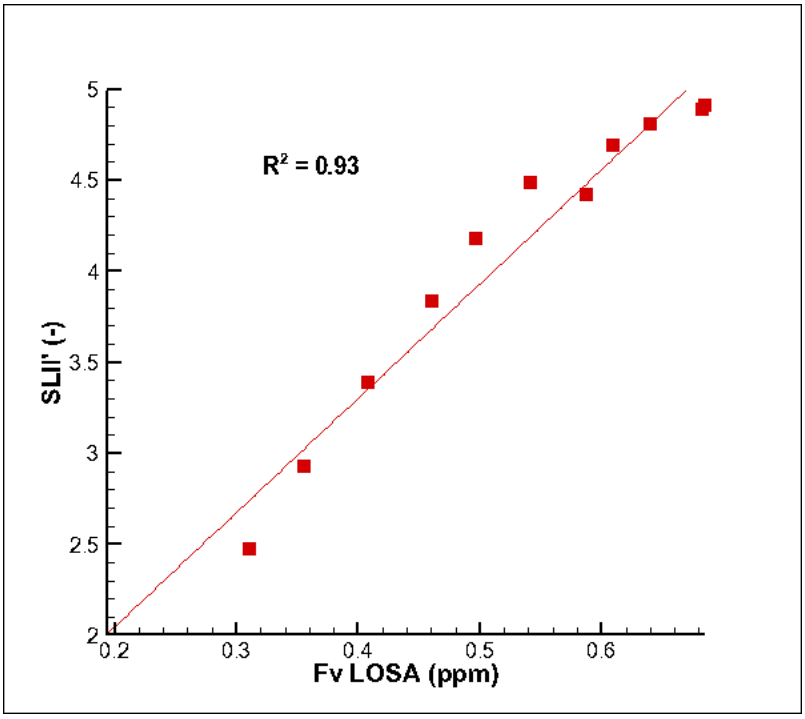

Figura 7.4: Tendencia lineal entre la señal corregida de LII y la fracción en volumen de hollín obtenida por LOSA al variar α en LOSA.

7.1. Análisis del Error

Para este ánalisis se utilizó como guía el estudio realizado en Fuentes et al. (2007). La incertidumbre de C_{calib} surge de la siguiente ecuación señalada también en la sección anterior:

$$k_{e,\lambda} = \frac{f_v \cdot \lambda}{6 \cdot \pi \cdot E(m)} \tag{7.1}$$

Conociendo esto, la incertidumbre sobre la fracción en volumen de hollín f_v se evaluó mediante la propagación de la incertidumbre relativa como se muestra a continuación:

$$\frac{\delta f_v}{f_v} = \frac{\delta k_{e,\lambda}}{k_{e,\lambda}} + \frac{\delta E(m)}{E(m)} + \frac{\delta \lambda}{\lambda} \tag{7.2}$$

De acuerdo con la Ley de Bourger la incertidumbre relativa del coeficiente de absorción, que se encuentra en la primera parte de la ecuación, viene dada por:

$$\frac{\delta k_{e,\lambda}}{k_{e,\lambda}} = \frac{1}{ln\left(\frac{i_\lambda(0)}{i_\lambda(s)}\right)} \left(\frac{\delta i_\lambda(0)}{i_\lambda(0)} + \frac{\delta i_\lambda(s)}{i_\lambda(s)}\right) \tag{7.3}$$

Los valores en los gamas de intensidad de referencia para ausencia de llama $i_\lambda(0)$ y para presencia de llama $i_\lambda(s)$ se calculan con un promedio de 200 imágenes. Las incertidumbres relativas a λ se calcularon para una relación $\left(\frac{i_\lambda(0)}{i_\lambda(s)}\right)$ que resulta en una variación de $\left(\frac{\delta k_{e,\lambda}}{k_{e,\lambda}}\right)$.

La incertidumbre de E_m depende de la exactitud de los datos, una buena opción es utilizar los datos de Habib and Vervisch (1988) que contribuye a la incertidumbre relativa evaluada en 532nm de acuerdo a la siguiente relación.

$$\delta E_m = |\frac{\vartheta E_m}{\vartheta n}|\gamma n + |\frac{\vartheta E_m}{\vartheta k}|\gamma k \tag{7.4}$$

Para el diodo láser que utilizamos se comprobó que era estable en una sección anterior, por lo que se considera insignificante cualquier cambio en su valor. Para los LEDs, la estabilidad de la longitud de onda central depende de la temperatura.

El tipo de fuente utilizado también induce a un error sistemático debido a que es no-

monocromatico en la naturaleza de luz emitida, existiendo el problema para el espectro de LED. Para limitar el error se instala un filtro frente a la cámara que tiene un ancho de banda de 10nm, es importante evaluar la contribución debido a la utilización de una fuente no-monocromática.

La intensidad de la cámara viene dada por:

$$I_{CCD} = \int_0^{+\infty} (i_0(\lambda) Exp(-K_m L)\tau(\lambda) R(\lambda))\, d\lambda \tag{7.5}$$

donde K_m es el coeficiente de extinción promedio a través de la distancia de luz recorrida, $\tau(\lambda)$ la transmisividad del filtro y $R(\lambda)$ es la eficiencia de la cámara.

La incertidumbre acerca de la relación de intensidad viene dada por:

$$\frac{\delta\left(I_{CCD}^{on}/I_{CCD}^{off}\right)}{I_{CCD}^{on}/I_{CCD}^{off}} = \left[\frac{I_{CCD}^{on}}{I_{CCD}^{off}}\right]^{-\delta\lambda/\lambda_0} - \left[\frac{I_{CCD}^{on}}{I_{CCD}^{off}}\right]^{\delta\lambda/\lambda_0} \tag{7.6}$$

La componente sistemática de la incertidumbre de una λ se obtiene nuevamente utilizando la ley de Bourger.

Considerando todos estos factores, es necesario recalcar que en términos de valor lo que más influyen son los de coeficiente de absorción y la función de absorción,y que otros como la incertidumbre asociada a la cámara o el láser son importantes teóricamente, pero no cuantitativamente. Finalmente los valores de cada componente de incertidumbre se señalan a continuación y son los presentados en Fuentes et al. (2007):

Tabla 7.1: Componentes individuales que contribuyen a la incertidumbre individual y expandida de f_v. **fuente:** Laser-induced incandescence calibration in a three-dimensional laminar diffusion flame, Fuentes (2007)

Componente incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre expandida
n_λ	5	
k_λ	17	
E_m	-	24 %
i_0	2	
i	5	
i_0/i	7	
$k_{3,\lambda}$ estádistico	-	10-20 %
$k_{3,\lambda}$ sistemático	<2	
T_J	20	
λ_{LED}	0,04	
λ_{Lser}	-	
$(\delta F_v)/F_v$		34-44 %

A continuación se puede observar la comparación entre la señal corregida de incandescencia inducida por láser (SLII') y LOSA. Hay que recalcar que como se vió en el capitulo anterior el aporte a la simetría la agrega la corrección de atenuación, es decir el coeficiente de absorción. Con las respectivas barras de error, considerando un error del 34 %.

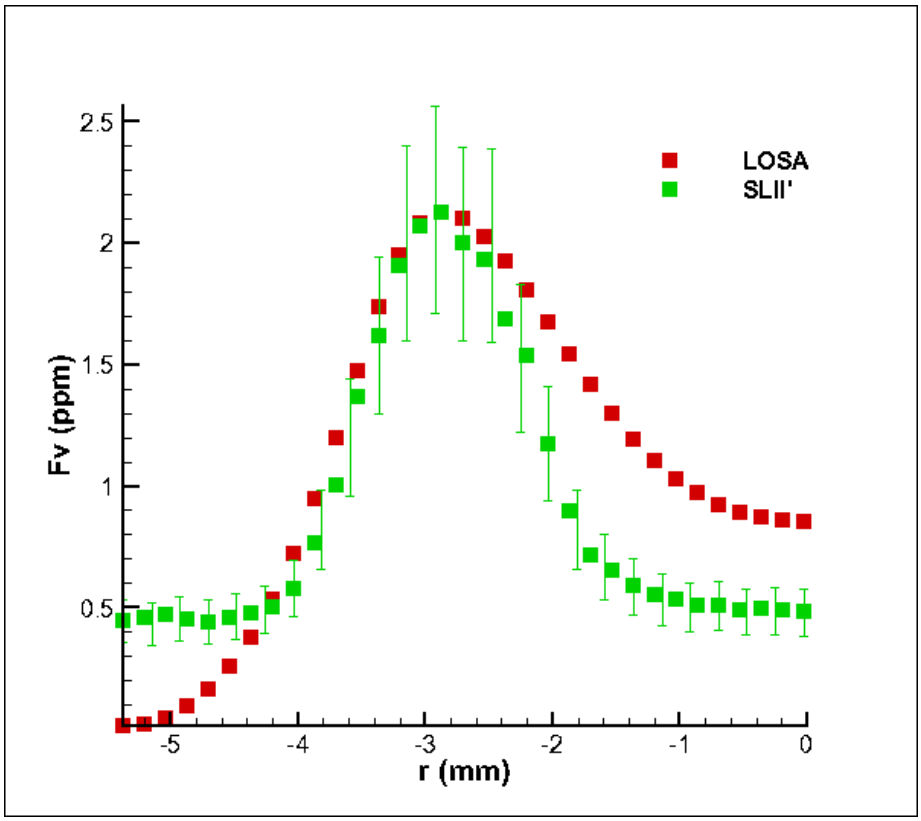

Figura 7.5: Curvas reflejan a la señal de incandescencia inducida y la atenuación de señal por luz, incluyendo barras de error para técnica LII.

Bibliografía

Axelsson, B., Collin, R., and Bengtsson, P.-E. (2001). Laser-induced incandescence for soot particle size and volume fraction measurements using on-line extinction calibration. *Applied Physics B*, 72(3):367–372. 4

Bartok, W. and Sarofim, A. F. (1991). Fossil fuel combustion: a source book. 3.2

Bengtsson, P.-E. and Aldén, M. (1988). Soot particle measurements in premixed ethylene flames using a pulsed laser method. *Journal of Aerosol Science*, 19(7):959–962. 4

Bengtsson, P.-E. and Aldén, M. (1995). Soot-visualization strategies using laser techniques. *Applied Physics B*. 4.1.1

Bladh, H. and Bengtsson, P.-E. (2004). Characteristics of laser-induced incandescence from soot in studies of a time-dependent heat-and mass-transfer model. *Applied Physics B*, 78(2):241–248. 3.3

Dasch, C. J. (1984a). Continuous-wave probe laser investigation of laser vaporization of small soot particles in a flame. *Applied optics*, 23(13):2209–2215. 3.3, 4.1.1

Dasch, C. J. (1984b). Spatially resolved soot-absorption measurements in flames using laser vaporization of particles. *Optics letters*, 9(6):214–216. 3.3

Dec, J. E. (1992). Soot distribution in a di diesel engine using 2-d imaging of laser-induced incandescence, elastic scattering, and flame luminosity. Technical report, SAE Technical Paper. 4.1.1

Dockery, D. and Pope, A. (1996). Epidemiology of acute health effects: summary of time-series studies. 1

Eckbreth, A. C. (1977). Effects of laser-modulated particulate incandescence on raman scattering diagnostics. *Journal of Applied Physics*, 48(11):4473–4479. 3.3

Fenimore, C. and Jones, G. (1969). Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames. *Combustion and Flame*, 13(3):303–310. 3.2

Frenklach, M., Clary, D. W., Gardiner, W. C., and Stein, S. E. (1985). Detailed kinetic modeling of soot formation in shock-tube pyrolysis of acetylene. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 20, pages 887–901. Elsevier. 3.2

Fuentes, A., Legros, G., El-Rabii, H., Vantelon, J.-P., Joulain, P., and Torero, J. (2007). Laser-induced incandescence calibration in a three-dimensional laminar diffusion flame. *Experiments in Fluids*, 43(6):939–948. 7.1, 7.1

Glassman, I. and Yaccarino, P. (1981). The temperature effect in sooting diffusion flames. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 18, pages 1175–1183. Elsevier. 3.2

Habib, Z. and Vervisch, P. (1988). On the refractive index of soot at flame temperature. *Combustion science and technology*, 59(4-6):261–274. 7.1

Haynes, B. S. and Wagner, H. G. (1981). Soot formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 7(4):229–273. 3.2

Heines, T. and Peters, L. (1973). *The effect of a horizontal impervious layer caused by a temperature inversion aloft on the dispersion of pollutants in the atmosphere*. 1

Heywood, J. B. et al. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*, volume 930. Mcgraw-hill New York. 3.2

Hofeldt, D. L. (1993). Real-time soot concentration measurement technique for engine exhaust streams. Technical report, SAE Technical Paper. 3.3

Kohse-Höinghaus, K. and Jeffries, J. B. (2002). Applied combustion diagnostics. 4.1, 4.1.1, 5.1

Legros, G., Joulain, P., Vantelon, J.-P., Fuentes, A., Bertheau, D., and Torero, J. L. (2006). Soot volume fraction measurements in a three-dimensional laminar diffusion flame established in microgravity. *Combustion science and technology*, 178(5):813–835. 6.2

McLintock, I. S. (1968). The effect of various diluents on soot production in laminar ethylene diffusion flames. *Combustion and Flame*, 12(3):217–225. 3.1

Melton, L. A. (1984). Soot diagnostics based on laser heating. *Applied optics*, 23(13):2201–2208. 3.3, 4

Nagle, J. and Strickland-Constable, R. (1962). Oxidation of carbon between 1000-2000 c. In *Proceedings of the fifth carbon conference*, volume 1, page 154. Pergamon Oxford. 3.2

Ni, T., Pinson, J., Gupta, S., and Santoro, R. (1995). Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence. *Applied Optics*, 34(30):7083–7091. 4

Palmer, H. B. and Cullis, C. F. (1965). The formation of carbon from gases. *Chemistry and physics of carbon*, 1:265–325. 3.2

Pastor, J., Garcia, J., Pastor, J., and Buitrago, J. (2006). Analysis of calibration techniques for laser-induced incandescence measurements in flames. *Measurement Science and Technology*, 17(12):3279. 6.1, 7

Pope, C. A., Verrier, R. L., Lovett, E. G., Larson, A. C., Raizenne, M. E., Kanner, R. E., Schwartz, J., Villegas, G. M., Gold, D. R., and Dockery, D. W. (1999). *Heart rate variability associated with particulate air pollution*. 1

Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., and Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9):1132–1141. 1

Quay, B., Lee, T.-W., Ni, T., and Santoro, R. (1994). Spatially resolved measurements of soot volume fraction using laser-induced incandescence. *Combustion and Flame*, 97(3-4):384–392. 4

Savel'ev, A., Starik, A., Titova, N., and Favorskiĭ (2008). Features of the formation of charged and neutral nanoparticles in hydrocarbon-air flames. *Doklady Physics*, 53(6):312–317. 5.3

Schraml, S., Heimgärtner, C., Will, S., Leipertz, A., and Hemm, A. (2000). Application of a new soot sensor for exhaust emission control based on time resolved laser induced incandescence (tire-lii). Technical report, SAE Technical Paper. 4.1.1

Schraml, S., Will, S., and Leipertz, A. (1999). Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of a di diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (tire-lii). Technical report, SAE Technical Paper. 3.2

Schwartz, J. (1994). What are people dying of on high air pollution days? *Environmental research*, 64(1):26–35. 1

Shaddix, C. R., Harrington, J. E., and Smyth, K. C. (1994). Quantitative measurements of enhanced soot production in a flickering methane/air diffusion flame. *Combustion and Flame*, 99(3):723–732. 4

Shaddix, C. R. and Smyth, K. C. (1996). Laser-induced incandescence measurements of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flames. *Combustion and Flame*, 107(4):418–452. 4.1.1

Showry, K. B. (2015). Soot processes in diesel engines–review. *IPASJ IJME*, 3(4):1–9. 3.2

Smallwood, G. J., Clavel, D., Gareau, D., Sawchuk, R. A., Snelling, D. R., Witze, P. O., Axelsson, B., Bachalo, W. D., and Gülder, Ö. L. (2002). Concurrent quantitative laser-induced incandescence and smps measurements of egr effects on particulate emissions from a tdi diesel engine. 3.3.1.3, 5.1

Smith, G. W. (1982). Kinetic aspects of diesel soot coagulation. Technical report, SAE Technical Paper. 3.2

Snelling, D. R., Smallwood, G. J., Gülder, Ö. L., Bachalo, W. D., and Sankar, S. (2000). Soot volume fraction characterization using the laser-induced incandescence detection method. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon*. 3.3, 3.3.1.3

Tree, D. R. and Svensson, K. I. (2007). Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3):272–309. 3.2