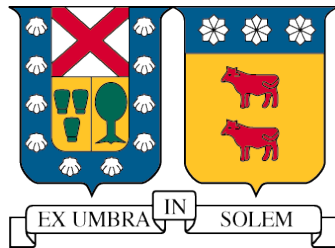


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“DETERMINACIÓN DE LA FRACCIÓN EN
VOLUMEN DE HOLLÍN EN UNA LLAMA DE
DIFUSIÓN LAMINAR AXISIMÉTRICA”**

ANDREA SARA FERNANDA TAPIA FUENTES

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OBTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESORES GUÍA: Dr. Ing. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. ANDRÉS FUENTES**

NOVIEMBRE – 2011

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mis padres, Erika y Orlando, y hermanas, Erika y Carolina, las personas más importantes que me acompañaron durante este largo proceso, el cual sin su apoyo, confianza y cariño incondicional no hubiese podido terminar de esta manera.

Quiero expresar un agradecimiento especial a Daniela, Jorge, Verónica, personas que sin ser de mi familia me regalaron ese cariño tan importante cuando se está lejos. También agradecer a mis amigos que me acompañaron en distintos momentos, Julio, América, Marco, Daniela, Humberto, Angel, Leandro, Christopher, Angeles, Rodrigo, Valeska, Sergio.

Agradezco también al profesor Andrés Fuentes por darme la oportunidad y la confianza para trabajar con él y poder realizar este trabajo y a Raúl por su gran ayuda durante la realización de este proyecto.

Índice General

Agradecimientos	III
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas.....	XII
Resumen	XIII
Abstract	XV
Nomenclatura.....	XVII
1. Introducción	1
1.1. Objetivos.....	1
1.1.1.Objetivo General.....	1
1.1.1.Objetivos Específicos	2
1.2. Biocombustibles Sólidos	2
1.3. Pirólisis	6
1.4. Llama de Difusión Laminar.....	8
1.5. Producción del Hollín	8

2. Desarrollo del Dispositivo Experimental	10
2.1. Rack	11
2.1.1. Diseño Rack	12
2.2. Quemadores	15
2.2.1. Diseño y Construcción de los Quemadores	15
2.2.2. Quemador Gülder	17
2.2.3. Quemador Santoro	19
2.2.4. Quemador Inverso	20
2.3. Sistema de alimentación de gases	21
2.3.1. Oxidante	22
2.3.1.1. Regulador de presión	23
2.3.1.1. Flujómetro	24
2.3.2. Combustible	25
2.3.2.1. Regulador de presión	26
3. Diagnostico Óptico y Metodología Experimental	28
3.1 Determinación de la fracción en volumen de hollín (f_{soot})	28
3.1.1 Modelo Teórico	29
3.1.1.1. Laser Extinción (LE)	29
3.1.1.2. Absorción/Emisión Modulada (MAE)	30
3.1.1.3. Fracción en volumen de hollín	31
3.1.1.4. Función de absorción	32
3.1.1.5. Deconvolución	33
3.1.2. Implementación del Arreglo Experimental	35
3.1.2.1. Fuente	36
3.1.2.2. Modulación y Sincronización	37
3.1.2.3. Materialización del rayo expandido	38

3.1.2.4. Cámara	39
4. Análisis de Resultado	41
4.1. Dispositivo Experimental	41
4.1.1. Laser y Beam Expander	41
4.1.2. Alimentación de combustible y oxidante	42
4.1.3 Cámara CCD	43
4.1.4. Modulación y sincronización	44
4.2. Llamas de difusión laminar	44
4.2.1. Quemadores	45
4.2.2. Tratamiento de Imágenes	46
4.2.2.1. Adquisición Imágenes	46
4.2.2.2. Factor de calibración	48
4.2.2.3. Campo de Hollín	49
4.3. Discusión de resultados	53
5. Conclusiones y Perspectiva	55
5.1. Conclusiones	55
5.2. Perspectivas	56
Bibliografía.....	58
A. Fichas Técnicas	61
A.1. Laser	62
A.2. Flujómetro	64
A.3. Trigger	66
A.4. Beam Expander	67
A.5. Cámara CCD	68
A.6. Filtro Bandpass	69

B. Planos Quemadores	70
B.1. Quemador Gülder	71
B.2. Quemador Santoro	74
B.3. Quemador Inverso	76
C. Código Matlab	80
D. Resultados Experimentales	89
D.1. Gráficos f_{soot} para distintas alturas	89
D.2. Gráficos f_{soot} reconstruido radialmente para distintas alturas	93

Índice de Figuras

1.1. Oferta de energía primaria para el año 2007 [4].....	4
1.2. Generación eléctrica por fuente para el año 2007 [4]	5
1.3. Distribución del consumo energético en el sector residencial [4]	5
2.1. Esquema arreglo experimental	10
2.2. Esquema rack experimental	11
2.3. Perfil de aluminio tipo Bosch	13
2.4. Elementos de sujeción y unión de perfiles Bosch	14
2.5. Seguro seagers	16
2.6. Ubicación o-rings en base del quemador	17
2.7. Soporte de quemadores	17
2.8. Quemador Gülder	18
2.9. Llama típica generada por un quemador tipo Gülder	19
2.10 Quemador Santoro	19
2.11 Llama típica generada por un quemador Santoro	20
2.12 Inyección de caudales de combustible, oxidante e inerte en un quemador Inverso	21
2.13 Llama representativa generada por el quemador Inverso	21
2.14 Esquema de las Líneas de gases	23
2.15 Regulador de presión	24
2.16 Calibración del flujómetro para el aire	25
2.17 Controlador del flujómetro	25
2.18 Calibración del flujómetro para mezcla de gases	27

3.1	Modulación de la fuente laser con la técnica LE	30
3.2	Función de absorción para diferentes longitudes de onda [12]	33
3.3	Parámetros de la inversión de Abel, en un corte transversal de la llama	34
3.4	Láser y beam expander	37
3.5	Sistema de generación de funciones escalonadas	38
3.6	Osciloscopio	38
3.7	Cámara CCD	40
3.8	Filtro Bandpass	40
4.1.	S y S^0	47
4.2.	I_0 e I_0^0	47
4.3.	Configuración de la calibración	48
4.4.	Imágenes promedio	49
4.5.	Imágenes promedio con binning	50
4.6.	Coeficiente de extinción	51
4.7.	Concentración máxima y mínima de f_{soot}	52
4.8.	Concentración máxima y mínima de f_{soot} reconstruido radialmente	53
4.9.	f_{soot} integrada	53
A.1.	Especificaciones Técnicas Laser	62
A.2.	Dimensiones Laser.....	62
A.3.	Especificaciones Laser	63
A.4.	Dimensiones Flujómetros	64
A.5.	Hoja de datos flujómetros	65
A.6.	Especificaciones Trigger	66
A.7.	Dimensiones Trigger.	66
A.8.	Dimensiones Beam Expander.....	67
A.9.	Especificaciones Generales Beam Expander	67

A.10 Respuesta Espectral	68
A.11 Dimensiones Cámara CCD	69
A.12. Especificaciones Filtro	69
D.1. f_{soot} en h=10 mm.	89
D.2. f_{soot} en h=13 mm	89
D.3. f_{soot} en h=10 mm.	89
D.4. f_{soot} en h=19 mm	90
D.5. f_{soot} en h=22 mm	90
D.6. f_{soot} en h=25 mm	90
D.7. f_{soot} en h=28 mm	91
D.8. f_{soot} en h=31 mm	91
D.9. f_{soot} en h=34 mm	91
D.10. f_{soot} en h=37 mm	92
D.11 f_{soot} en h=40 mm	92
D.12. f_{soot} en h=43 mm	92
D.13. f_{soot} en h=46 mm	93
D.14. f_{soot} en h=49 mm	93
D.15. f_{soot} en h=52 mm	93
D.16. f_{soot} en h=55 mm	94
D.17. f_{soot} en h=58 mm	94
D.18. f_{soot} en h=61 mm	94
D.19. f_{soot} en h=64 mm	95
D.20. f_{soot} en h=67 mm	95
D.21. f_{soot} reconstruido radialmente en h=10 mm	96

D.22. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=13$ mm	96
D.23. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=16$ mm	97
D.24. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=19$ mm	97
D.25. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=22$ mm	97
D.26. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=25$ mm	98
D.27. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=28$ mm	98
D.28. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=31$ mm	98
D.29. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=34$ mm	99
D.30. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=37$ mm	99
D.31. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=40$ mm	99
D.32. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=43$ mm	100
D.33. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=46$ mm	100
D.34. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=49$ mm	100
D.35. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=52$ mm	101
D.36. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=55$ mm	101
D.37. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=58$ mm	101
D.38. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=61$ mm	102
D.39. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=64$ mm	102
D.40. f_{soot} reconstruido radialmente en $h=67$ mm	102

Índice de Tablas

1.1. Superficie cubierta por plantaciones en Chile de la V y la XI región [3].....	4
2.1. Comparacion entre los diferentes tipos de quemadores	10
2.2. Caracterización de los gases pirolisados para tres especies de pino, en ppm [9]	11
4.1. Condiciones de flujos para los quemadores Gülder y Santoro	47

Resumen

Este trabajo se enmarca en el proyecto Fondecyt N 1100913 llamado “Soot Production in a Laminar Diffusion Flame: Application for Non-Conventional Fuels”. El objetivo principal es la implementación y validación del arreglo experimental para el primer diagnóstico óptico, “laser extincion” (LE).

Para poder realizar esto primero se desarrolló el diseño y la implementación del dispositivo experimental, el cual consta de cuatro partes principales:

- **Rack**
- **Diagnóstico óptico**
- **Línea de gases** (oxidante y combustible)
- **Quemadores**
 - Gülder
 - Santoro
 - Inverso

Una vez realizado el montaje y la calibración de los equipos se realizan las pruebas para la validación del dispositivo. Se realizan la adquisición de imágenes para realizar los cálculos de f_{soot} , f_{soot} reconstruida radialmente y f_{soot} integrada, a través de un código desarrollado que permite realizar el tratamiento de las imágenes obtenidas y la implementación de los modelos teóricos. Estos resultados se comparan con los datos existentes en la literatura.

Al realizar esta comparación se obtuvieron buenos resultados. En el caso de las concentraciones máximas de hollín se encuentran en la mitad de la llama más cercana a la base, esto responde a lo señalado en la literatura. Además los gráficos de f_{soot} presentan patrones de comportamiento similares a los ofrecidos por la literatura, tanto en la forma de la curva como en la simetría.

Abstract

This work is part of the project Fondecyty N 1100913 “Soot Production in a Laminar Diffusion Flame: Application for Non-Conventional Fuels”. The main aim is the implementation and validation of the experimental arrangement for the first optical diagnostic, “laser extinction” (LE).

To fulfill it was developed the design and implementation of the experimental arrangement , which consists of four main parts:

- **Rack**
- **Optical arrangement**
- **Gas supplies** (oxidant and fuel)
- **Burners**
 - Gülder
 - Santoro
 - Inverso

Once made the installation and calibration of equipment are made validation tests of the arrangement. It made image acquisition for calculation of f_{soot} , reconstructed radially f_{soot} and integrated f_{soot} through a code developed that allows treatment of the images obtained and the implementation of theoretical models. These results are compared with existing data in the literature.

When making this comparison were obtained good results. In the case of soot concentrations maximum are found in the middle of the flame closest to the base, this corresponds to what is stated in the literature. Also the fsoot graphics present patterns similar to those offered by the literature, both in the form of the curve and in symmetry.

Nomenclatura

A_λ	Coeficiente de extinción	-
E_m	Función de absorción	m^{-1}
fc	Factor de calibración	-
f_{soot}	Fracción en volumen hollín	ppm
$f_{soot,int}$	Fracción en volumen hollín integrado	ppm
h	Altura de la llama	m
i	Intensidad de la luz	u.a.
k	Parte imaginaria del índice de refracción	m^{-1}
L	Camino óptico recorrido	m
m	Índice complejo de refracción	m^{-1}
n	Parte real del índice de refracción	m^{-1}
R	Radio de la llama	m

Símbolos griegos

α	Coeficiente local de absorción espectral	m^{-1}
ϵ	Emisividad	-
θ	Angulo de deconvolución	rad
κ_λ	Coeficiente local de extinción espectral	m^{-1}
λ	Longitud de onda	m^{-1}
τ	Transmisividad	-
$\ln(\tau)$	Coeficiente de extinción	-

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Este trabajo se enmarca en el proyecto Fondecyt N 1100913 llamado “Soot Production in a Laminar Diffusion Flame: Application for Non-Conventional Fuels”, cuyo objetivo es estudiar la estructura de una llama de difusión laminar generada mediante una mezcla de gases combustibles representativos de la pirólisis, durante la descomposición térmica de biomasa vegetal. El proyecto de investigación busca caracterizar la combustión (emisiones y energía liberada) de una mezcla de combustibles gaseosos bajo distintos ambientes de oxidación. En este contexto es importante caracterizar el campo de la fracción en volumen de hollín para explorar la relación que parece existir entre la zona de reacción y la liberación de energía por radiación de la llama. Cabe destacar que esta interacción es la responsable del fenómeno local de extinción en una llama de este tipo.

La primera etapa del proyecto busca el diseño e instalación del rack experimental y finalmente la generación de llamas de difusión estándares, en un quemador axisimétrico tipo Gülder, de manera de verificar que el dispositivo experimental ofrece, por un lado resultados repetibles y por otro lado entrega datos conformes a

la literatura. Para esto se procederá a realizar una serie de experiencias con combustibles gaseosos corrientes como C_2H_4 y concentraciones de oxidantes típicas, como el aire.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseño del rack experimental (perfiles, dimensiones, líneas de gases).
- Diseño y adquisición del diagnostico óptico.
- Desarrollo y construcción de quemadores para generar diferentes tipos de llamas de difusión laminar.
- Elaboración de un programa de tratamiento de imágenes para obtener el campo de concentración de hollín al interior de la llama.
- Caracterización de la mezcla de combustibles (literatura).
- Verificación del aparato experimental mediante la comparación con datos obtenidos en la literatura.

1.2. Biocombustibles Sólidos

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de ella. La energía puede obtenerse, a través de su quema directa o de su transformación térmica para obtener otro tipo de combustibles.

Este tipo de energía es uno de las más antiguas, desde el momento que los seres humanos debieron calentarse y cocinar, el fuego, producido por la quema de ramas, pasó a ser imprescindible en sus vidas. Actualmente los principales usos de la leña, en el medio nacional, son la calefacción domiciliaria, cocción y calentamiento de agua. Su uso tiene significativas potencialidades en términos

energéticos, en la disminución de la vulnerabilidad y dependencia de nuestro suministro energético [1].

Las fuentes de biomasa son diversas e incluyen: los desechos orgánicos, los residuos agrícolas y de la silvicultura, como también las cosechas destinadas a la producción de calor, combustibles y electricidad (principalmente a través de plantaciones dendroenergética) [1].

Este trabajo se enmarca principalmente en el estudio de la combustión de biomasa vegetal tipo aserrín, agujas de pino, etc. [2]. Chile cuenta con alrededor de $2,1 \times 10^6$ ha de bosques nativos entre la V y la XI región, equivalente a una oferta sustentable de biomasa de 10 a 15 millones de metros cúbicos anuales. El potencial de residuos desde plantaciones alcanza la significativa cifra de 3 a 4 millones de toneladas, entre la V y X región [3].

Las plantaciones se encuentran distribuidas a lo largo del país y existe una diversidad vegetal importante, sin embargo, las realmente productivas y relevantes son las constituidas por: pino radiata; eucalipto, pino oregón y álamo. Estas plantaciones se distribuyen desde la Región de Valparaíso a la Región de Aysén [3]. En la tabla 1.1, se muestra la distribución de la superficie productiva de bosque nativo. El pino radiata, representa casi el 70 % de toda la superficie, y por esta razón que esta especie recibe una especial atención durante este trabajo.

En Chile los biocombustibles sólidos son una forma de energía altamente presente en la matriz energética, en efecto el 2007 ya representaba aproximadamente el 19 % del consumo de energía primaria de la matriz energética de Chile y con participación menor en la generación eléctrica, como se muestra en las figuras 1.1 y 1.2 [4].

Sin embargo en el sector residencial el panorama es muy distinto, el uso de la leña, tiene una gran participación, cercana al 60 % constituyendo la base del consumo energético de este sector. En la figura 1.3 se muestra el detalle del consumo del sector residencial [4]. Sin embargo, aún este número no refleja totalmente la realidad chilena, ya que existe un mercado informal de abastecimiento y consumo

Tabla 1.1: Superficie cubierta por plantaciones en Chile de la V y la XI región [3].

Especies	Superficie ha	Porcentaje
Pino radiata	1.408.430	67,76 %
Eucaliptos	489.603	23,55 %
Atriplex	58.501	2,81 %
Tamarugo	20.686	1,00 %
Pino oregón	16.459	0,79 %
Álamo	8.130	0,39 %
Schinuss molle	6.008	0,29 %
Otras especies	70.830	3,41 %
Total	2.078.647	

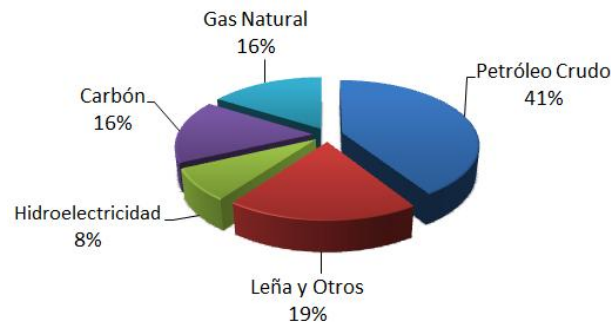


Figura 1.1: Oferta de energía primaria para el año 2007 [4].

de leña que es muy difícil de cuantificar y monitorear. Hay estudios que señalan que en algunas regiones del país, el consumo de leña puede superar fácilmente el 90 % del consumo total de energía en los hogares [1].

Los impactos ambientales asociados al consumo de leña húmeda indican que es uno de los factores más importantes en el deterioro de la calidad del aire de las principales ciudades desde la VI a la XI región y también una componente importante del conjunto de emisiones contaminantes de la RM [1]. En general la combustión de este tipo de combustible genera sustancias contami-

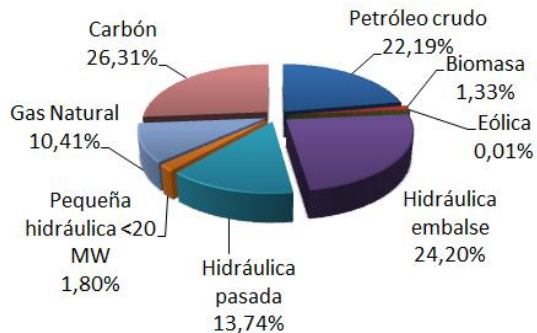


Figura 1.2: Generación eléctrica por fuente para el año 2007 [4].

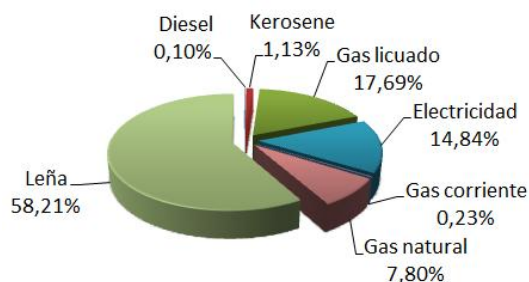


Figura 1.3: Distribución del consumo energético en el sector residencial [4].

nantes, como los Componentes Orgánicos Volátiles (COVs) y los Hidrocarburos Armónicos Policíclicos (HAPs) que producen el deterioro de la calidad del aire. Los HAPs, provienen de la combustión incompleta de la madera y los compuestos más representativos corresponden a naftaleno, antraceno y fenantreno, siendo estos hidrocarburos los más característicos del alquitrán de carbón y biomasa [5]. Además la literatura muestra que los HAPs, son los precursores de la formación del hollín [6]. Este material sólido de un tamaño correspondiente típicamente a algunos nanómetros es responsable de una buena parte del material particulado presente en el aire de la región metropolitana [1].

1.3. Pirólisis

Normalmente, la combustión es el resultado de la mezcla en proporciones adecuadas de un combustible y oxidante (normalmente oxígeno) en presencia de una fuente de calor. Como resultado de esta reacción se generan calor, luz y productos de la combustión. La generación neta de energía involucra reacciones de producción y absorción de calor, donde el calor producido es mayor al absorbido constituyendo de esta manera una reacción exotérmica.

La pirólisis se define como la descomposición térmica de una sustancia en ausencia o con una cantidad limitada de O_2 . Por efecto de la temperatura, los compuestos orgánicos son fragmentados parcialmente hacia moléculas más pequeñas e inestables [7]. La pirólisis se lleva a cabo habitualmente entre $400^{\circ}C$ y $800^{\circ}C$. A estas temperaturas los residuos se transforman en una mezcla de gases, líquidos y cenizas sólidas denominadas coque de pirólisis. Las proporciones relativas de los elementos producidos dependen de la composición de los residuos, de la temperatura, de la velocidad de calentamiento y del tiempo de residencia de los volátiles [8]. Los gases liberados en la pirólisis pueden incluir hidrocarburos, alcoholes, vapor de agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono. El desarrollo de la pirólisis define en gran medida las características y fracciones de los productos generados en los procesos secundarios.

Para que el proceso sea sustentable, es necesario que la combustión de los gases entregue el calor necesario al material para continuar con la producción de gases combustibles o volátiles. Así, el proceso puede ser un continuo circuito de retroalimentación si el material continua quemándose provocado por la propagación de la reacción. En ese caso, el calor transferido al combustible sólido genera compuestos volátiles inflamables; estos volátiles reaccionan con el oxígeno presente en el aire sobre la materia para generar calor. Una parte de este calor se transfiere de nuevo al biocombustible sólido, principalmente por radiación, manteniendo el proceso.

También, a diferencia de otras reacciones químicas, la reacción de combustión

es normalmente visible al ojo humano, gracias al humo y la llama. Las llamas se producen cuando una gran cantidad de energía liberada excita los gases presentes en la zona de reacción generando luz a diferentes longitudes de onda. El ejemplo más familiar de una llama, es probablemente la que se produce en una vela encendida. Esta clase de llama en forma de lágrima, se denomina "llama de difusión" donde el oxidante y combustible alimentan la zona de reacción por vías separadas. Esto genera que el combustible y el oxidante difundan para mezclarse y luego reaccionar. Parte de la energía visible, principalmente la naranja y la amarilla, se produce debido a partículas de hollín incandescente que se producen en la zona de reacción y que aumentan en temperatura durante la combustión. El área más roja, cerca del centro de la llama, alcanza una temperatura de 800°C. La región naranja y la amarilla, poseen mayor temperatura, alcanzando una temperatura del orden de 1400°C.

Además, algunas de las moléculas generadas por la combustión, cuando se forman, ganan considerable energía. Esta energía es absorbida por sus electrones, que luego la emiten como fotones. El resultado es el color azul visto en la base de la llama generado por la emisión de radicales tipo CH^* los cuáles emiten a una longitud de onda del orden de los 430 nm. Esto además revela que en esta región, el oxígeno se está mezclando con el combustible intensificando la reacción exotérmica.

Para la mayoría de los combustibles sólidos existe muy poca información bibliográfica respecto de la composición de los vapores liberados durante el proceso de descomposición térmica. Resultando actualmente uno de los tópicos de mayor exploración de los científicos que trabajan en este ámbito. Sin embargo, existe un gran esfuerzo por parte de la comunidad científica para tratar de caracterizar experimentalmente la pirólisis. En este trabajo se utilizará una mezcla de gases representativa del proceso de pirólisis del biocombustible para estudiar la combustión de una llama de difusión, esta mezcla ha sido estudiada previamente por Bartoli [9].

1.4. Llama de Difusión Laminar

La mayoría de las aplicaciones prácticas de la combustión corresponden a llamas de difusión turbulentas. Con esto se presenta un problema, no menor dado que el comportamiento turbulento es difícil de estudiar debido a la inestabilidad, distorsión, tiempo límite disponible de residencia y la resolución espacial en las regiones donde son importantes los procesos de transporte y las reacciones de la llama. Para evitar estos problemas, se decidió utilizar una llama de difusión laminar. Esta elección se debe a que este tipo de llamas permite estudiar detalladamente la zona de reacción y los fenómenos asociados a la combustión. La elección anterior se basa en el concepto de flamellet, que permite inferir el comportamiento turbulento a partir del análisis de llamas laminares generadas en diferentes regímenes [10].

Bajo estas hipótesis, es posible estudiar y concluir información de la combustión de biocombustibles sólidos usando un simple aparato experimental, generando una llama de difusión laminar. En consecuencia, el análisis de esta llama laminar proporcionará información interesante acerca de la estructura de llama, tasa de liberación de calor y del impacto ambiental (producción de contaminación) usando un diagnóstico sofisticado y original.

1.5. Producción del Hollín

Para estudiar correctamente la distribución de la fracción en volumen de hollín en una llama de difusión, es necesario conocer como ocurre su formación y oxidación [6]. El hollín esta compuesto principalmente de carbono, existen otros elementos presentes como el oxígeno e hidrógeno pero en menores concentraciones. Se produce durante la pirólisis o la combustión de hidrocarburos. La emisión del hollín esta determinada por la competencia entre la formación y oxidación del hollín.

El paso inicial de la producción de hollín es la formación de las primeras especies aromáticas de hidrocarburos alifáticos. Las especies aromáticas crecen por la adición de otros aromáticos y pequeñas especies para formar HAPs más grandes. El continuo crecimiento de estos HAPs conduce a las partículas de hollín.

La emisión de hollín no sólo representa una pérdida de combustible, sino que también representa problemas de contaminación. Una gran variedad de moléculas de hidrocarburos pesados se encuentran absorbida sobre la superficie de las partículas de hollín. Los HAPs constituyen una fracción importante de estas especies que son conocidas por ser cancerígenas [11].

Capítulo 2

Desarrollo del dispositivo experimental

El aparato experimental esta diseñado para facilitar el desarrollo de las pruebas experimentales y poder obtener los resultados esperados, que son, en primera instancia, medir la distribución local de la concentración de las partículas de hollín al interior de la llama. La figura 2.1 muestra un esquema del arreglo experimental.

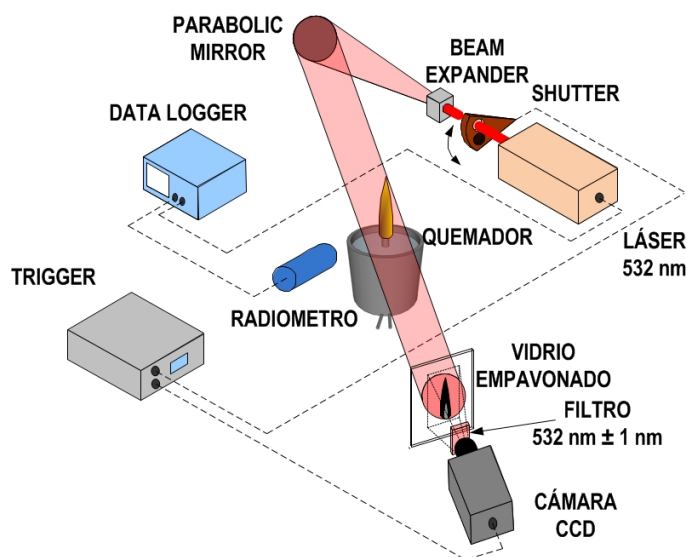


Figura 2.1: Esquema arreglo experimental.

Este arreglo se compone de cuatro partes principales, que se detallan a continuación

- Rack
- Diagnóstico óptico
- Línea de gases (oxidante y combustible)
- Quemadores

2.1. Rack

El rack experimental esta diseñado para que puedan ser montados todos los elementos de diagnóstico y medición, además para servir como mesa de trabajo, no solamente para la parte de extinción, sino para todos los diagnósticos futuros.

En la figura 2.2, se muestra el diseño final y las dimensiones del rack contemplado.

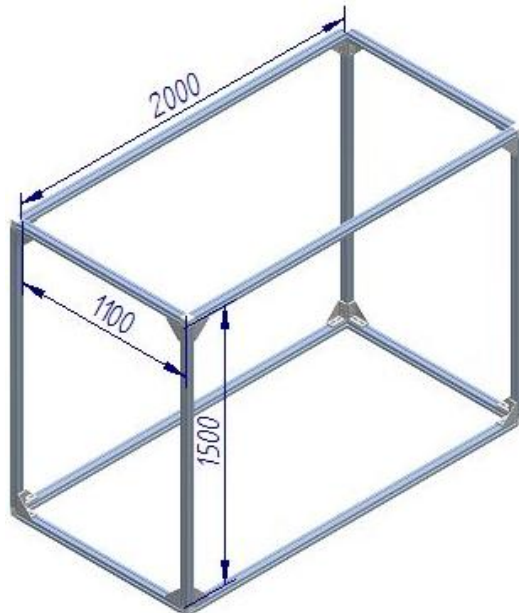


Figura 2.2: Esquema rack experimental.

2.1.1. Diseño Rack

Cabe destacar que el dispositivo fue concebido con un volumen tal que permita alojar una serie de diagnósticos previstos a través del proyecto Fondecyt, en el cual se enmarca este estudio, los cuáles se implementarán en las diversas etapas del proyecto. Estos diagnósticos son: medición de la fracción en volumen de hollín, medición de temperatura del hollín por MAE, medición de radicales libre tipo CH^* y liberación de calor. Todos estos métodos serán realizados de manera no intrusiva. Para cada una de estas mediciones se necesitan distintos equipos, los cuales deberán funcionar simultáneamente.

En efecto el diseño del rack para estos sistemas de medición presenta un desafío en sí, ya que, por una parte, se debe proyectar para soportar varios sistemas de medición que aún no han sido adquiridos y por otra parte el rack debe permitir el desplazamiento de los aparatos dentro de este.

El diseño final se logró una vez analizados el conjunto de diagnósticos mencionados anteriormente. Una revisión bibliográfica fue necesaria para cada dispositivo de manera de definir las dimensiones mínimas necesarias para soportar el arreglo final. Una vez finalizado este proceso se fijó el volumen del experimento y se procedió a la selección de perfiles del rack, los cuales debían aportar adaptabilidad y movilidad, por esto se decidió que la mejor alternativa es seleccionar perfiles acanalados, las cuales actúan como rieles, cumpliendo así con los requisitos del rack. Inicialmente se analizó la oferta de perfiles disponibles en el mercado nacional, al no encontrarse los perfiles requeridos para venta directa acá, se buscó alguna empresa que los exportara. La mejor solución encontrada fueron los perfiles de aluminio de Bosh Rexroth AG, importados desde Alemania por la empresa Maestranza Diesel. El detalle del perfil utilizado se muestra en la figura 2.3.

Ensamblar el rack con estos perfiles necesita elementos especiales de sujeción, diseñados específicamente. Estos elementos se detallan a continuación y se

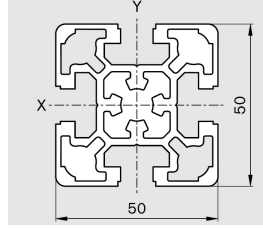


Figura 2.3: Perfil de aluminio tipo Bosch.

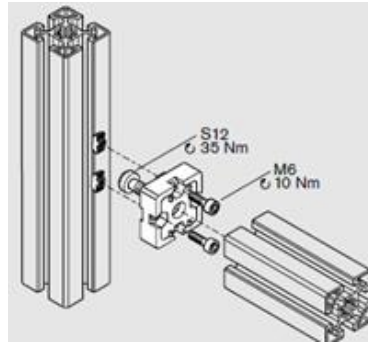
muestran en la figura 2.4.

- **Unión T:** este elemento permite agregar perfiles perpendiculares a la estructura (figura 2.4(a)).
- **Escuadra:** tiene dos funciones, sirve como refuerzo en las uniones de perfiles y además permite agregar perfiles a la estructura, de forma más rápida que la unión T, pero con menor sujeción (figura 2.4(b)).
- **Cubo unión:** sirve para unir las esquinas del rack (figura 2.4(c)).
- **Perno anclaje:** estos pernos encajan perfectamente en las ranuras del perfil, permitiendo una mayor fijación de los elementos antes mencionados (figura 2.4(d)).

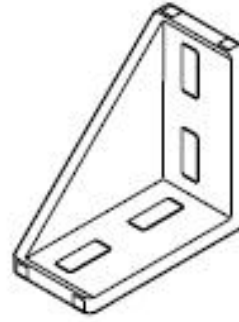
Para ensamblar los perfiles con estos elementos, especialmente las uniones T y el cubo de unión, se necesita que los extremos de los perfiles sean lo más recto posible, por esto se descartó la opción de cortarlos con sierra y se decidió fresarlos para lograr una mayor precisión, permitiendo de esta forma cumplir con requisitos geométricos y dimensionales.

Con el objetivo de visualizar mejor el diseño del rack, se modeló completamente en el programa de CAD Solid Edge¹. En este programa se diseñaron todas las piezas necesarias para la construcción en tamaño real, con escala 1:1, posteriormente se ensamblaron en un conjunto, mostrado en la figura 2.2. Este modelo sirvió como base para la compra de todos los elementos estructurales.

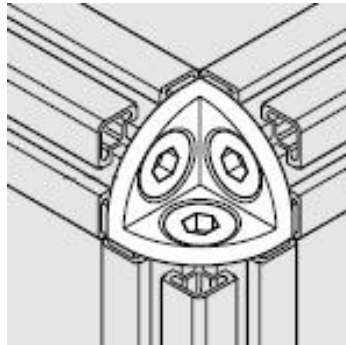
¹Versión 20, licencia académica



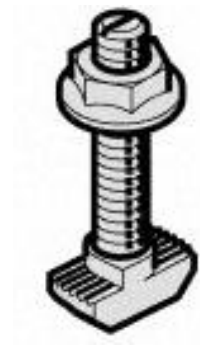
(a) Unión T.



(b) Escuadra.



(c) Cubo de unión.



(d) Perno anclaje.

Figura 2.4: Elementos de sujeción y unión de perfiles Bosch.

Como se mencionó anteriormente el rack debe albergar al menos tres sistemas de medición complejos, finalmente se obtuvieron las siguientes dimensiones para el rack: 2,00 m de largo, 1,1 m de ancho y 1,50 m de alto (ver figura 2.2).

Además el rack debe contar con una base de apoyo para soportar los elementos de trabajo, tanto de control como de medición y como mesa de trabajo. Este objetivo se cumple instalando una plataforma de aluminio de 4 mm de espesor, a una altura de 0,75 m desde la base del rack, como se aprecia en la figura 2.2.

Cabe destacar que el diseño y fabricación del rack permite un desmontaje fácil y ofrece también la posibilidad de incorporar nuevos elementos y subdivisiones para futuras modificaciones.

2.2. Quemadores

En esta parte se considera el diseño y construcción de los quemadores siguiendo las recomendaciones propuestas por la literatura. La idea es utilizar una llama bien definida y estándar usada por la comunidad científica (target flame) para realizar diversas mediciones en idénticas condiciones de operación. Para esto se concibió el diseño de tres quemadores, para ser usados en este proyecto. Los tres quemadores son del tipo de difusión laminar en configuración “coflow”. Dos de estos equipos los quemadores “Gülnder” y “Santoro” corresponden a dispositivos de dimensiones similares mientras que el quemador inverso responde a una configuración completamente diferente [12].

Así, con estos quemadores se logran llamas estándares usando condiciones de operación comparables con las especificadas en la literatura. En la tabla 2.1, se detallan las diferencias de construcción y operación de estos tres quemadores [12].

2.2.1. Diseño y Construcción de los Quemadores

Los quemadores fueron diseñados según la literatura y modelados en Solid Edge. Con estos planos (ver Anexo B) fue encargada su construcción donde el material principalmente utilizado es aluminio.

Cabe destacar que la base que se utilizó fue la misma para los quemadores Gülnder y Santoro, a pesar de tener distintos diámetros el cuerpo superior, dado que esto no afecta el funcionamiento de los quemadores. Otra modificación que se realizó a estos quemadores respecto de los diseños originales, fue el suministro del oxidante. En efecto la base se diseñó con cuatro entradas, en vez de una, para ayudar a la homogeneización del flujo del gas comburente.

Los tres quemadores utilizan platos de distribución, cuya función es soportar los elementos que homogeneizan el flujo del gas, en el caso de los quemadores Gülnder y Santoro es el oxidante y en el Inverso es el inerte y el combustible, para fijar estos platos, se diseña un soporte sobre seguros seagers, como el mostrado

Tabla 2.1: Comparación entre los diferentes tipos de quemadores

Tipo quemador	Gülдер	Santoro	Inverso
Combustible	Etileno	Etileno	Etileno
Oxidante	Aire	Aire	Aire
Relación de equivalencia aire/combustible φ	—	—	2,1
Caudal	0,194 slm etileno	0,231 slm etileno	10 slm (mezcla aire/combustible)
Coflow (oxidante)	284 slm aire	43 slm aire	No
Dimensiones principales	$\phi=4$ in L=5,64 in	$\phi=4 \frac{1}{4}$ in L=4 $\frac{1}{2}$ in	$\phi=3 \frac{7}{8}$ in L=5 $\frac{1}{2}$ in
Posición de medición	42 mm sobre el quemador	50 mm sobre el quemador	12 mm sobre el quemador

en la figura 2.5.



Figura 2.5: Seguro seagers.

Además para una mayor seguridad se agregaron dos o'rings en la base de cada quemador para sellarla con el tubo de acero, para evitar posibles fugas, especialmente de combustible, en esta zona. La ubicación exacta de estos sellos, se muestra en la figura 2.6.

También, se diseñaron dos tipos de soporte para los quemadores, debido a las

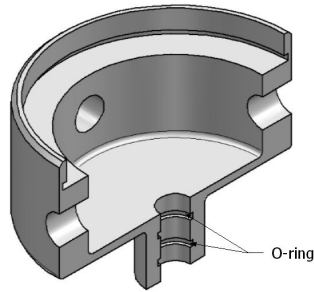
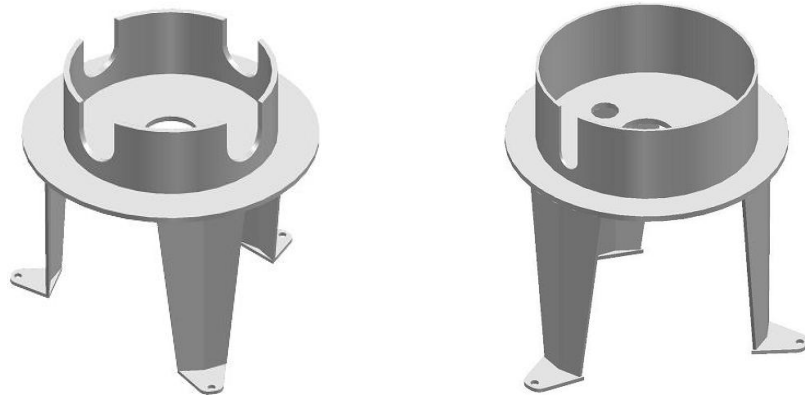


Figura 2.6: Ubicación o-rings en base del quemador.

conexiones existentes en las bases inferiores de los quemadores. Esto imposibilita el montaje directo sobre la mesa de trabajo existente, por esto se confeccionaron dos bases para los quemadores, para el Gülder y Santoro (ya que comparten la misma base) y otro para el quemador Inverso. En la figura 2.7 se muestran estos soportes.



(a) Base quemador Gülder y Santoro.

(b) Base quemador Inverso.

Figura 2.7: Soporte de quemadores.

2.2.2. Quemador Gülder

El quemador Gülder es de tipo axisimétrico, gracias a su diseño es posible generar llamas de difusión del tipo laminar. En la figura 2.8 se muestra la geo-

metría del quemador, las esferas de vidrio y el material poroso, señalados en la figura, sirven para homogeneizar el flujo de aire. Los detalles de construcción se especifican en el anexo B.1. Por otro lado, los parámetros de operación del quemador se detallan en la tabla 2.1.

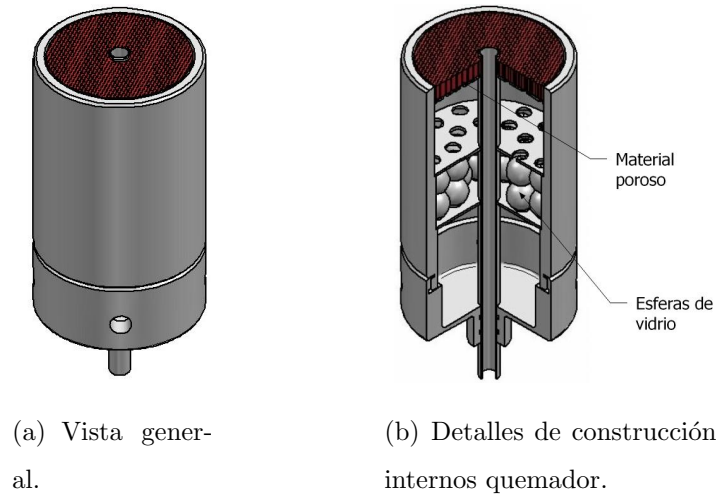


Figura 2.8: Quemador Gülder.

Las llamas generadas por el quemador, han sido estudiadas en la literatura. La figura 2.9 muestra una llama típica la cual tiene una altura visible de ~ 65 mm y la posición corriente de medición se ubica a una altura de 42 mm sobre el quemador.



Figura 2.9: Llama típica generada por un quemador tipo Gülder.

2.2.3. Quemador Santoro

Al igual que el quemador Gülder, este quemador ofrece la generación llamas de difusión en régimen laminar, también cuenta con un dispositivo poroso y un sistema que permite romper el flujo para la homogeneización del oxidante. Los detalles del quemador se muestran en la figura 2.10. Además, planos de construcción se muestran en el anexo B.2 y los detalles de operación en la tabla 2.1.

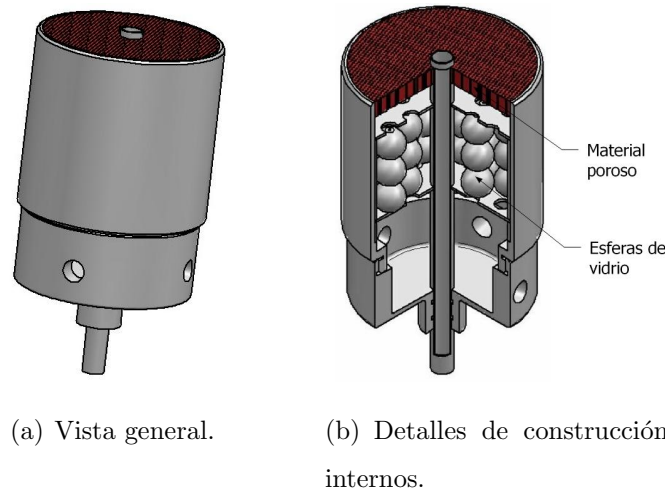


Figura 2.10: Quemador Santoro.

Cabe destacar que este quemador fue diseñado en su origen como una forma de obtener llamas con una fuerte producción de hollín que permitiera analizar la factibilidad de realizar diagnósticos ópticos no intrusivos tal como la Incandescencia Inducida por Láser (LII).

Las llamas típicas generadas por este quemador tienen una altura visible de ~ 88 mm y una posición de medición ubicada a una altura de 50 mm sobre el quemadora. En la figura 2.11 se muestra esta llama.



Figura 2.11: Llama típica generada por un quemador Santoro.

2.2.4. Quemador Inverso

Las llamas generadas por este quemador son llamas de difusión inversas (IDFs, por sus siglas en inglés) son muy similares a las generados por los otros dos quemadores, llamas normales de difusión, donde la principal diferencia es que la inyección del oxidante y el combustible se invierten. Esto genera que en lugar de inyectar combustible a un medio rico en aire, se inyecta aire en un medio rico en combustible. Esta configuración permite representar el proceso de combustión que ocurre en condiciones de reacciones confinadas con baja ventilación, donde la combustión es rica en combustible y contiene grandes cantidades de monóxido de carbono, hollín y otras especies parcialmente oxidadas. Se espera que las IDFs difieran significativamente de las llamas de difusión normales no solamente en sus características geométricas si no que además, su estructura esta controlada por mecanismos a los que aparentemente controlan las llamas de difusión normales [13]. Una característica importante es que las IDFs ofrecen la oportunidad de estudiar el hollín localmente en diversas etapas ya que al parecer la competición entre oxidación y formación del hollín se produce en tiempos característicos distintos.

El flujo de IDFs contiene principalmente un flujo de oxidante confinado por un anillo de combustible que finalmente es contenido por un gas inerte principalmente nitrógeno, para evitar posibles riesgos de acumulación de combustible, tal como se muestra en la figura 2.12

En la figura 2.13 se muestra una llama típica generada con el quemador in-

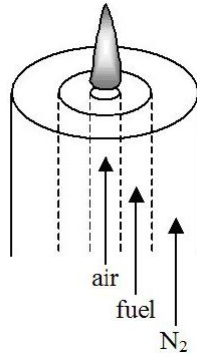


Figura 2.12: Inyección de caudales de combustible, oxidante e inerte en un quemador Inverso.

verso, con un plato de estabilización. Los detalles de operación se encuentran en la tabla 2.1.



Figura 2.13: Llama representativa generada por el quemador Inverso

2.3. Sistema de alimentación de gases

Para alimentar los quemadores se requieren de tres líneas de gases, estas se analizan a continuación:

- (a) Línea del Oxidante: esta línea se utiliza para los tres quemadores. Tiene una entrada, que en este caso se conecta directamente al cilindro, en cambio la salida debe ser adaptable y depende de cada quemador; para el quemador

Gülder y Santoro poseen cuatro entradas y en el caso del quemador inverso posee una sola.

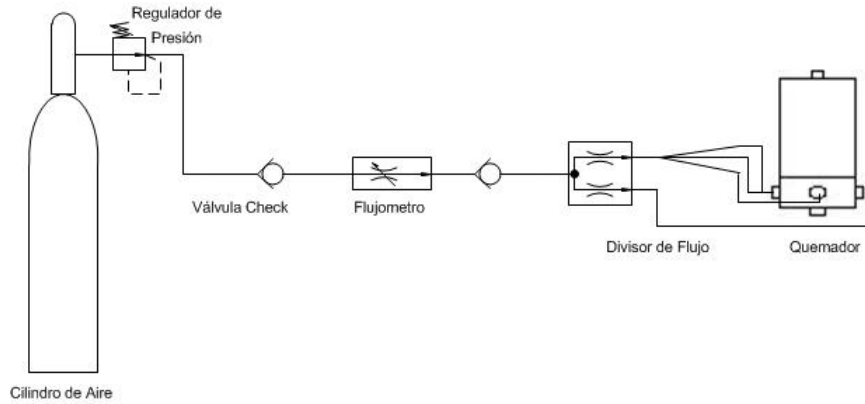
- (b) Línea del combustible: esta línea es necesaria en los tres quemadores y siempre tiene una entrada, directa desde el cilindro, y una salida. Cabe destacar que para asegurar un funcionamiento sin problemas se decidió instalar una válvulas check y de bola, en la conexión de entrada de esta línea
- (c) Línea de Inerte: esta línea se utiliza solo en el quemador Inverso y tal como se mencionó anteriormente el inerte es utilizado, como medida de seguridad, para asegurar el confinamiento del combustible durante el funcionamiento del quemador.

Las líneas de gases, deben ser tratadas con mucho cuidado de manera de entregar la mayor seguridad posible, ya que no debe existir ninguna fuga, especialmente, en la línea del combustible. Por esto se agregaron válvulas de bola y check, para evitar riesgos, además todas las conexiones se realizaron con conectores rápidos para minimizar las posibilidades de fugas.

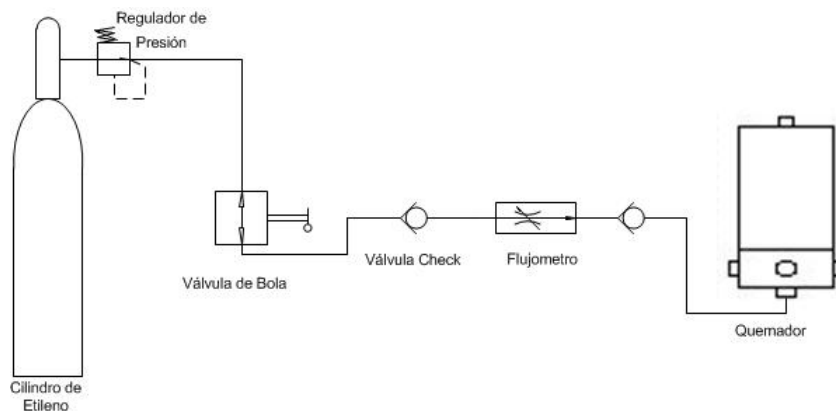
En esta parte del proyecto, solo se diseñaron las líneas del oxidante y combustible, en la figura 2.14 se muestra el esquema de estas línea de gases. La línea inerte debería ser instalada siguiendo las mismas características que posee la línea de alimentación el oxidante.

2.3.1. Oxidante

El oxidante utilizado durante este estudio fue el aire, la alimentación se realiza a través de cilindros a presión, los cuales se encuentran a 150 bar, suministrados por Indura. Los componentes principales utilizados en la alimentación del oxidante son un regulador depresión, válvula check y un flujómetro que permite controlar el caudal suministrado al quemador.



(a) Línea de Oxidante.



(b) Línea de Combustible.

Figura 2.14: Esquema de las líneas de gases.

2.3.1.1. Regulador de presión

Este dispositivo se instala a la salida del cilindro y antes del flujómetro, se utiliza debido a que la presión al interior de los cilindros es demasiado alta para el flujómetro, el cual debe trabajar a aproximadamente 2 bar. El regulador es de una etapa y posee una gran precisión y capacidad de flujo debido a su diafragma de gran diámetro. A la salida del regulador, se conecta una válvula check con conexión rápida, esta válvula tiene la capacidad de cortar el caudal a la salida del cilindro, si se desconecta la manguera. Esta válvula, en la línea del aire, se conecta por seguridad, ante eventuales fallas o retornos de flujo como una manera

de incorporar una conexión de mayor seguridad.



Figura 2.15: Regulador de presión.

2.3.1.2. Flujómetro

El flujómetro es una de las partes más importantes en la línea del aire, ya que debe entregar el flujo exacto que necesita cada quemador (ver Tabla 2.1). En este sentido se decidió por la utilización de flujómetro digitales que permiten un control y precisión respecto del caudal, se seleccionó un flujómetro marca Brooks®serie SLA5850, este es uno de los más precisos del mercado entregando un error, según el fabricante, menor al 1 % en un amplio rango de funcionamiento (ver figura 2.16).

Este aparato, debió ser diseñado especialmente para los parámetros de operación en un rango de flujo de 0 a 284 slpm con una presión de entrada de 2 bar. Este equipo posee la característica de poder controlarse mediante un dispositivo de mando especialmente diseñado, el cual se comunica digitalmente con el flujómetro mediante una conexión RS232. Particularmente en este mando se pueden ingresar manualmente los parámetros de operación, el flujo de operación, las unidades de este y el factor del gas para ajustarlo a la calibración. En la figura 2.17 se muestra el detalle de este dispositivo, la pantalla de control y el menú para cambiar los parámetros. Cabe destacar que en este equipo se pueden controlar hasta cuatro flujómetros simultáneamente.

A la salida del flujómetro se conecta otra válvula check para su protección.

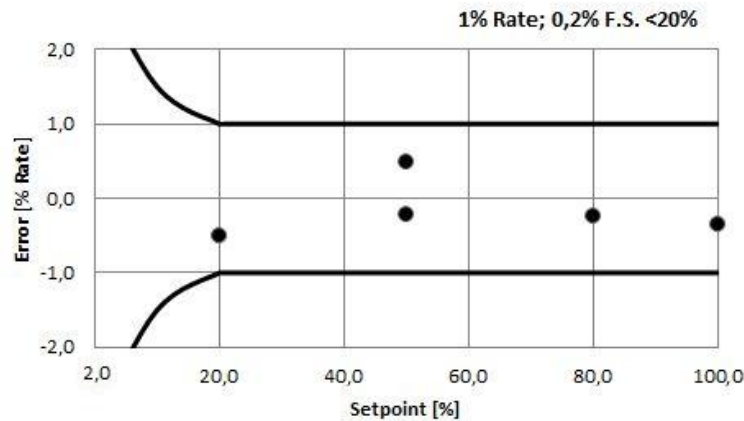
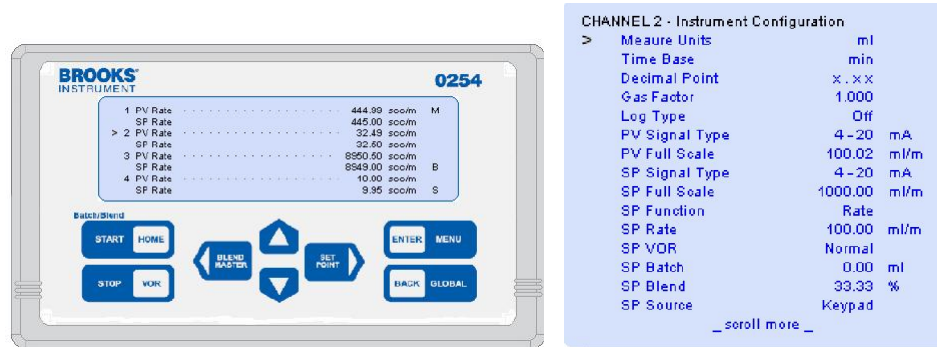


Figura 2.16: Calibración del flujómetro para el aire.



(a) Pantalla de control.

(b) Menú de configuración.

Figura 2.17: Controlador del flujómetro.

Finalmente, la línea del aire se divide en 4 líneas para alimentar las entradas del quemador (ver figura 2.14(a)).

2.3.2. Combustible

La idea de este proyecto es conocer la distribución del hollín para diferentes gases de pirólisis generados por la descomposición de la masa vegetal. La caracterización de esta mezcla de combustibles gaseosos es posible, hoy en día, usando equipos específicos. Aún varias preguntas relacionadas con la composición y evolución de los gases durante el proceso de descomposición permanecen abiertos. Sin

embargo, la literatura muestra que es posible caracterizar la concentración de los principales gases que componen la mezcla de combustible. Esta caracterización de los gases pirolisados se realizó según los resultados obtenidos por Bartoli [9] (ver tabla 2.2). La ventaja de usar esta mezcla para generar una llama de difusión es que permite disociar los fenómenos de descomposición y así centrarse solo en los procesos de combustión.

Tabla 2.2: Caracterización de los gases pirolisados para tres especies de pino, en ppm [9].

Gases	Pinus halepensis	Pinus laricio	Pinus pinaster	Promedio
CO	411,07	406,33	507,64	441,68
CH₄	140,30	147,26	143,19	143,58
C₂H₆	111,50	153,18	131,90	132,19
CHOH	99,36	110,71	107,14	105,74
C₆H₁₄	62,12	66,88	55,75	61,58
C₆H₆	21,21	33,63	34,75	29,86
C₈H₁₀	16,03	89,98	62,94	56,32

La utilización de una mezcla combustible (ver tabla 2.2) esta programada una vez que el aparato experimental muestre resultados repetibles y confiables. Por esto, en esta primera etapa, se estudió el aparato experimental con un combustible conocido, en este caso etileno (C₂H₄). Se escogió este combustible por estar bien caracterizado su comportamiento respecto a la formación del hollín.

2.3.2.1. Línea de Combustible

La línea de etileno es muy similar a la del aire. La alimentación es suministrada por un cilindro a presión, regulado a la salida, con el mismo sistema de regulador

de presión, válvula check y acople rápido. Entre esta válvula y el flujómetro se conecta una válvula de bola de dos vías de acción manual, la cual permite cortar el flujo rápidamente en caso de alguna falla. Después, se conecta el flujómetro, también digital, marca Brooks®serie SLA5850, diseñado con un rango de flujo de 0 a 231 sccm y una presión de entrada máxima de 2 bar. El dispositivo es controlado con el dispositivo electrónico descrito anteriormente. A la salida del flujómetro, se conecta una válvula check, por seguridad. Esta línea se conecta directamente a la entrada de combustible del quemador. Tal como se indicó anteriormente la selección de este tipo de dispositivo obedece a requerimientos específicos respecto del control y precisión de caudal para el combustible suministrado. En este sentido es importante mencionar que la precisión de este equipo entregada por el fabricante es menor al 1 % en amplio rango de funcionamiento. En la figura 2.18 se puede apreciar la curva de calibración de este equipo.

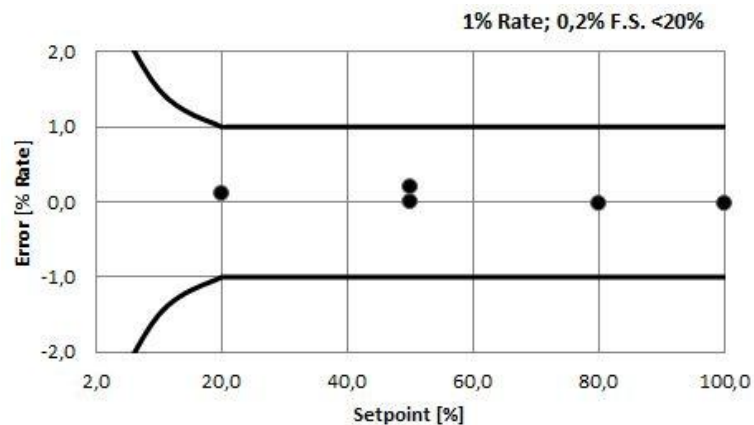


Figura 2.18: Calibración del flujómetro para mezcla de gases.

Capítulo 3

Diagnóstico Óptico y Metodología Experimental

3.1. Determinación de la fracción en volumen de hollín (f_{soot})

El método de “laser extincion” (LE) es ampliamente utilizado para medir la concentración del hollín debido a su simplicidad de operación y precisión. Varios trabajos en la literatura muestra el potencial de esta técnica como una herramienta que permite estudiar el campo de partículas generadas al interior de la zona de reacción ([6, 9, 13–15]). Básicamente, la técnica se encarga de evaluar la atenuación de un rayo monocromático que atraviesa un medio cargado de partículas. Teóricamente es posible mostrar que esta atenuación es proporcional a la f_{soot} . Además, presenta un carácter no intrusivo lo que hace de esta técnica una herramienta ampliamente aceptada por la comunidad científica que está trabajando en combustión y que se interesa en la concentración de partículas al interior de la llama.

3.1.1. Modelo Teórico

3.1.1.1. Laser Extincion (LE)

Una de las técnicas más utilizada para medir la temperatura y la fracción en volumen del hollín en llamas es la pirometría óptica, dado que ofrece respuestas rápidas y tiene la característica de ser no-intrusivo.

De acuerdo a la ley de Bouguer la extinción de la intensidad de la luz (i) a lo largo de una trayectoria desde 0 hasta L_y y paralelo al eje y , esta dada por la relación [16]:

$$\frac{i_\lambda(x, L_y, z)}{i_\lambda(x, 0, z)} = \exp\left(-\int_0^{L_y} \kappa_\lambda(x, y, z) dy\right) \quad (3.1)$$

donde $\kappa_\lambda(x, y, z)$ representa el coeficiente local de extinción espectral. La extinción esta compuesta por absorción y dispersión, pero en este caso la dispersión se considera despreciable. La ley de Bouguer queda reducida a la ecuación 3.2:

$$\frac{i_\lambda(x, L_y, z)}{i_\lambda(x, 0, z)} = \exp\left(-\int_0^{L_y} \alpha_\lambda(x, y, z) dy\right) \quad (3.2)$$

donde $\alpha_\lambda(x, y, z)$ es el coeficiente local de absorción espectral.

Las mediciones de LE pueden entregar la fracción en volumen del hollín $f_{soot}(x, y)$, si la distribución del hollín es bi-dimensional, es decir, si la f_{soot} se puede asumir uniforme en la dirección y .

El supuesto de bi-dimensional elimina la dependencia del coeficiente espectral de absorción de y , además permite inferir directamente el coeficiente local de absorción espectral $\alpha_\lambda(x, z)$ a partir de las mediciones de $A_\lambda(x, z)$:

$$\alpha_\lambda(x, z) = -\frac{1}{L_y} A_\lambda(x, z) = -\frac{1}{L_y} \log\left(\frac{i_\lambda(x, L_y, z)}{i_\lambda(x, 0, z)}\right) \quad (3.3)$$

Las variables $i_\lambda(x, L_y, z)$ e $i_\lambda(x, 0, z)$ pueden ser medidas directamente con dispositivos ópticos que serán abordados en los siguientes párrafos.

3.1.1.2. Absorción/Emisión Modulada (MAE)

Como describe Jenkins [17], la técnica de MAE consiste en mediciones de emisión y absorción a igual longitud de onda. En este trabajo, inicialmente, el láser esta modulado con una frecuencia de 1 Hz, esta frecuencia se utilizó solo para validar el arreglo experimental con las llamas producidas con etileno, con los datos disponibles en la literatura. Gracias a la estabilidad de llama producida es posible utilizar esta frecuencia tan pequeña.

La modulación permite entonces obtener las siguiente magnitudes, tal como se muestra en la figura 3.1:

- I_0 , representa la intensidad del láser, con láser encendido y sin llama
- $S=I + J$, La intensidad transmitida del láser (I) y la emisión de la llama (J), con láser encendido y con llama.
- $S'=I' + J$, la intensidad transmitida del láser (I') y la emisión de la llama (J), con láser apagado y con llama.
- I'_0 , la intensidad del láser, con láser encendido y sin llama.

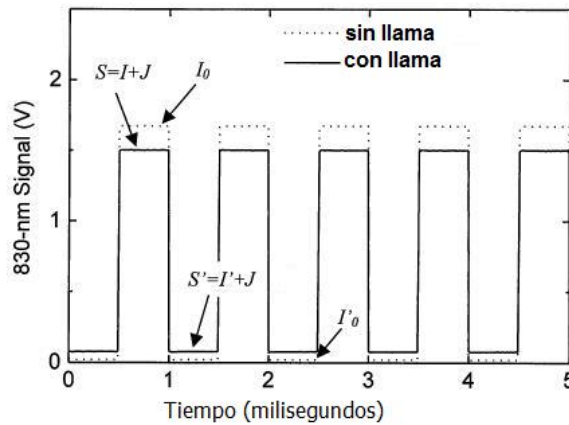


Figura 3.1: Modulación de la fuente láser con la técnica LE.

La modulación de la fuente sincronizada con el sensor, permite un control riguroso del ruido que puede generarse en la medición, principalmente a través de la emisión de la llama, a la longitud de onda de medición. De esta manera es posible reducir considerablemente el error inducido en la medición.

3.1.1.3. Fracción en volumen de hollín

La técnica MAE a un solo color permite obtener el campo de hollín, usando la relación:

$$J_\lambda(T) = \epsilon_\lambda J_\lambda^{bb}(T) \quad (3.4)$$

donde J_λ es la intensidad de la emisión monocromática del hollín, ϵ_λ es la emisividad del hollín y $J_\lambda^{bb}(T)$ es la emisión de un cuerpo negro, dada por la fórmula de Planck:

$$J_\lambda^{bb}(T) = \frac{C_1}{\lambda_5 \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (3.5)$$

donde C_1 y C_2 , son constantes.

Existen dos métodos para medir la emisividad, uno está dado por Hottel y Broughton [18]:

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \quad (3.6)$$

donde K es un factor proporcional a la concentración de hollín independiente de la longitud de onda, L es el camino óptico recorrido por el rayo láser y α es una constante empírica.

Otra forma de modelar la emisividad es según la teoría de Rayleigh:

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{F_\lambda}{\lambda} f_{soot} L\right) \quad (3.7)$$

Donde F_λ esta dado por:

$$F_\lambda = \frac{36\pi nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2} \quad (3.8)$$

f_{soot} representa la fracción en volumen y n y k son las partes reales e imaginarias, respectivamente, del índice de refracción del hollín, dependiente de la longitud de onda. Esto asume que las partículas de hollín son lo suficientemente pequeñas para que la difusión sea insignificante comparada con la absorción, hipótesis inicial de este modelo.

La fracción de luz absorbida por las partículas de hollín es igual a $1 - \tau_\lambda$, donde τ_λ es la fracción transmitida. La ley de Kirchhoff establece que la emisividad espectral de un material, ϵ_λ , es igual a la absorción, entonces:

$$\epsilon_\lambda = 1 - \tau_\lambda \quad (3.9)$$

Se utilizan las cuatro imágenes obtenidas con la técnica MAE (3.1.1.2) y τ , se puede escribir en términos de las magnitudes medibles:

$$\epsilon = 1 - \frac{S - S'}{I_0 - I'_0} \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 se reemplaza en la ecuación 3.7 y se obtiene la fracción en volumen del hollín.

3.1.1.4. Función de absorción

Uno de los parámetros de mayor interés para conocer la fracción en volumen de hollín es la función de absorción (E_m), que es función del índice de refracción complejo del hollín y de la longitud de onda y esta dado por:

$$E_m = -Im \left[\frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \right] = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2} \quad (3.11)$$

donde $m = n + ik$. Existen varios trabajos publicados donde la dependencia espectral de E_m ha sido cuantificada como una combinación de extinción y disper-

sión de la luz y la determinación gravimétrica de la concentración de hollín [12]. La literatura ofrece diversos valores para este parámetro. En general esas referencias muestran que E_m fluctúa entre $0,3 \pm 0,06$ y es aproximadamente constante en toda la región del espectro visible y cercano al infrarrojo, en la figura 3.2 se muestran estos valores.

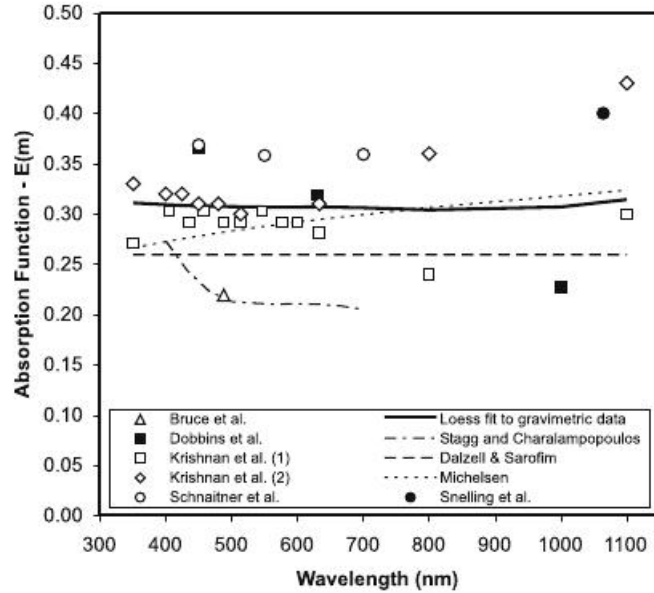


Figura 3.2: Función de absorción para diferentes longitudes de onda [12].

En este trabajo se utilizó el valor propuesto por Vander Wal [19] para una longitud de onda de 532 nm.

3.1.1.5. Deconvolución

Un problema físico a considerar es la reconstrucción de la fracción en volumen de hollín y temperatura, a partir de una sección transversal de una llama vertical, ya que al ser observada en dirección frontal, la intensidad de la radiación es integrada sobre todo el ancho de la fuente, como se muestra en la figura 3.3. Si la fuente se asume simétrica (desde el punto de vista cilíndrico) y ópticamente delgada, entonces la señal observada lateralmente puede ser transformada a un perfil

de distribución radial usando una reconstrucción tomográfica unidimensional. En este caso el método seleccionado es el algoritmo de la inversión de Abel para la deconvolución de las proyecciones de la intensidad. En el estudio de Dasch se demostró que este es el más preciso y eficiente comparado con los métodos onion-peeling y filtered backprojection [20].

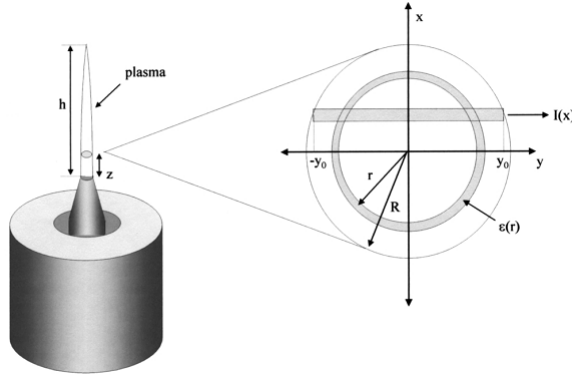


Figura 3.3: Parámetros de la inversión de Abel, en un corte transversal de la llama.

Para el caso axisimétrico, la relación entre la intensidad lateral $I(x)$ y el coeficiente radial de emisión $\epsilon(r)$, está dada por la relación de Abel:

$$I(x) = \int_{-y_0}^{y_0} \epsilon(r) dy \quad (3.12)$$

Donde y_0 es la coordenada y del eje de la llama para cada valor de x .

Entonces, la inversa de la transformada de Abel o la inversión de Abel de un sistema, entrega $\epsilon(r)$, desde valores experimentales de $I(x)$, de la forma:

$$\epsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{I'(x)}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx \quad (3.13)$$

Donde $I'(x)$ es la primera derivada de $I(x)$ con respecto a x , y R es el radio

de la llama.

Las mediciones entregan solo valores discretos de $I(x)$ correspondientes a posiciones laterales diferentes, entonces la ecuación 3.13 solo puede ser resuelta de manera aproximada. Existen diversos métodos para resolver el problema de la discretización de la inversión de Abel.

- **Algoritmo de la inversión de Abel:** los dos mayores problemas que tiene la inversión de Abel son la discontinuidad en $x = r$ y la dependencia de la primera derivada de $I(x)$, lo que implica suavizar los datos para eliminar las discontinuidades. Esto se puede resolver con el método de discretización de Hankel-Fourier y de Nestor-Olsen [21].

Los siguientes algoritmos son aplicados a una distribución de $2N + 1$ puntos de datos discretos de $I(x_i)$, con el eje de simetría donde $x_i = i\Delta x$ y $i = -N, \dots, 0, \dots, N$, para obtener una distribución de $\epsilon(r)$ de $N + 1$ puntos, donde $r_j = j\Delta r$ y $j = 0, \dots, N$. También $r = x$, $r_0 = x_0 = 0$ y $r_n = x_n = R$. Además Δx y Δr es la separación espacial de los datos.

El método de discretización está basado en la discretización directa de la ecuación 3.13, donde el denominador es levemente modificado para eliminar la discontinuidad en $x = r$.

$$\epsilon(r_j) = -\frac{1}{\pi} \sum_{i=j}^{N-1} \frac{I(x_{i+1}) - I(x_i)}{\sqrt{(x_i \frac{\Delta x}{2})^2 - r_j^2}} \quad (3.14)$$

3.1.2. Implementación del Arreglo Experimental

Como se mencionó anteriormente se trata de un sistema de diagnóstico no intrusivo, en la figura 2.1 se muestra el esquema de los elementos que son incorporados en el arreglo óptico. Los componentes de sistema LE son los siguientes:

- **Fuente:** esta compuesta por un Láser de 532 nm, beam expander y un lente óptico.

- **Sincronización:** compuesta por el generador de funciones escalonadas y osciloscopio.
- **Materialización:** se utiliza una pantalla difusora para obtener imágenes que puedan ser captadas por el Charged Coupled Device (CCD).
- **Cámara CCD:** dispositivo utilizado para obtener las imágenes I_0, I'_0, S, S' , indicadas en la figura 3.1.

3.1.2.1. Fuente

La selección de la fuente para implementar el método de LE combinado con la técnica MAE, corresponde a uno de los parámetros más importantes ya que de esto depende la calidad del diagnóstico. En este caso el láser utilizado es de la marca cnilaser ®, un láser de estado sólido de clase IV de 532 nm (verde), el diámetro del rayo de luz es de ~ 3 mm y tiene una divergencia < 2 mrad . Una de las características más importantes de este láser es que se trata de una fuente coherente, es decir, su longitud de onda se mantiene constante en el tiempo. Este láser tiene una potencia de salida de 1400 mW, necesaria para obtener una atenuación suficiente capaz de ser detectada por el sensor de medición, en este caso el CCD.

Una dificultad de trabajar con esta fuente, es que el diámetro del rayo generado es muy pequeño para realizar el diagnóstico óptico si se desea obtener un campo de concentración completo de la zona de reacción, como es el caso de este estudio. Entonces se decidió expandir este rayo en varias veces su diámetro inicial, de manera de cubrir completamente el volumen de la zona de reacción. Para esto se utilizó un beam expander junto con un lente, con los cuales se logra que el diámetro del rayo láser se magnifique hasta ~ 80 mm de diámetro. Cabe destacar que el beam expander posee también la característica que una vez lograda la expansión del rayo láser, la fuente expandida (más bien ahora es una especie de cilindro de luz) posea la característica de ser colimatada, es decir, prácticamente

el conjunto de rayos ahora viajan de manera paralela. Esta característica es muy importante para que toda la llama reciba la misma intensidad del rayo, ya que si los rayos no llegan paralelos no es posible efectuar adecuadamente la modulación de intensidades que se requiere con la técnica MAE.

El láser y el beam expander usados en este experimento se muestran en la figura 3.4.



Figura 3.4: Láser y beam expander.

3.1.2.2. Modulación y Sincronización

Como se explico en la sección 3.1.1.2, es necesario obtener al menos cuatro imágenes moduladas (I_0, I'_0, SyS'). Para lograr esto es necesario realizar la modulación del láser y sincronizarlo con la adquisición de imágenes.

Estas dos etapas. modulación y sincronización, se realizaron con un trigger externo de la empresa R&D Vision, el cual cuenta con 6 salidas TTL, con un voltaje de salida de 5 V, para sincronizar y modular diversos equipos a la vez, los cuales se conectan con un cable tipo BNC. Este trigger se conecta al computador a través de un puerto serial RS232 y se controla con un programa, el cual permite modular de manera independiente cada salida, es decir, cada equipo puede tener distintas frecuencias, la máxima frecuencia posible es de 200 kHz. En este caso, esto es muy útil, ya que se necesita que la frecuencia de la cámara sea el doble que la frecuencia del láser, para permitir tomar imágenes con el láser encendido y con el láser apagado simultáneamente.

Una de las salidas del trigger se conecta, a un osciloscopio digital para vi-

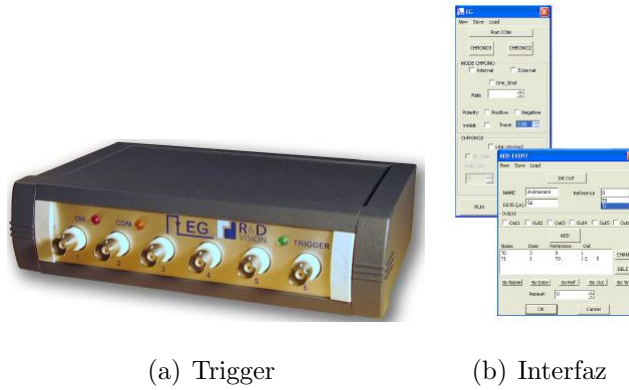


Figura 3.5: Sistema de generación de funciones escalonadas.

sualizar y controlar la señal enviada desde el trigger al láser, figura 3.6. Esta información sirve permite monitorear en tiempo real la sincronización entre las frecuencias de la cámara y láser.

El osciloscopio utilizado, es de la marca Rigol, de la serie DS1000E, tiene dos canales de adquisición de datos, esto permite monitorear las señales indicadas anteriormente.

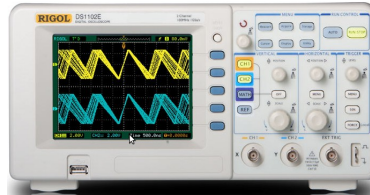


Figura 3.6: Osciloscopio.

3.1.2.3. Materialización del rayo expandido

Las imágenes necesarias para el diagnóstico LE no pueden obtenerse directamente y es necesario materializarlas, para lograr adquirir imágenes en dos dimensiones. Esto con el objetivo de captar la diferencia de intensidades y la zona de atenuación de la fuente en la zona de reacción.

Como se muestra en la figura 2.1, la materialización se produce después que el

cilindro de luz pasa a través de la llama, utilizando para esto una pantalla difusora posicionada a una distancia pertinente de la fuente y a la focal del objetivo utilizado en el CCD. Esta debe seleccionarse de tal forma que la imagen se vea nítida, por lo cual no debe ser un medio que provoque demasiada difusión y que una buena parte sea reflejada para poder ser detectada por la CCD. Para este estudio se utilizaron dos dispositivos, un vidrio empavonado especial y papel diamante. Ambos dispositivos respondieron bien a los resultados esperados, usando C_2H_6 como combustible suministrado al quemador.

3.1.2.4. Cámara

La cámara juega el rol de dispositivo de detección en este arreglo. Por esto es muy importante su selección ya que define la calidad y resolución de la imagen obtenida. Debe ser capaz de detectar los cambios de intensidad débiles y de trabajar a frecuencias del orden de 16 Hz. En este caso se utilizó una cámara Imperx monocromática, con un CCD marca SONY, completamente programable, la cual tiene una tasa de adquisición de hasta 23.1 cuadros por segundo, una resolución importante de 1392x1040 píxeles, cuenta con control digital y análogo. El objetivo (lente) de la cámara permite controlar manualmente la abertura del diafragma y la focal. El objetivo utilizado posee una $f_{xx}/0,95$ con esta focal es posible lograr un campo de visión donde la talla de un píxel del CCD representa alrededor de 1/12 mm después de la calibración. Los parámetros avanzados de operación pueden modificarse a través de un programa de adquisición, la comunicación con el computador es a través de un cable RS232. En el programa de adquisición pueden modificarse el tiempo de exposición, la ganancia, la velocidad de adquisición, entre otros.

Se seleccionó una cámara monocromática, ya que se necesita comparar las diferencias de intensidades y se trabaja con la escala de grises con una variación de niveles de 2^{16} bit parece ser adecuada para los requerimientos del experimento. Una de las ventajas de esta cámara es su tamaño pequeño, por lo que tiene un

consumo muy bajo de energía. Posee una plataforma para facilitar su montaje.



Figura 3.7: Cámara CCD

La cámara se sincroniza con el trigger, la frecuencia de modulación del diagnóstico queda limitada por la tasa de adquisición de la cámara, en este caso la cámara puede tomar un máximo de 23 fotos por segundo, por lo que la frecuencia del láser tiene que ser como máximo, el doble de este valor.

Además al objetivo de la cámara se le agrego un filtro para captar solo la luz del láser y disminuir en gran medida el ruido de las fotos. El filtro utilizado fue un 523 nm bandpass filter, 85 % transmisión, diámetro 25 mm fabricado por TECHSPEC®. En la figura 3.8 se muestra la transmisividad y el ancho de banda a media altura del filtro utilizado.

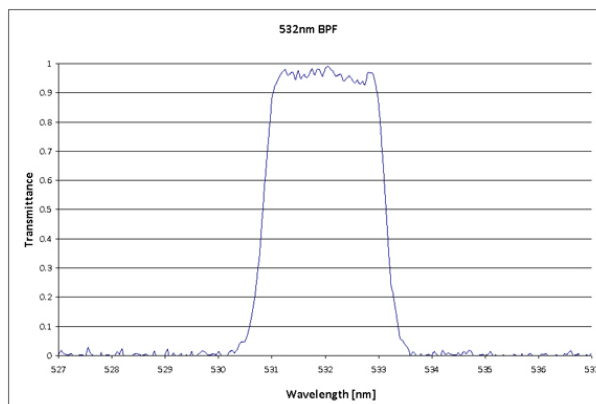


Figura 3.8: Filtro Bandpass

Capítulo 4

Análisis de Resultado

4.1. Dispositivo Experimental

4.1.1. Láser y Beam Expander

La primera calibración que se realizó fue la alineación del láser con el beam expander, el eje del rayo del láser debe coincidir exactamente con el eje del lente del beam expander. Para montar el beam expander en el rack, se debió construir una plataforma móvil, a base de perfiles y con una placa de aluminio, la cual puede desplazarse verticalmente. Esta construcción permite mover horizontalmente el beam expander. El láser se montó sobre un perfil aparte, montado directamente en el rack, esto permite moverlo horizontal y verticalmente y de forma independiente del beam expander. Teniendo los planos del láser (Anexo A.1, figura A.2) y del beam expander (Anexo A.4, figura A.8) se conoce la diferencia de altura de los respectivos ejes y ajustando los perfiles se hacen coincidir. Estando los ejes de los dos elementos a la misma altura, la alineación horizontal resulta un poco más sencilla, pero no tan precisa, ya que manualmente se hace coincidir el haz en el lente del beam expander. Esta alineación, se comprueba proyectando el haz sobre el difusor, ahí se puede analizar claramente si esta correctamente alineada.

Otro parámetro importante es la distancia del quemador con el beam ex-

pander y la pantalla. Estas distancias se seleccionaron empíricamente. Primero, para determinar la distancia del quemador con el beam expander, se dejó fija la distancia de la pantalla con el beam expander y se desplazó el quemador, desde el beam expander hacia la pantalla analizando visualmente en la pantalla la materialización de la llama, esto se repitió para distintas distancias entre la pantalla y el beam expander. Se concluyó que la posición adecuada del quemador respecto al beam expander, era que estuviesen lo más cercanos posible. Una vez fija esta primera distancia, se determina cuál es la distancia óptima entre el quemador y la pantalla. Para esto la pantalla se desplazó, aumentando y disminuyendo la distancia con el quemador y visualmente se compararon las imágenes obtenidas en el difusor.

4.1.2. Alimentación de combustible y oxidante

La segunda calibración correspondió a los flujómetros y fue una de las más complejas. Lo primero y más importante en la utilización de los flujómetros es ingresar correctamente la configuración entregada por el fabricante (Anexo A.2, figura A.5) en el menú de configuración del dispositivo de control de cada uno (figura 2.17(b)). Los parámetros que se deben ajustar son:

- **Unidades de medición:** se selecciona la unidad física del caudal, puede ser volumétrica, de presión o en porcentaje. Este parámetro se define en el diseño. En este caso el flujómetro del oxidante trabaja en litros estándar (sl) y el del combustible en centímetros cúbicos estándar (scc).
- **Tiempo base:** se selecciona la unidad de tiempo base de las mediciones. En este caso, ambos flujómetros trabajan en minutos.
- **Gas Factor:** configurar adecuadamente este valor es muy importante, ya que, con él se realiza la compensación de los flujos de salida.

- **Set Point (SP):** este valor es definido por el usuario y corresponde al flujo de trabajo requerido.
- **Process Value (PV):** es el flujo real que esta siendo entregado por el flujómetro, corresponde al flujo requerido mas el % de error.
- **Full scale PV, SP:** este valor define el rango máximo de operación.

Es muy importante que estos datos se ingresen correctamente, ya que es la única forma de asegurar que el flujo de salida y la información mostrada en pantalla, corresponde al flujo requerido.

Otro parámetro que se debe ajustar es la presión de operación, inicialmente se trabajó con el regulador completamente abierto, obteniendo 10 bar de presión en la línea. Esto solo permitió trabajar con flujos muy bajos, al empezar a aumentar el flujo, este salía en pulsos y no continuo, ya que la presión era demasiada para el dispositivo. Se comenzó a disminuir esta presión, hasta encontrar el óptimo, cuando dejara de salir flujo discontinuo en todo el rango de flujo. La presión óptima de trabajo fue de 2 bar.

En general este tipo de equipos funcionan correctamente para gases cuyas masas molares son equivalentes a la de diseño del dispositivo. En este proyecto de investigación se espera utilizar este flujómetro para aire corriente, oxígeno y nitrógeno. En consecuencia el gas factor debería corresponder a valores cercanos a 1 para cada gas.

4.1.3. Cámara CCD

Para la configuración de la cámara se utiliza el software Epix. Este software fue distribuido por la compañía que elaboró el arreglo óptico y permite el análisis y control del CCD en tiempo real, usando funciones y características complejas que permiten un ajuste adecuado del CCD para el diagnóstico LE. La cámara se fija al rack sobre la plataforma móvil en una placa de aluminio. Primero se identifica la

distancia focal mínima de la cámara. La distancia entre la pantalla y la cámara se determinó, de tal forma, que se viera un campo completo de la zona de estudio, resultando esta mayor que la distancia mínima focal, de esta forma, se fijó la posición de la cámara. Con el ajuste manual del objetivo se logró obtener una imagen nítida. Se decidió trabajar con la menor apertura posible del diafragma para asegurar una captura importante de los rayos colimatados. Una vez fijos todos estos parámetros, a través del programa de adquisición se regulan el resto de los parámetros, como la ganancia y la exposición. Finalmente, la ganancia utilizada fue la mínima posible, para no distorsionar la imagen. Se utilizó una exposición muy pequeña del orden de 0,5 ms.

4.1.4. Modulación y sincronización

Finalmente se sincroniza la modulación del láser con la adquisición de imágenes mediante el trigger externo, conectando ambos elementos en las salidas, configuradas con el software del trigger. Para lograr una adecuada sincronización, de esta forma, se prefirió trabajar con frecuencias bajas (del orden de 1 Hz). Inicialmente se hizo pulsar el láser a 0,5 Hz, esto es 1 segundo prendido y 1 segundo apagado, pero se advirtió que el láser no logra estabilizarse en ese período, así que se disminuyó la frecuencia hasta 0,2 Hz, por lo tanto, la frecuencia de la cámara se fijó en 0,4 Hz. A pesar que estas frecuencias son bajas, no afectan las mediciones, ya que al ser una llama del tipo laminar se mantiene estable en el tiempo no afectan el diagnóstico.

4.2. Llamas de difusión laminar

Como se mencionó anteriormente para este estudio es necesario generar llamas de difusión laminar, en esta sección se explica como se generaron estas llamas y la comprobación de las condiciones de operación.

4.2.1. Quemadores

En esta etapa del proyecto se utilizaron los quemadores Gülder y Santoro por la simplicidad de operación y además porque se conocen las condiciones de operación, ver tabla 2.1 y las llamas resultantes (ver sección 2.2.2 y 2.2.3). Para cada quemador se comprobaron las líneas de alimentación, homogeneización del flujo y las condiciones de operación descritas en la literatura.

Homogeneización flujo: el diseño de los quemadores contemplaba una serie de elementos (bolitas, medio poroso, figuras 2.8(b) y 2.10(b)) que permiten lograr la homogeneización del flujo de oxidante (ver sección 2.2.1). La verificación de la homogeneización se realizó al encender cada quemador. Para el quemador Santoro los elementos de homogeneización respondieron adecuadamente resultando una llama visiblemente simétrica. El quemador Gülder presentó mayores problemas ya que el orificio por donde pasa el tubo del combustible en el medio poroso tenía un diámetro mayor al diámetro del tubo, y la homogeneización del flujo no fue la adecuada. Para solucionar esto se selló la apertura entre el tubo y el medio poroso obteniendo resultados pertinentes.

Comprobación condiciones operación: para comprobar los resultados obtenidos con los disponibles en la literatura, se realizó una primera prueba con los flujos sugeridos en la literatura, mostrados en tabla 4.1.

Tabla 4.1: Condiciones de flujos para los quemadores Gülder y Santoro

Quemador	Gülder [22]	Santoro [23]
Flujo Oxidante (slm)	284	43
Flujo Combustible (slm)	0,194	0,231

Al probar estas condiciones en el quemador Gülder se obtuvieron llamas e-

quivalentes a las descritas en la literatura, en términos geométricos y de estabilización. Contrario al quemador Gülder, cuando se usaron las flujos sugeridos en la literatura en el quemador Santoro la zona de reacción presentaba un comportamiento inestable, especialmente en cola de llama. Incluso se presentó el fenómeno de flickering, recientemente estudiado por algunos equipos en Francia [24]. Esto se debe aparentemente a que la proporción de oxidante-combustible es muy pequeña, generando una combustión incompleta. Investigando en la literatura la estabilización de la llama, con las condiciones dadas, se logra agregando una chimenea sobre el quemador [12]. Esto lleva a tener resultados y condiciones de operación no repetibles ya que varían con el tipo, tamaño, altura y caudal de la chimenea añadida. Por eso en este experimento, no se utilizará este dispositivo para la estabilización de las llamas.

Disminución flickering: para disminuir este fenómeno sin agregar ningún tipo de dispositivo adicional se decidió aumentar el flujo de oxidante hasta llegar a una relación de oxidante/combustible similar a la del quemador Gülder. Con esto se logró obtener llamas laminares, aptas para realizar la experiencia.

4.2.2. Tratamiento de Imágenes

El tratamiento de imágenes se realizó con el programa Matlab. El código desarrollado se adjunta en el anexo C.

4.2.2.1. Adquisición Imágenes

Como se explicó anteriormente, para el método MAE (ver sección 3.1.1.2) se necesitan 4 imágenes, I_0 , S , S' , I'_0 . Para una mayor precisión de los resultados se trabaja con una secuencia donde se sacaron 50 imágenes para cada condición. Todas las imágenes fueron tomadas en un ambiente apropiado, solo con el láser y el quemador encendidos, cuando correspondía. Luego de realizar la calibración y sincronización explicada anteriormente (sección 4.1) se tomaron estas

imágenes con el programa Epix y fueron guardadas en formato .bmp. Primero con el quemador encendido y el láser y la cámara modulados se obtuvieron S y S' . Mostradas en la figura 4.1.

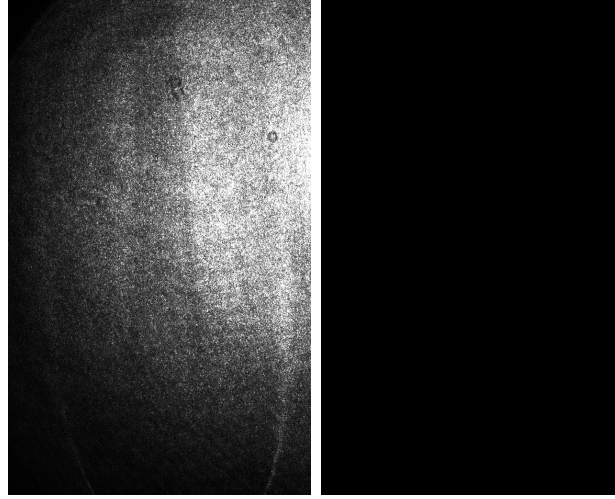


Figura 4.1: S y S'

Finalmente, con el quemador apagado y la misma modulación anterior se obtuvieron I_0 e I'_0 , mostradas en la figura 4.2.

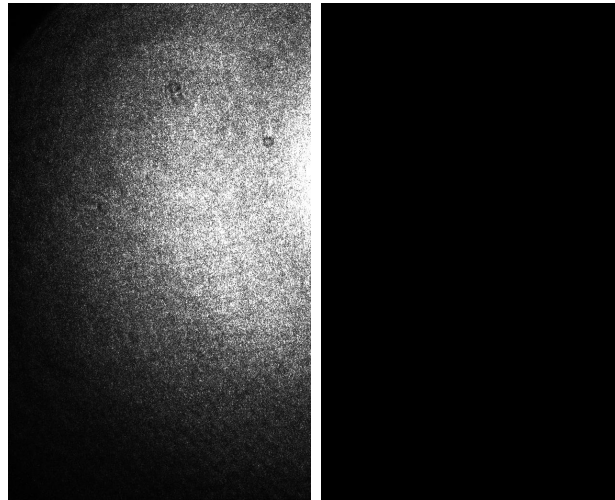


Figura 4.2: I_0 e I'_0

Se puede observar que I'_0 y S' son totalmente negras, en el caso de I'_0 es porque el láser y el quemador están apagados y en el caso S' porque la intensidad de la emisión de la llama por sí sola es muy pequeña para ser percibida por la cámara, por lo tanto, solo se detecta el cambio de intensidad del rayo del láser, I_0 y S .

4.2.2.2. Factor de calibración

Antes de realizar el tratamiento de imágenes es necesario realizar la calibración geométrica de la imagen, es decir, hacer la relación de las dimensiones reales con los píxeles de la imagen. Para esto, una vez fijas las distancias de todos los elementos, se colocó una regla en el lugar de la pantalla y se tomó una imagen sin el filtro de la cámara. En la figura 4.3 se muestra esta configuración. Con la ayuda de un programa de medición de distancias se pudo determinar el factor de calibración de las imágenes, que en este caso es de 1/12 mm/píxel, esto quiere decir que 12 píxeles representan 1 mm.

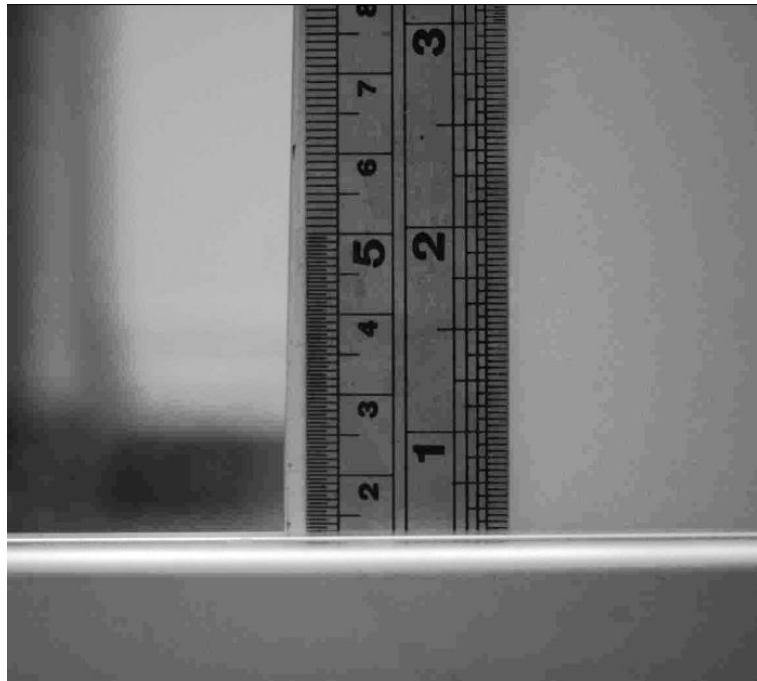


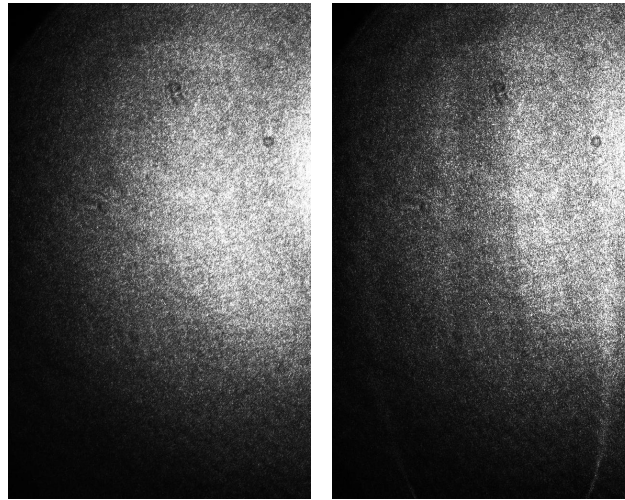
Figura 4.3: Configuración de la calibración

Cabe destacar que luego no se modificó la posición de ningún elemento, ya que esto afecta directamente este valor, además la regla debe ir en el mismo lugar donde se materializa la imagen porque de no ser así, el factor de calibración calculado no corresponde al real, dado que la pantalla se encuentra ajustada a la focal del objetivo.

4.2.2.3. Campo de Hollín

Luego de obtener estas imágenes, se les aplica el tratamiento desarrollado en Matlab para determinar el campo de hollín de la llama. Los pasos de este tratamiento se explican a continuación.

Promedio imágenes: primero, las cuatro secuencias son leídas con el comando *fullfile*. Para obtener resultados más preciso se realiza un promedio de estas imágenes, así se puede obtener mayor información de la llama. En la figura 4.4 se muestran el promedio de estas I_0 y S , se omiten las imágenes de I'_0 y S' ya que como se explico anteriormente, no entregan mayor información ya que son totalmente negras.



(a) I_0 .

(b) S .

Figura 4.4: Imágenes promedio.

Binning: al realizar el tratamiento anterior se obtienen imágenes con datos muy dispersos para mejorar esto se realiza un binning, esto es, promediar píxeles, reduciendo la imagen, para obtener resultados más homogéneos. En este caso se realizó un binning de vertical de 3X1 píxeles. En la figura 4.5 se muestran las imágenes resultantes de I_0 y S .

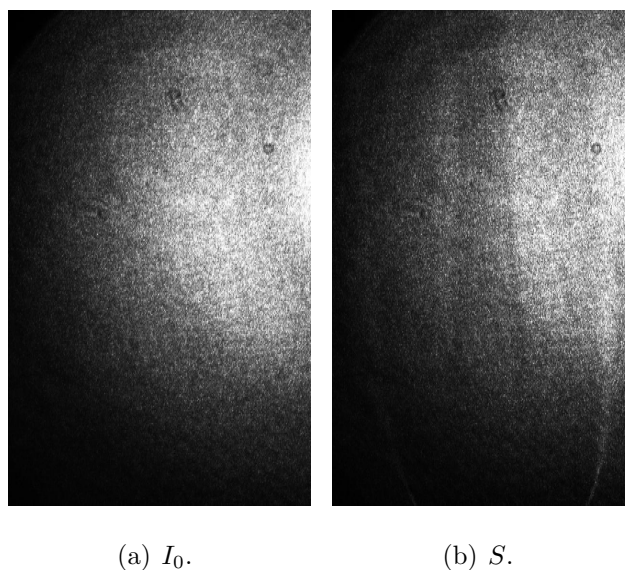


Figura 4.5: Imágenes promedio con binning.

Coefficiente de extinción: como se explico en la sección 3.1.1.3 para poder determinar la fracción en volumen de hollín se debe conocer el coeficiente de extinción. Para esto primero se calcula la transmisividad (τ), con la ecuación 3.10 usando las imágenes promedio de cada secuencia, la imagen resultante se muestra en la figura 4.6(a). Con esto se puede calcular el coeficiente de extinción, que corresponde al $\ln(\tau)$, el resultado de esta operación se muestra en la figura 4.6(b).

Función de absorción: una vez obtenido el coeficiente de extinción y con la ecuación 3.7 se calcula la fracción en volumen de hollín a distintas alturas. En este



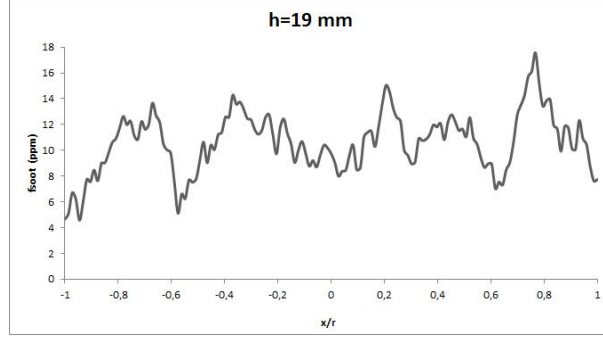
(a) τ .

(b) $\ln(\tau)$.

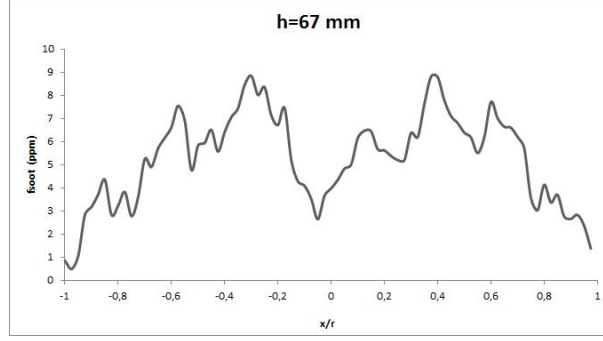
Figura 4.6: Coeficiente de extinción.

caso se realizaron 20 mediciones, cada 3 mm, partiendo a una altura de 10 mm hasta 67 mm desde la base de la llama. En la figura 4.7 se muestran dos gráficos obtenidos de las alturas donde se ubica la máxima y la mínima concentración de hollín, que son 19 y 67 mm sobre la base de llama, respectivamente. Todos los gráficos se adjuntan en el anexo D

Reconstrucción radial de la f_{soot} : una de las partes más importantes del tratamiento es la deconvolución, ya que esta entrega la reconstrucción del coeficiente de extinción a lo largo de la llama a partir de los valores integrados resultantes de los procesos anteriores. Como se explico en la sección 3.1.1.5 se utiliza la inversión de Abel, la cual resulta ser un caso particular de la inversión de Radon, por esto en el código desarrollado se utiliza el comando *iradon* para calcular la deconvolución. Con los resultados de la deconvolución se construyeron gráficos en volumen del hollín al interior de la llama. Estos se realizaron en las mismas alturas mencionadas anteriormente. En la figura 4.8 se muestran los gráficos obtenidos para las alturas de 19 y 67 mm.



(a) f_{soot} en $h=19$ mm



(b) f_{soot} en $h=67$ mm

Figura 4.7: Concentración máxima y mínima de f_{soot} .

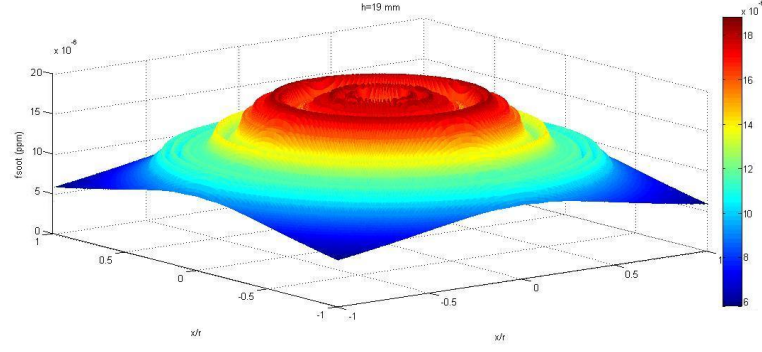
Fracción en volumen de hollín integrada: Para entender mejor la distribución del hollín en la llama se realiza una integración en toda la altura de la llama, de la forma

$$f_{soot,int} = 2\pi \int_0^r f_{soot} dr \quad (4.1)$$

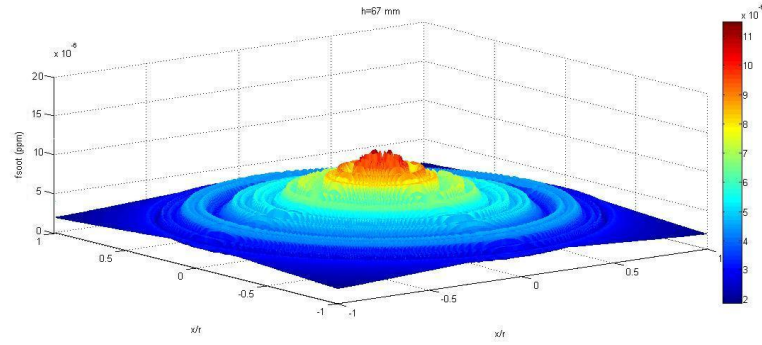
como en este caso se conocen todos los valores de f_{soot} se puede discretizar la ecuación 4.1, quedando de la forma:

$$f_{soot,int} = \pi r^2 \sum f_{soot} \quad (4.2)$$

El resultado de esta integración se muestra en la figura 4.9



(a) f_{soot} reconstruido radialmente en $h=19$ mm



(b) f_{soot} reconstruido radialmente en $h=67$ mm

Figura 4.8: Concentración máxima y mínima de f_{soot} reconstruido radialmente.

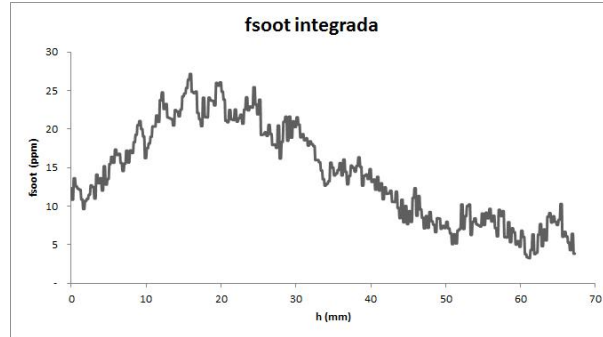


Figura 4.9: f_{soot} integrada.

4.3. Discusión de resultados

Al realizar la comparación con los datos de la literatura se puede apreciar que en la figura 4.7 se observa una curva de f_{soot} presenta la forma típica descrita y

es relativamente simétrica. Además a medida que aumenta la altura de la llama, la f_{soot} va disminuyendo, presentando las concentraciones mínimas en el último tercio de la llama y las máximas en la primera mitad de la llama.

El diseño de los quemadores obliga a una confinación de la zona de reacción, esto se verifica al analizar las curvas de f_{soot} ya que cuando el radio de la llama aumenta la f_{soot} aumenta hasta un peak luego desciende para prácticamente desaparecer, esto se debe a que la zona de reacción esta confinada. Además al trabajar con las llamas por debajo del smoke point no se observa f_{soot} fuera de la zona de reacción de la llama.

Con la deconvolución se pueden graficar la f_{soot} reconstruida radialmente en un campo 3D, esto permite visualizar el volumen donde se concentra el hollín. Estos gráficos siguen la misma distribución que los gráficos de perfiles de f_{soot} .

El gráfico de f_{soot} integrada (imagen 4.9) muestra que la mayor concentración de hollín se encuentra en la primera mitad de la llama, corroborando los resultados anteriores y además permite verificar que la llama generada es representativa de datos obtenidos en la literatura, ya que se observa el mismo comportamiento.

Capítulo 5

Conclusiones y Perspectiva

5.1. Conclusiones

Uno de los objetivos principales de este trabajo fue el diseño y la construcción de un rack experimental, aquí se puede destacar la selección de perfiles acanallados, las dimensiones finales del rack y la incorporación de una plataforma que permite soportar los distintos elementos del experimento. Otra parte importante del arreglo corresponde a los quemadores, se decidió diseñarlos de tal forma que garanticen la obtención de llamas estándares, “Target Flames”. El sistema de alimentación de gases se diseñó con un énfasis especial en la seguridad. Además se agregaron reguladores de presión y flujómetros digitales para asegurar un nivel de control del caudal con una alta precisión.

También se implementó el diagnóstico óptico llamado “Laser Extinction” que permite evaluar la fracción en volumen de partículas de hollín (f_{soot}) que se producen al interior de la zona de reacción. El diagnóstico óptico considera los siguientes elementos: un láser de 532 nm, beam expander, generador de funciones escalonadas, osciloscopio, pantalla difusora y una cámara CCD de última generación. Una de las tareas más complejas llevadas a cabo durante este estudio fue la calibración de este arreglo, ya que se debió ajustar cada dispositivo por sí solo

y luego efectuar la calibración completa del conjunto.

Finalmente, el objetivo final fue la validación de todo el dispositivo experimental con datos existentes en la literatura. Para esto, se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos en bajos diferentes condiciones de operación con los resultados obtenidos en la literatura por diversos autores, lográndose buenos resultados. Dado que se trata de un diagnóstico óptico, una tarea importante de este trabajo fue el desarrollo de códigos que permitían realizar un tratamiento de las imágenes obtenidas por el CCD, hasta la implementación de los modelos teóricos que permiten la obtención del campo de la f_{soot} y su reconstrucción tridimensional. Dentro de los resultados obtenidos se puede destacar que las máximas concentraciones de hollín encontradas fueron del orden de 17,5 y 17 ppm ubicadas a 19 y 25 mm sobre la base del quemador, respectivamente, estos resultados eran los que se esperaban, ya que la literatura señala que la mayor concentración de hollín se encuentra cercana a la base de la llama. En los gráficos de f_{soot} obtenidos se observan comportamientos comparables a los encontrados en la literatura, tales como la simetría y la forma de la curva de f_{soot} a diferentes alturas. El gráfico de f_{soot} integrada corrobora también los resultados obtenidos de la distribución del hollín al interior de la llama.

5.2. Perspectivas

El mayor desafío en la continuidad de este proyecto es el diseño y montaje de los futuros diagnósticos previstos a través del proyecto Fondecyt, mencionados anteriormente en la sección 2.1.1. En el caso de la medición de radiación el diagnóstico ya está diseñado y se encuentra en la etapa de calibración. Los demás diagnósticos aún están en etapa de diseño.

Un problema a solucionar es el montaje de los elementos del diagnóstico óptico existente, ya que en esta etapa del proyecto no se diseñaron los soportes. Estos son:

- **Cámara** para este elemento se requiere diseñar una base para montarlo sobre los perfiles. Esta base debe permitir el desplazamiento horizontal.
- **Beam expander**
- **Láser**

Otra mejora se debe realizar es reemplazar los cilindros de aire por compresores, para poder tener un suministro continuo de aire.

Además se deben diseñar, adquirir y montar los diagnósticos restantes, que son:

- Medición de radiación
- Medición de temperatura de hollín por MAE
- Medición radicales libre tipo CH^*

Bibliografía

- [1] Corporación Chile Ambiente, Análisis del potencial estratégico de la leña en la matriz energética chilena. CNE, Diciembre 2008
- [2] Fuentes Andrés, Elicer Cortés Juan. Proyecto Fondecyt “Soot Production in a Laminar Diffusion Flame: Application for Non-Conventional Fuels”. 2010
- [3] Bertran Spichiger José, Morales Verdugo Eduardo. Potencial de de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. CNE. Santiago 2008.
- [4] Palma Behnke Rodrigo, Jiménez Estévez Guillermo, Alarcón Arias Ignacio. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno. Santiago de Chile, marzo 2009
- [5] Kozínski, J.A., Saade, R. Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarobns. An experimental study. Fuel Vol.77, 225-237. 1998.
- [6] Keneddy Ian M. Models of soot formation and oxidation. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 23, pp. 95-132, 1997
- [7] Mastral, A.M., Callén, M.S., García, T. Fluidized bed combustion (FBC) of fossil and nonfossil fuels. A comparative study. Energy & Fuels Vol.14, 275:281. 2000.

- [8] Bridwater, A.V. Catalysis in thermal biomass conversion. *Applied Catalysis A: General* Vol.116, 5:47. 1994.
- [9] Bartoli p., et al., Determination of the main parameters influencing forest fuel combustion dynamics, *Fire Safety J* (2010), doi:10.1016/j. Mayo 2010.
- [10] Bilger R.W., The structure of turbulent nonpremixed flames, *Symposium (International) on Combustion*, Volume 22, Issue 1, Pages 475-488, 1989.
- [11] Pine S., Hendrickson J.B., Cram D., Hammond G.S. *Química Orgánica*. Segunda Edición, Editorial McGraw Hill. México, 1993.
- [12] Schulz C., Kock B.F, Hofmann M., Michelsen H., Will S., Bougie S., Suntz R., Smalwood G., Laser-induced incandescence: recent trends and current questions, *Appl. Phys.* B83, 333-354. 2006
- [13] Macko K.T., Mikofski M.A., Fernandez-Pello A.C., Blevins L.G., Davis R.W., "Laser Extinction in Laminar Inverse Diffusion Flames", Western States Section Fall Meeting, The Combustion Institute, Stanford, CA (USA), Oct 2005, Paper 05F-051.
- [14] Yi Xu, Chia-fon F. Lee. Forward-illumination light-extinction technique for soot measurement. *Appl Opt* Vol. 45, 95:132. 1997.
- [15] Zhao H., Ladommatos N.. Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines. *Proc energy combust Sci* Vol. 24, 221:225. 1998.
- [16] Legros G., Joulain P., Vantelon J.P., Fuentes A. Soot volume fraction measurements in a three-dimensional laminar diffusion flame established in microgravity, *Combust. Sci. and Tech.*, 178:813835. 2006.
- [17] Jenkins T. P. y Hanson R. K. Soot Pyrometry using Modulated Absorption/Emission, *Combustion and Flame* 126:1669 1679. 2001

- [18] Hottel, H. C., and Broughton, F. P., *Indust. Eng. Chem.* 4:166 175 (1932).
- [19] Vander Wal R. L., Weiland K. J., Laser-induced incandescence: Development and characterization towards a measurement of soot-volume fraction. *App. Phys. B* 59, 445-452. 1994
- [20] Dasch C.J. One-dimensional tomography a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods. *Appl Opt* 31:114652. 1992
- [21] Álvarez R, Rodero A, Quintero M. C., An Abel inversion method for radially resolved measurements in the axial injection torch, *Spectrochimica Acta Part B* 57 16651680. Julio 2002
- [22] Gülder Burner [en línea] <http://liiscience.org/05_burner_guelder>[consulta: 14 de marzo 2011]
- [23] Santoro Burner [en línea] <http://liiscience.org/05_burner_santoro>[consulta: 14 de marzo 2011]
- [24] Legros G., Gomez T., Fessard M., Gouache T., Ader T., Guibert P, Sagaut P., Torero J.L., Magnetically induced flame flickering, *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 33, Issue 1. Pages 1095:1103, 2010

Apéndice A

Fichas Técnicas

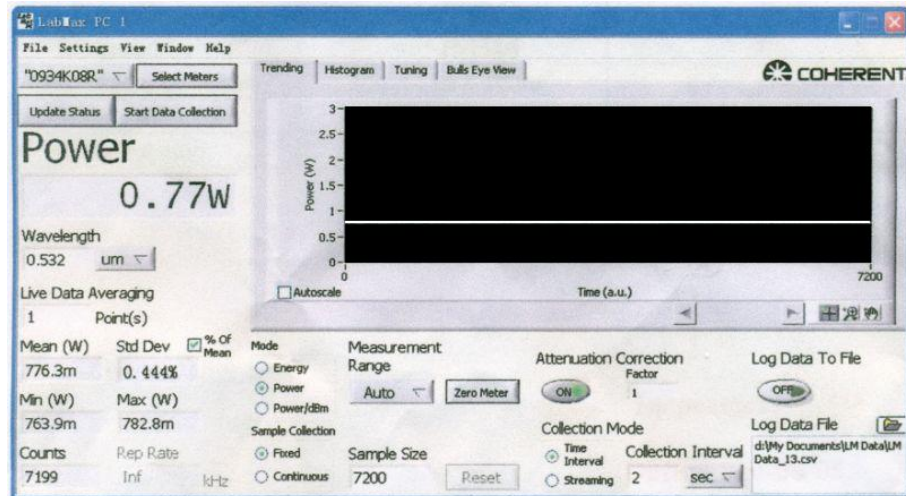
A.1. Láser

SPECIFICATIONS			
Wavelength (nm)	532 $\pm$ 1		
Output power (mW)	>500, 550, 600,...1400		
Transverse mode	Near TEM ₀₀		
Operating mode	CW		
Power stability (rms, over 4 hours)	<1%, <3%, <5%, <10%		
Warm-up time (minutes)			
M ² factor			
Beam divergence, full angle (mrad)			
Beam diameter at the aperture (mm)	~3. 0		
Beam height from base plate (mm)	29		
Polarization ratio	>100:1		
Pointing stability after warm-up (mrad)	<0.05		
Operating temperature (°C)	10~35		
Power supply (90-264VAC) P	PSU-H -LED	PSU-H-FDA	PSU-H-OEM
TTL modulation/ Analog mo	Optional, 2kHz or higher (others on request, up to 30kHz)		
Expected lifetime (hours)	10000		
Warranty period	1 year		

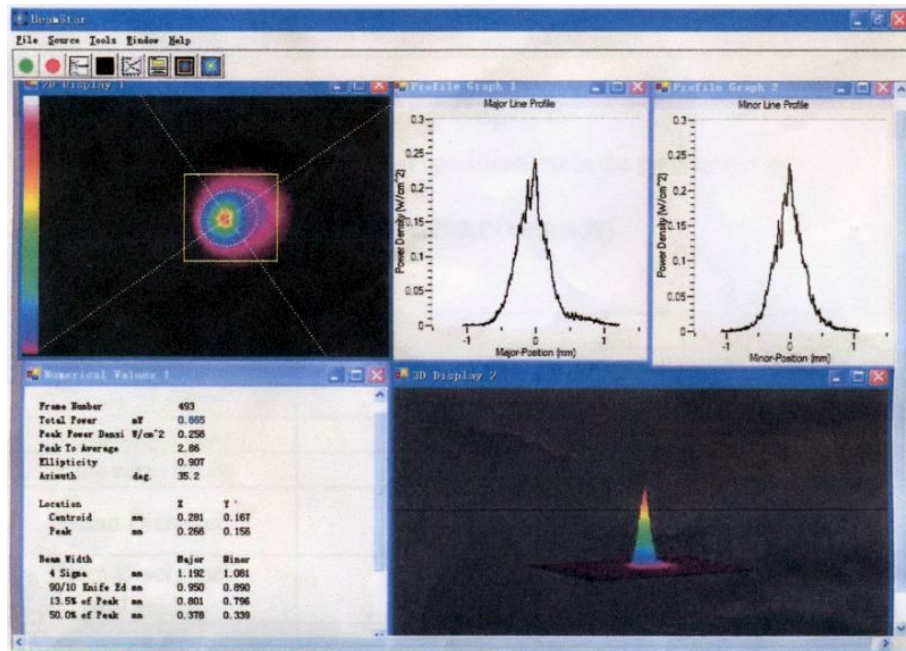
Figura A.1: Especificaciones Técnicas Láser



Figura A.2: Dimensiones Láser



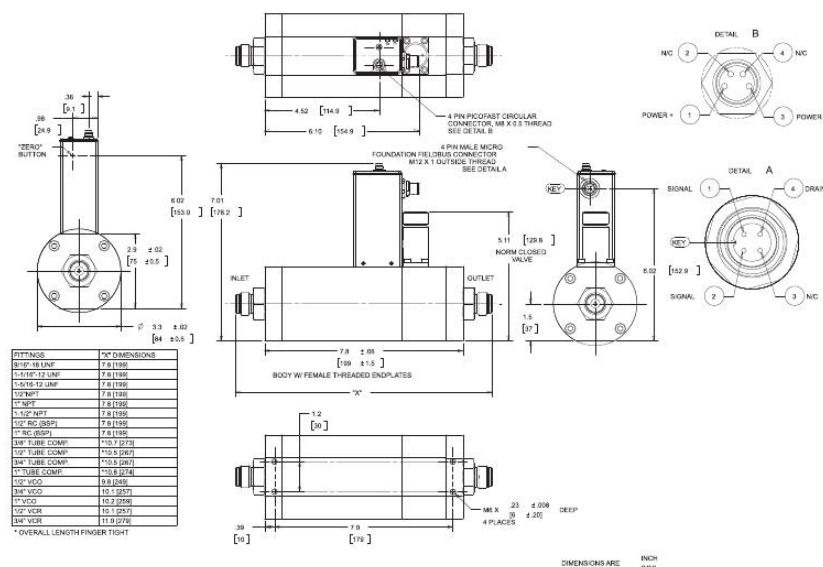
(a) Intensidad del láser



(b) Densidad del láser 2

Figura A.3: Especificaciones Láser

A.2. Flujómetro



Device Information	Calibration Information	Mechanical Information
Serial Number 0111010448598001	Calibration Inlet Pressure 14.3 PSIG	Valve Type Normally Closed (DP < 30 PSI Body Size 3)
Model Number SLA5853S2DAB3C2A1	Calibration Outlet Pressure 0 PSIG	Valve Seat Material Viton
Customer MAXCONTROL SA	Gas Conversion Factor 0.998	O-ring/Seal Material Viton
Customer Fluid Air	Calibration Fluid Nitrogen	Mounting Attitude #1 Horizontal Base Down
Full Scale Flow 284 slpm	Calibration Software/Revision DeltaCal Version 1.3.31 S	Power Supply 24 VDC
Reference Temp/Pressure 21.1 °C/760 mmHg	Calibration Location Hatfield	Reference Number 1
Customer Inlet Pressure 29.01 PSIA	Calibration System ID C-803	Alternate ID N/A
Customer Outlet Pressure 14.5 PSIA	Calibrator 1656	Calibration Notes G-383 E-638 (Hart Tag Name: 48598001, Hart Unique ID: 4859801, Hart Data Rate: 19200)
Input RS-485 4-20mA I/O (15 Pin D-Conn)	Calibration Date/Time 1/24/2011 3:13:48 PM	
Output RS-485 4-20mA I/O (15 Pin D-Conn)	Calibration Procedure CAL-060 Rev. 6	
Customer Part Number N/A	Calibration # 1 of 1	

(a) Flujiómetro Aire

Device Information	Calibration Information	Mechanical Information
Serial Number 0111010448600001	Calibration Inlet Pressure 29.01 PSIA	Valve Type Normally Closed
Model Number SLA5850SP1AB1C2A1	Calibration Outlet Pressure 15.5 PSIA	Valve Seat Material Viton
Customer Maxcontrol SA	Gas Conversion Factor 0.561	O-ring/Seal Material Viton
Customer Fluid Mixture/Other	Calibration Fluid Nitrogen	Mounting Attitude #1 Horizontal Base Down
Full Scale Flow 231 scfm	Calibration Software/Revision DeltaCal Version 1.3.31 S	Power Supply 24 VDC
Reference Temp/Pressure 21.1 °C/760 mmHg	Calibration Location Hatfield	Reference Number 1
Customer Inlet Pressure 29.01 PSIA	Calibration System ID C-191	Alternate ID N/A
Customer Outlet Pressure 15.5 PSIA	Calibrator 1702	Calibration Notes G-174 E-638 Mixture: 14.80% Methane 13.60% Ethane 56.40% Carbon Monoxide 15.20% Hexane (Hart Tag Name: 48600001, Hart Unique ID: 4860001, Hart Data Rate: 19200)
Input RS-485 4-20mA I/O (15 Pin D-Conn)	Calibration Date/Time 2/7/2011 5:03:43 PM	
Output RS-485 4-20mA I/O (15 Pin D-Conn)	Calibration Procedure CAL-060 Rev. 6	
Customer Part Number N/A	Calibration # 1 of 1	

(b) Flujiómetro Gas

Figura A.5: Hoja de datos flujómetros

A.3. Trigger

Entrées / Sorties sur BNC 1	1 entrée Trigger – 1 entrée Inhibit (inhibe le trigger) / 6 sorties TTL
Temps de transition	< 10 ns
Délai d'insertion / trigger	2 μ s
Jitter RMS / trigger	< 100 ns
Résolution (min/max) T	Temps d'attente entre 2 événements consécutifs : min 1 μ s / max 8 sec
Fonctionnalités	Déclenchement Interne / Externe / One shot
Interface PC	Inhibit du trigger
Alimentation / Consommation	Seuillage sur trigger front montant / front descendant
Dimensions (L x l x h) mm	Répétions du chronogramme (jusqu'à 65535)
Poids	Insertion d'un second chronogramme par date ou par trigger
Température fonctionnement /stockage	Logiciel de pilotage sous Windows

Figura A.6: Especificaciones Trigger

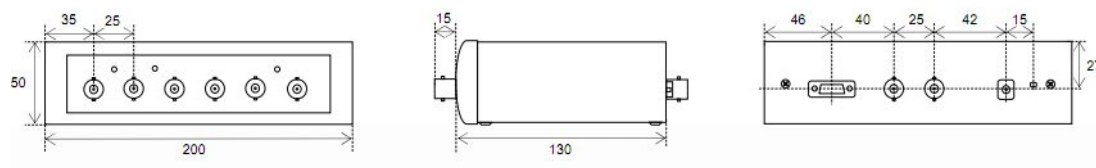


Figura A.7: Dimensiones Trigger

A.4. Beam Expander

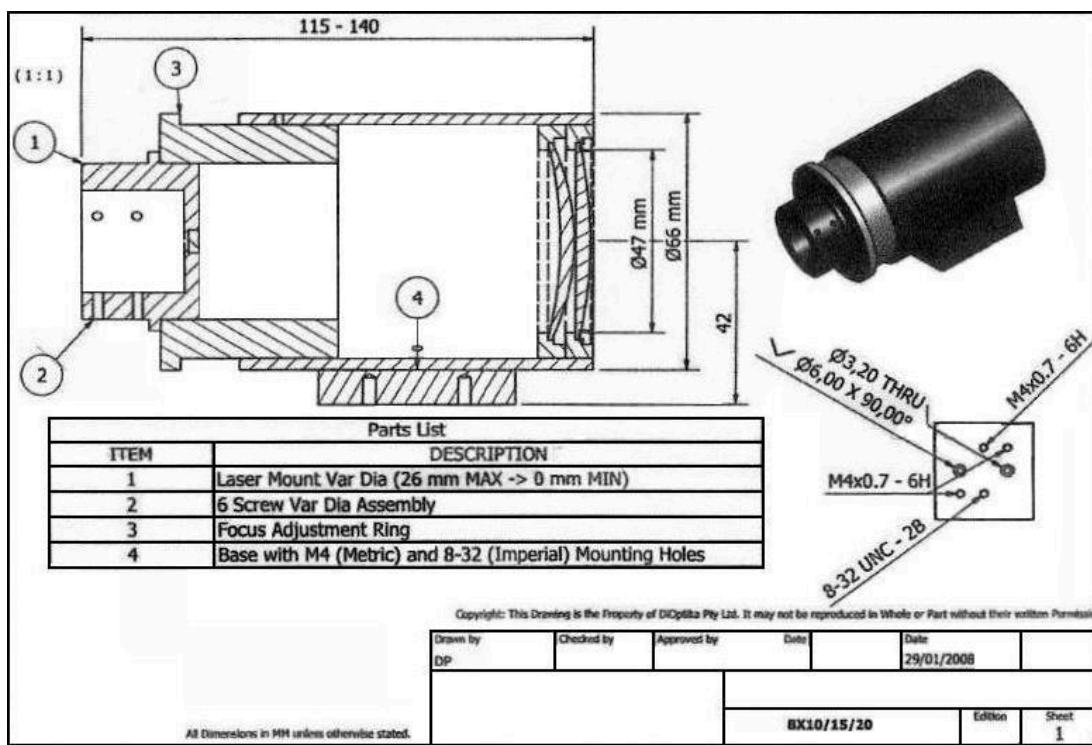


Figura A.8: Dimensiones Beam Expander

Output Clear Aperture	47 mm dia
Input Clear Aperture	5 mm dia
AR Coating	Broadband 400-1100 nm
Desing	Lambda/4 - 3 element BBAR Coating
Typical Collimating lenghts from rear small lens to front of large lens (for 660 nm) - Tune for other wavelenghts	10x - 97 mm
	15x - 99 mm
	20x - 103 mm

Figura A.9: Especificaciones Generales Beam Expander

A.5. Cámara CCD

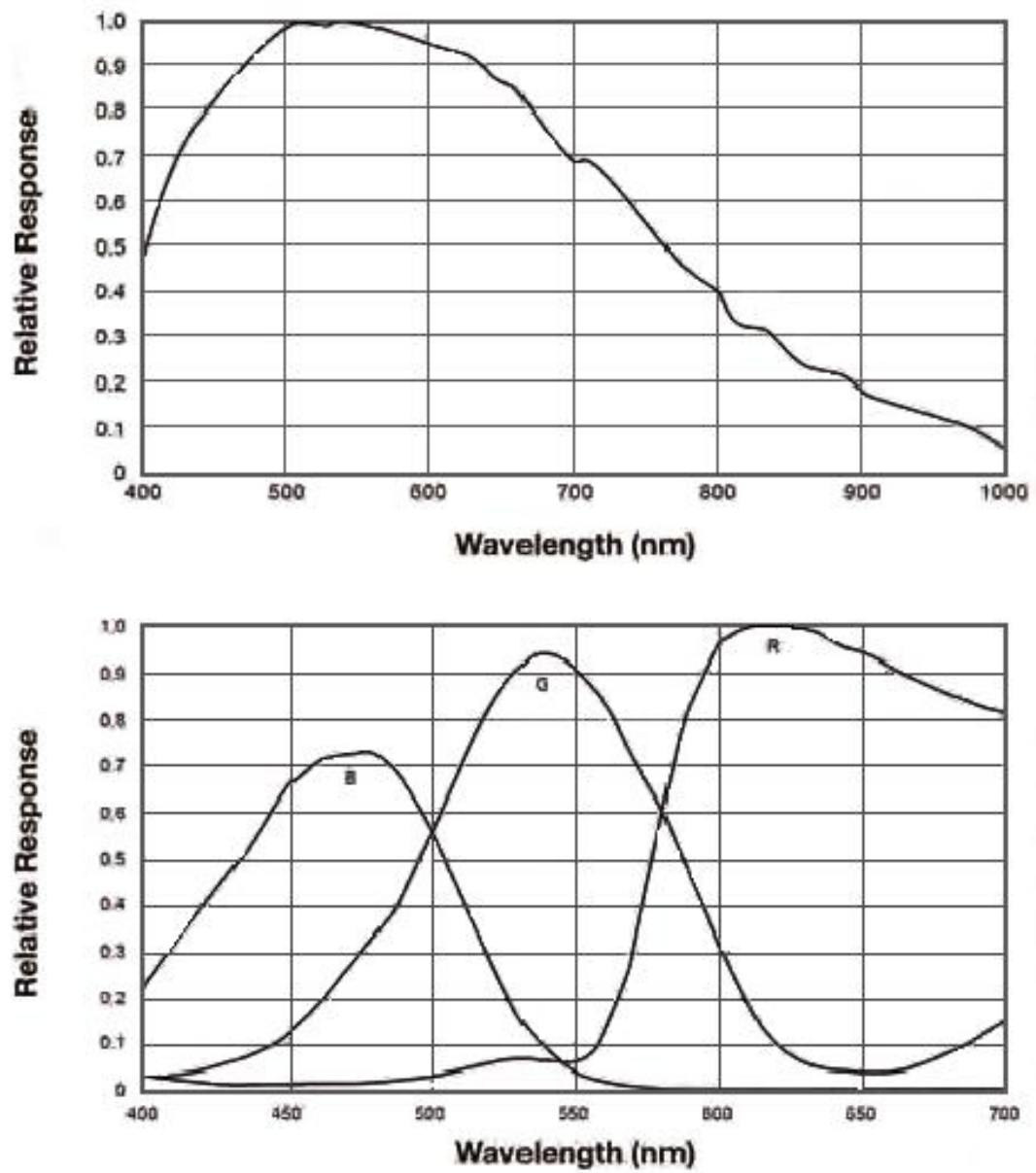


Figura A.10: Respuesta Espectral

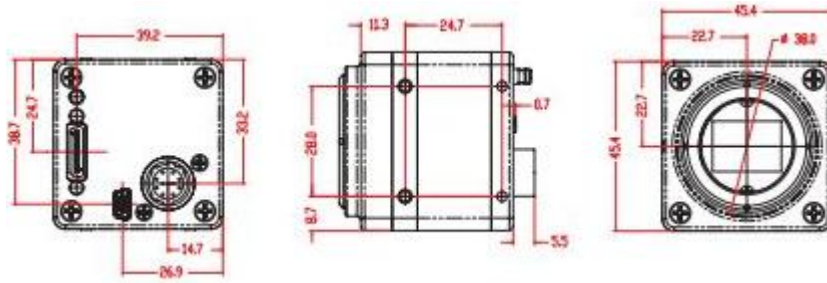


Figura A.11: Dimensiones Cámara CCD

A.6. Filtro Bandpass

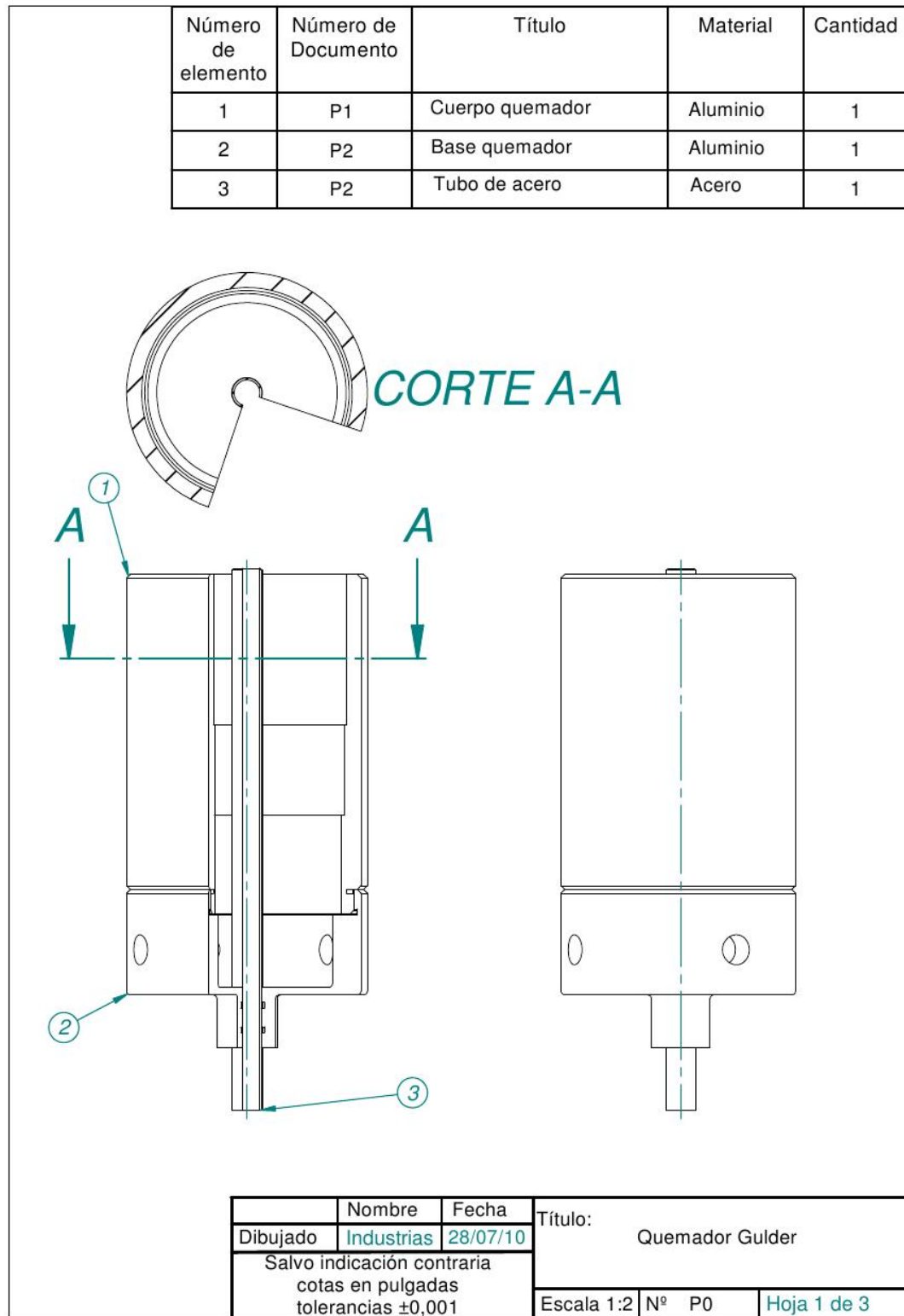
Diameter (mm)	25.00
Diameter Tolerance (mm)	+0.0 / -0.1
Thickness (mm)	5.00
Thickness Tolerance (mm)	±0.10
Center Wavelength CWL (nm)	532.00
Center Wavelength CWL Tolerance (nm)	±2.00
Full Width-Half Max FWHM (nm)	10.00
Full Width-Half Max FWHM Tolerance (nm)	±2.00
Minimum Transmission (%)	≥85
Blocking Wavelength Range (nm)	200 - 1200
Optical Density OD	≥4.00
Surface Quality	80 - 50
RoHS	Compliant

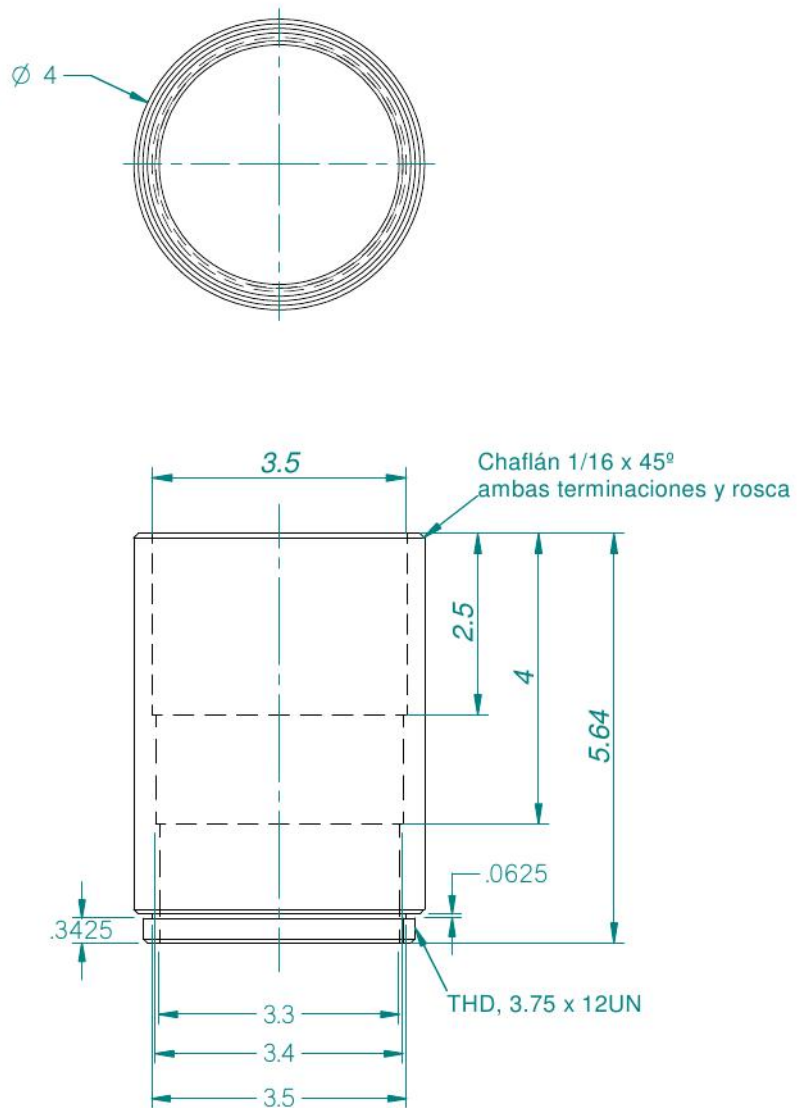
Figura A.12: Especificaciones Filtro

Apéndice B

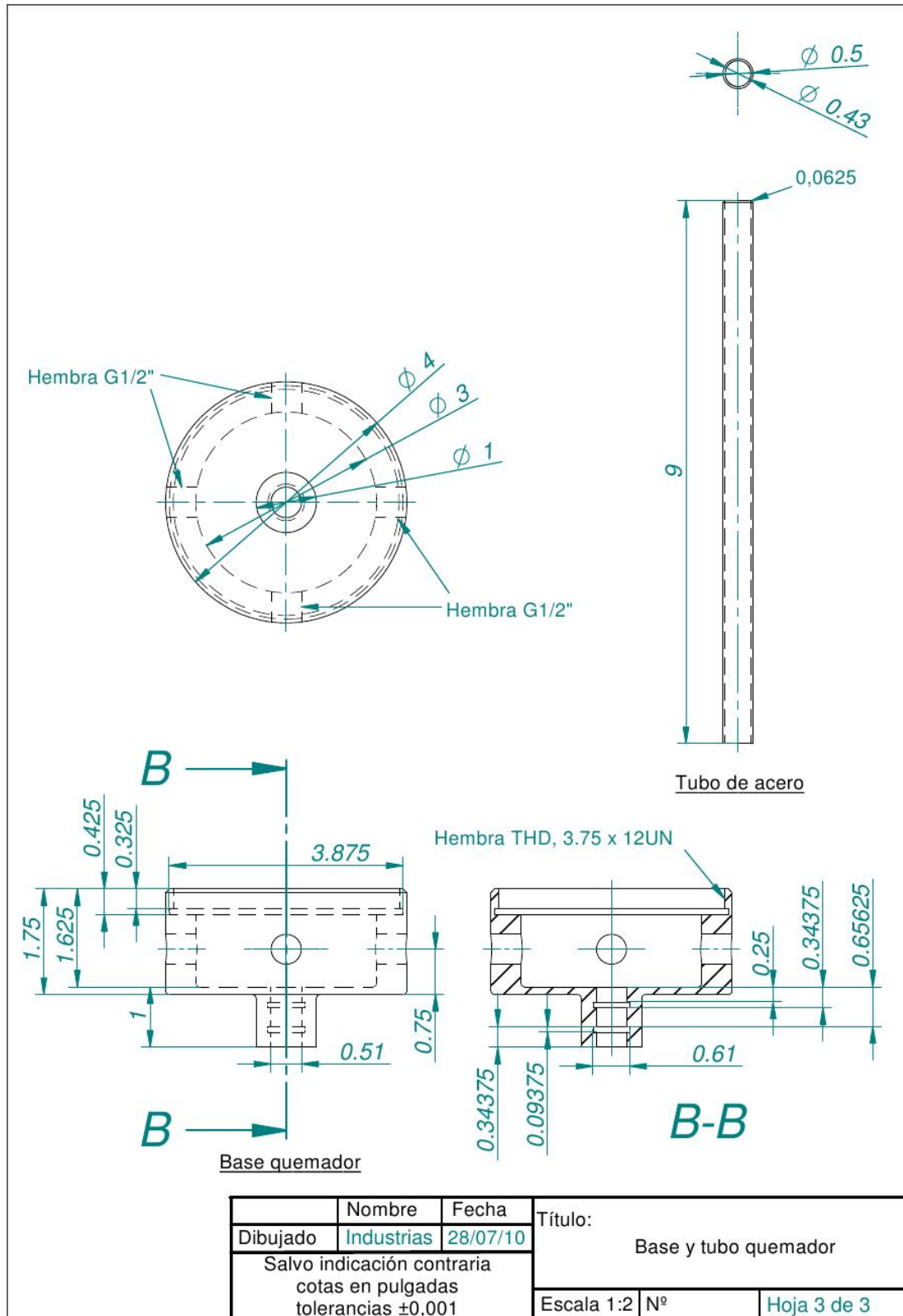
Planos Quemadores

B.1. Quemador Gülder

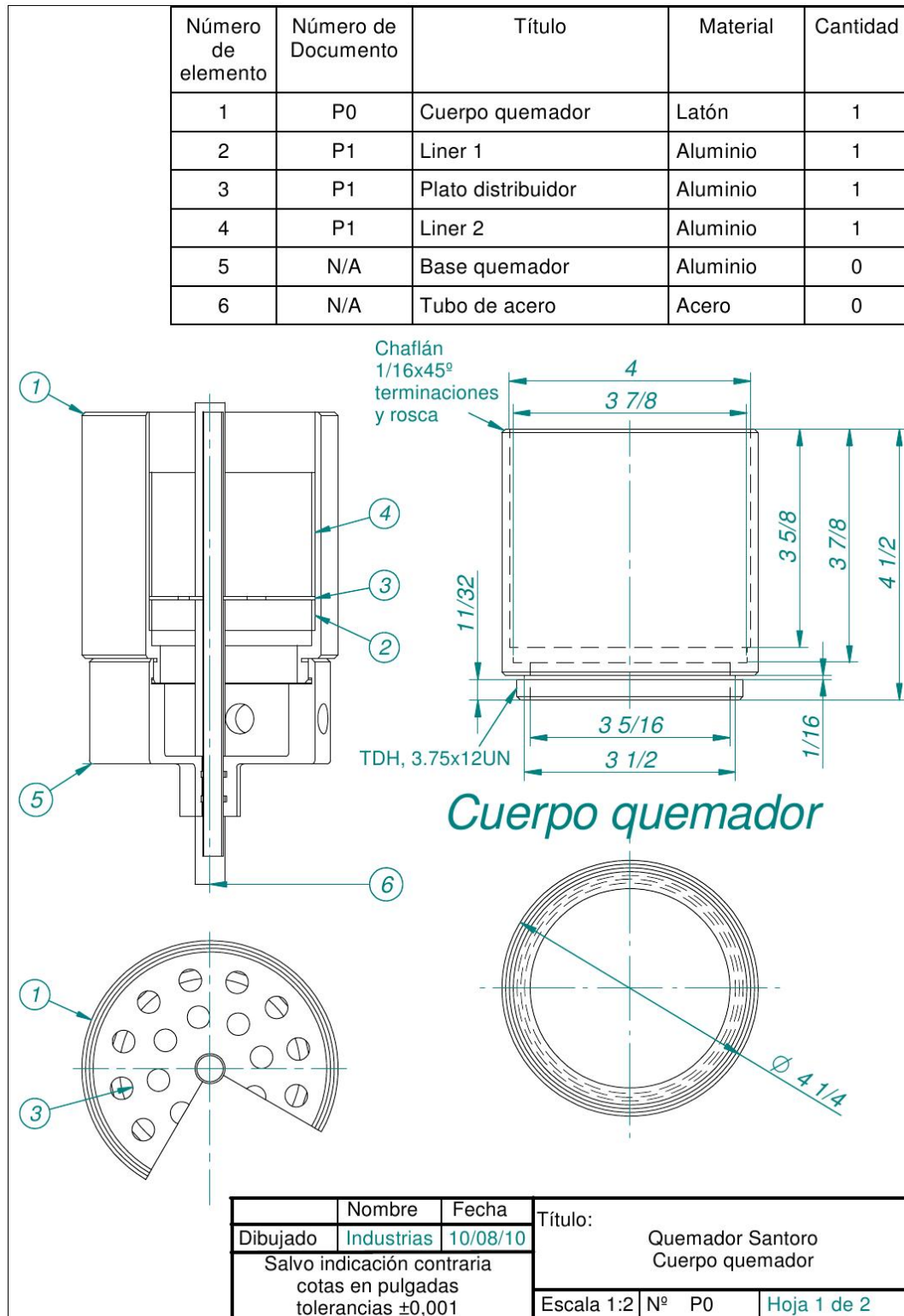


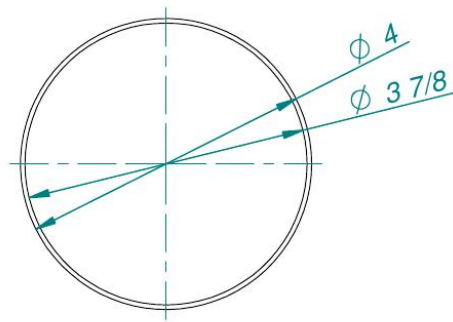


	Nombre	Fecha	Título: Cuerpo Quemador		
Dibujado	Industrias	28/07/10			
Salvo indicación contraria cotas en pulgadas tolerancias $\pm 0,001$			Escala 1:2	Nº P1	Hoja 2 de 3

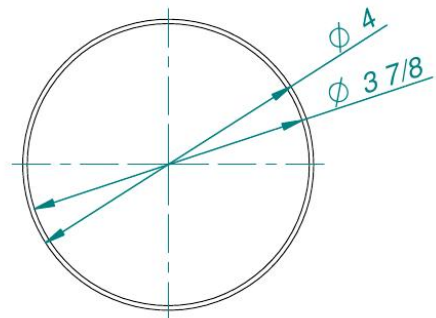


B.2. Quemador Santoro

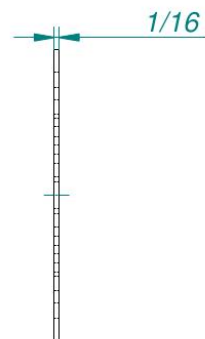
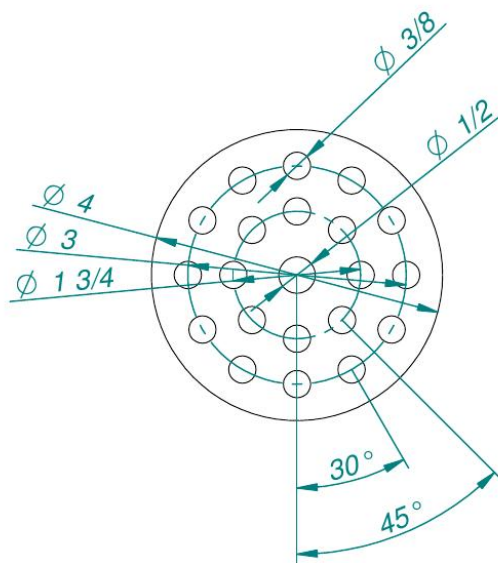
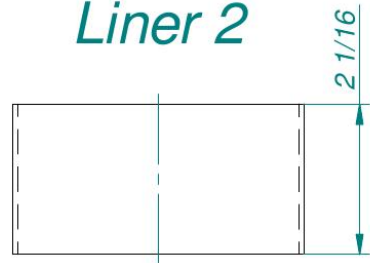




Liner 1

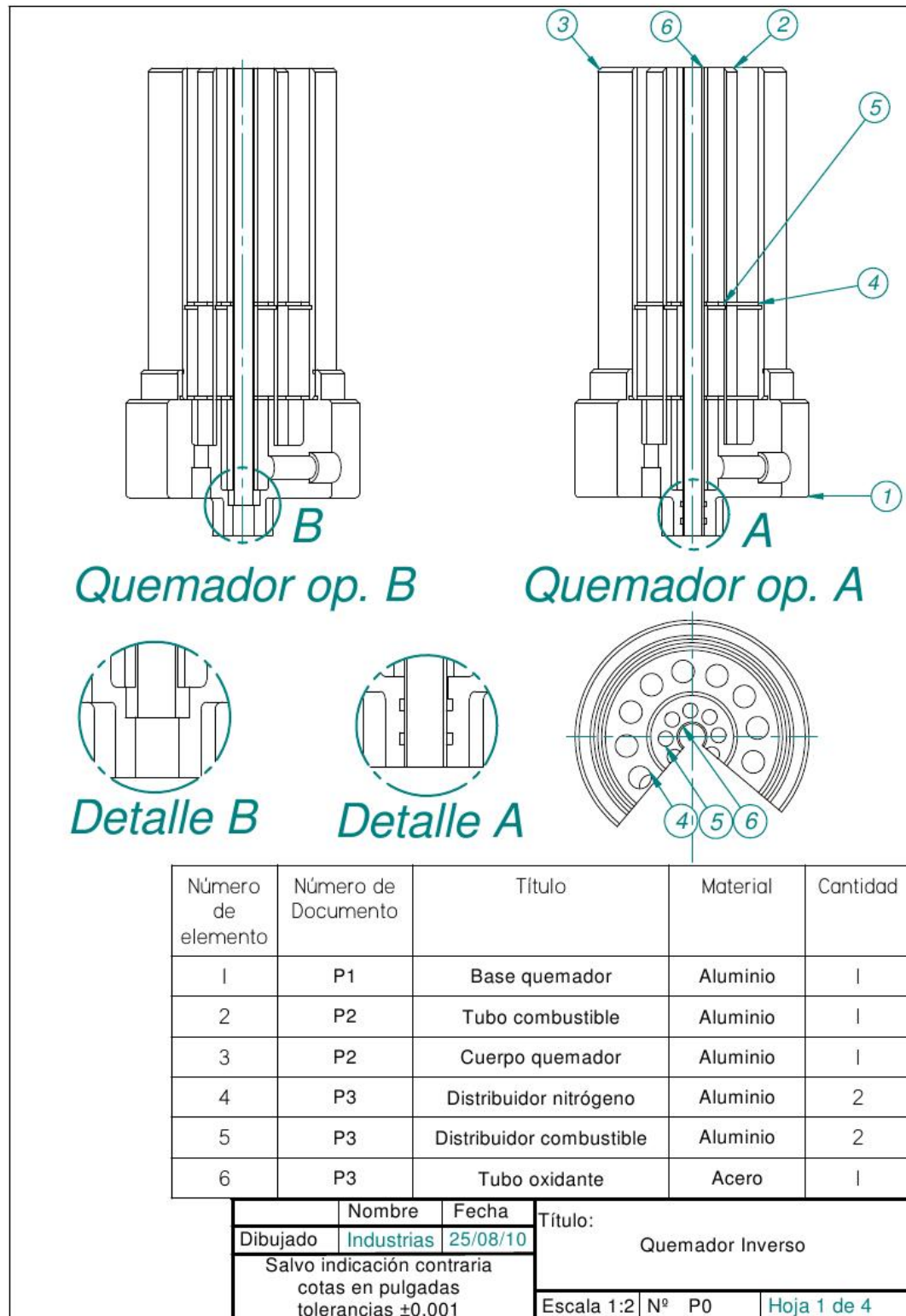


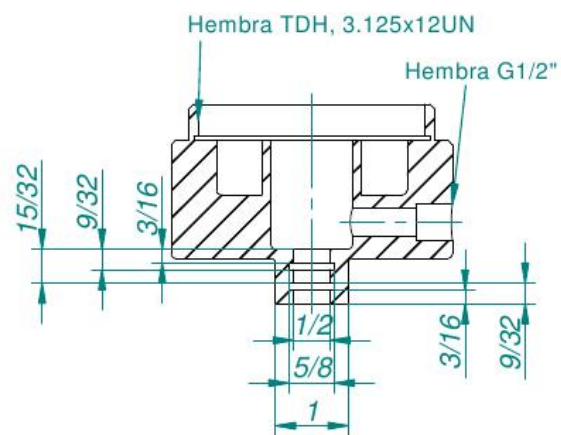
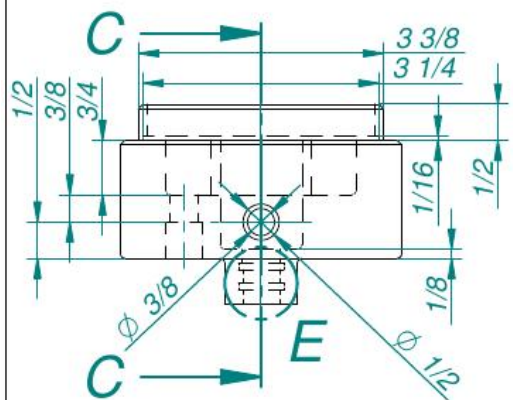
Liner 2



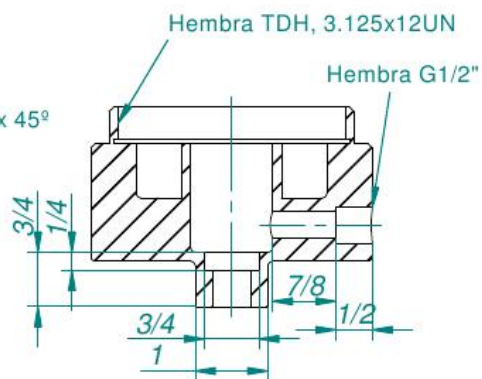
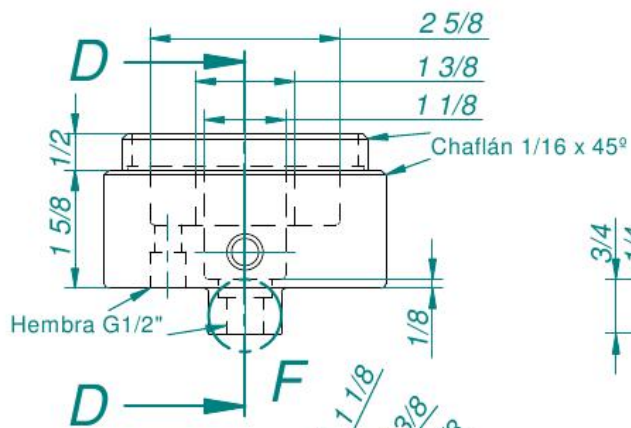
	Nombre	Fecha	Título:		
Dibujado	Industrias	10/08/10			
Salvo indicación contraria cotas en pulgadas tolerancias $\pm 0,001$			Liners y plato distribuidor		
Escala 1:2	Nº	P1	Hoja 2 de 2		

B.3. Quemador Inverso

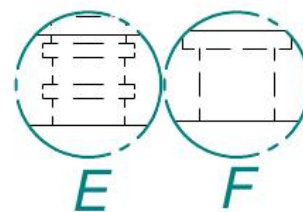
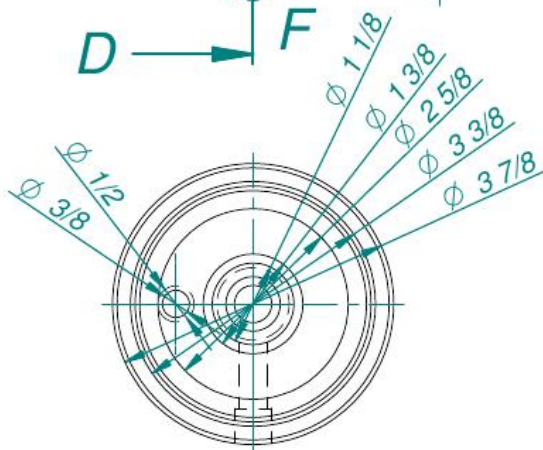




CORTE C-C



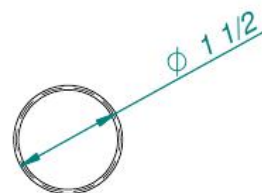
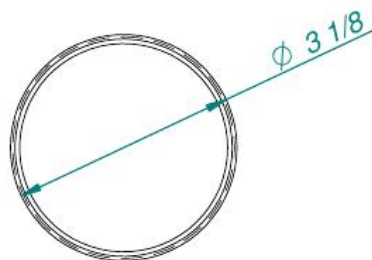
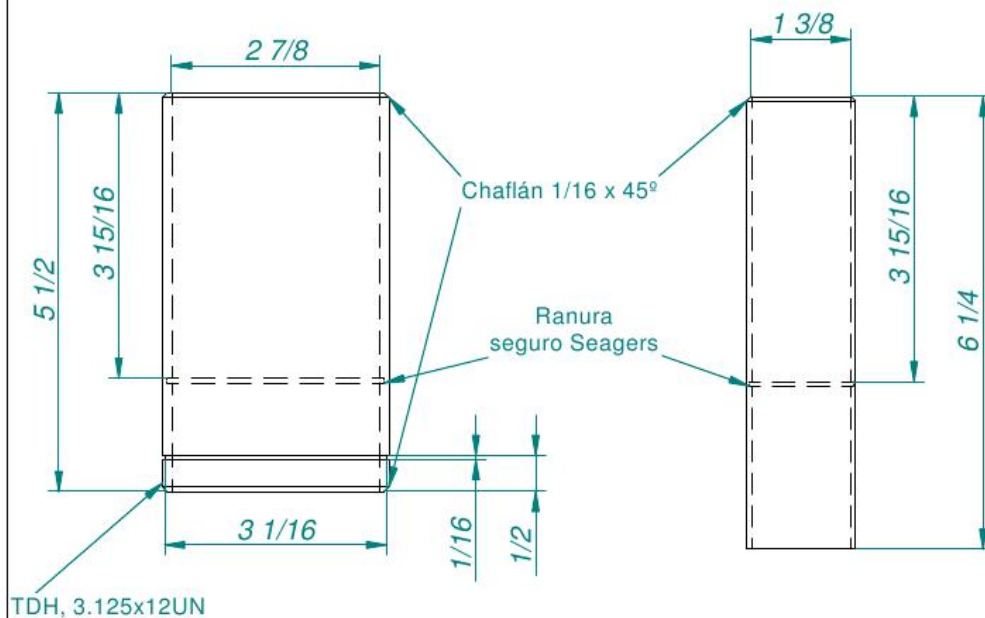
CORTE D-D



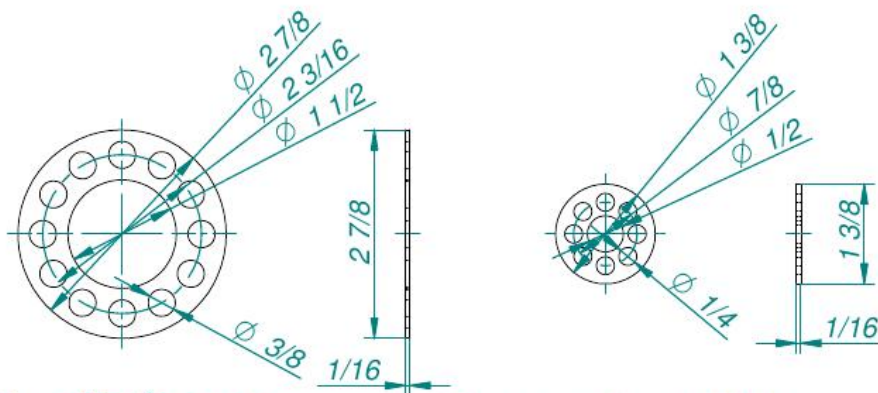
OBS: Piezas idénticas salvo en zona detalle E y F

	Nombre	Fecha	Título:
Dibujado	Industrias	25/08/10	
Salvo indicación contraria cotas en pulgadas tolerancias $\pm 0,001$			Base quemador op. A y B
Escala 1:2	Nº	P1	Hoja 2 de 4

Cuerpo quemador Tubo combustible



	Nombre	Fecha	Título: Tubo combustible y cuerpo quemador	
Dibujado	Industrias	25/08/10		
Salvo indicación contraria cotas en pulgadas tolerancias $\pm 0,001$			Escala 1:2	Nº P2
			Hoja 3 de 4	

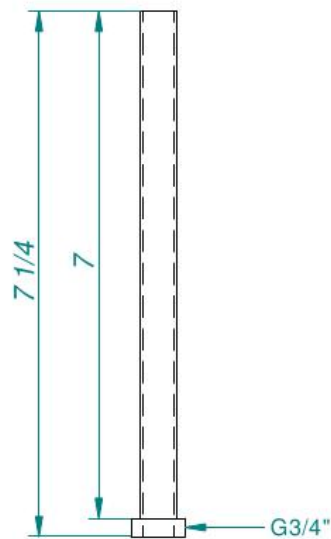
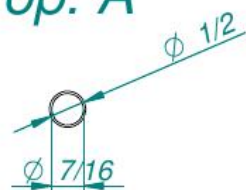


D. nitrógeno

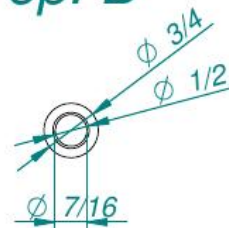
D. combustible



op. A



op. B



	Nombre	Fecha	Título: Distribuidores nitrógeno y combustible, tubos oxidante op. A y B
Dibujado	Industrias	25/08/10	
Salvo indicación contraria cotas en pulgadas tolerancias $\pm 0,001$			Escala 1:2
			Nº P3
			Hoja 4 de 4

Apéndice C

Codigo Matlab

```
% Leer imagenes S %%
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\S');
Folder = fullfile('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\S');
dirOutput = dir(fullfile(Folder,'S*.bmp'));
fileNames = {dirOutput.name};
num = numel(fileNames) ;
% Tamao de la imagen %
Aux1=imread(fileNames{1});
[M N]=size(Aux1);
% Promediar imagenes S %
Prom_S=zeros(M,N);
for i=1:num
    Aux1=imread(fileNames{i});
    Aux1=mat2gray(Aux1);
    Aux1=imdivide(Aux1,num);
    Prom_S=imadd(Aux1,Prom_S);
end
Prom_S=imcrop(Prom_S,[225.5 0 632 1038]);
[m n]=size(Prom_S);
```

```

Prom_b_S=zeros(m,n);
% Binning %
for i=1:3:(m-2)
    for j=1:n
        a=Prom_S(i,j);
        b=Prom_S(i+1,j);
        c=Prom_S(i+2,j);
        Prom_b_S(i,j)=(a/3+b/3+c/3);
        Prom_b_S(i+1,j)=(a/3+b/3+c/3);
        Prom_b_S(i+2,j)=(a/3+b/3+c/3);
    end
end

%% Leer imagenes S' %%
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\S1');
Folder = fullfile('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\S1');
dirOutput = dir(fullfile(Folder,'S*.bmp'));
fileNames = {dirOutput.name};
num = numel(fileNames) ;
% Promediar imagenes S' %
Prom_S_prima=zeros(M,N);
for i=1:num
    Im_read=imread(fileNames{i});
    Aux1=mat2gray(Im_read);
    Aux1=imdivide(Aux1,num);
    Prom_S_prima=imadd(Aux1,Prom_S_prima);
end
Prom_S_prima=imcrop(Prom_S_prima,[225.5 0 632 1038]);
Prom_b_S_prima=zeros(m,n);
% Binning %
for i=1:3:(m-2)

```

```

        for j=1:n
            a=Prom_S_prima(i,j);
            b=Prom_S_prima(i+1,j);
            c=Prom_S_prima(i+2,j);
            Prom_b_S_prima(i,j)=(a/3+b/3+c/3);
            Prom_b_S_prima(i+1,j)=(a/3+b/3+c/3);
            Prom_b_S_prima(i+2,j)=(a/3+b/3+c/3);
        end
    end

end

%% Leer imagenes IO %%
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\IO')
Folder=fullfile('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\IO');
dirOutput = dir(fullfile(Folder,'IO*.bmp'));
fileNames = {dirOutput.name};
num = numel(fileNames);
% Promediar imagenes IO%
Prom_IO=zeros(M,N);
for i=1:num
    Im_read=imread(fileNames{i});
    Aux1=mat2gray(Im_read);
    Aux1=imdivide(Aux1,num);
    Prom_IO=imadd(Aux1,Prom_IO);
end

Prom_IO=imcrop(Prom_IO,[225.5 0 632 1038]);
Prom_b_IO=zeros(m,n);
% Binning %
for i=1:3:(m-2)
    for j=1:n
        a=Prom_IO(i,j);
        b=Prom_IO(i+1,j);
    end
end

```

```

        c=Prom_I0(i+2,j);
        Prom_b_I0(i,j)=(a/3+b/3+c/3);
        Prom_b_I0(i+1,j)=(a/3+b/3+c/3);
        Prom_b_I0(i+2,j)=(a/3+b/3+c/3);
    end
end

%% Leer imagenes I0'%%
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\I01');
Folder=fullfile('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\I01');
dirOutput = dir(fullfile(Folder,'I0*.bmp'));
fileNames = {dirOutput.name};
num = numel(fileNames);
% Promediar imagenes I0'
Prom_I_prima=zeros(M,N);
for i=1:num
    Im_read=imread(fileNames{i});
    Aux1=mat2gray(Im_read);
    Aux1=imdivide(Aux1,num);
    Prom_I_prima=imadd(Aux1,Prom_I_prima);
end
Prom_I_prima=imcrop(Prom_I_prima,[225.5 0 632 1038]);
Prom_b_I_prima=zeros(m,n);
% Binning %
for i=1:3:(m-2)
    for j=1:n
        a=Prom_I_prima(i,j);
        b=Prom_I_prima(i+1,j);
        c=Prom_I_prima(i+2,j);
        Prom_b_I_prima(i,j)=(a/3+b/3+c/3);
        Prom_b_I_prima(i+1,j)=(a/3+b/3+c/3);
    end
end

```

```

        Prom_b_I_prima(i+2,j)=(a/3+b/3+c/3);
    end
end

%% Tau %%
numer_b=imsubtract(Prom_b_S,Prom_b_S_prima);
denom_b=imsubtract(Prom_b_I0,Prom_b_I_prima);
Tau_b=imdivide(numer_b,denom_b);
Ln_Tau_b=-log(Tau_b);
Ln_Tau_b=imcrop(Ln_Tau_b,[200 0 250 808]);

%% Limpiar variables %%
clear Aux1 Folder Im_read Im_reduce M N a b c dirOutput fileNames
clear i j m n num denom numer denom_b numer_b
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab');

%% f_soot %%
E_m=0.2595;
lambda=0.000532; %[mm]%
L=60;
[m n]=size(Ln_Tau_b);
fsoot=zeros(m,n);
sum_fsoot=zeros(1,m);

for i=1:m
    for j=1:n;
        fsoot(i,j)=Ln_Tau_b(i,j)*lambda/(E_m*L);
    end
    sum_fsoot(i)=sum(fsoot(i));
end

%%

```

```

clear Prom_I0 Prom_I_prima Prom_S Prom_S_prima
clear Prom_b_I0 Prom_b_I_prima Prom_b_S Prom_b_S_prima Tau_b
clear E_m L fc i j lambda sum_fsoot Ln_Tau_b

%%
fsoot_h10(:,1)=fsoot(688,:);
fsoot_h13(:,1)=fsoot(652,:);
fsoot_h16(:,1)=fsoot(616,:);
fsoot_h19(:,1)=fsoot(580,:);
fsoot_h22(:,1)=fsoot(544,:);
fsoot_h25(:,1)=fsoot(508,:);
fsoot_h28(:,1)=fsoot(472,:);
fsoot_h31(:,1)=fsoot(436,:);
fsoot_h34(:,1)=fsoot(400,:);
fsoot_h37(:,1)=fsoot(364,:);
fsoot_h40(:,1)=fsoot(328,:);
fsoot_h43(:,1)=fsoot(292,:);
fsoot_h46(:,1)=fsoot(256,:);
fsoot_h49(:,1)=fsoot(220,:);
fsoot_h52(:,1)=fsoot(184,:);
fsoot_h55(:,1)=fsoot(148,:);
fsoot_h58(:,1)=fsoot(112,:);
fsoot_h61(:,1)=fsoot(76,:);
fsoot_h64(:,1)=fsoot(40,:);
fsoot_h67(:,1)=fsoot(4,:);

%%
smooth_h10=smooth(fsoot_h10,7);
smooth_h13=smooth(fsoot_h13,7);
smooth_h16=smooth(fsoot_h16,7);
smooth_h19=smooth(fsoot_h19,7);
smooth_h22=smooth(fsoot_h22,7);
smooth_h25=smooth(fsoot_h25,7);

```

```

smooth_h28=smooth(fsoot_h28,7);
smooth_h31=smooth(fsoot_h31,7);
smooth_h34=smooth(fsoot_h34,7);
smooth_h37=smooth(fsoot_h37,7);
smooth_h40=smooth(fsoot_h40,7);
smooth_h43=smooth(fsoot_h43,7);
smooth_h46=smooth(fsoot_h46,7);
smooth_h49=smooth(fsoot_h49,7);
smooth_h52=smooth(fsoot_h52,7);
smooth_h55=smooth(fsoot_h55,7);
smooth_h58=smooth(fsoot_h58,7);
smooth_h61=smooth(fsoot_h61,7);
smooth_h64=smooth(fsoot_h64,7);
smooth_h67=smooth(fsoot_h67,7);

%% Integracin en cada altura
fc=1/12;
a=n-1;
aux=zeros(1,a/2+1);
suma_fsoot=zeros(1,m);
fsoot_int=zeros(m,1);
for h=1:m;
    for x=a/2:a;
        aux(1,x-a/2+1)=fsoot(h,x);
    end
    suma_fsoot(h)=sum(aux);
    fsoot_int(h)=pi*(fc)^2*suma_fsoot(h);
end

%% Deconvoluciones a distintas alturas

```

```

fsoot_t=fsoot';
angulo=0.5;
x=360/angulo;
theta=zeros(1,x);
[m n]=size(fsoot_t);
for i=1:x
    theta(1,i)=angulo*(i-1);
end
%%
R=zeros(m,x);
Dec_h=zeros(m,m,n);

tic
for h=1:n
    for i=1:m
        for j=1:x
            R(i,j)=fsoot_t(i,h);
        end
    end
    Dec_radon=iradon(R,theta,'none',m);
    Dec_h(:,:,h)=Dec_radon(:,:,);
end
toc

%%
[m n]=size(fsoot);
radio=1/12;
aux=zeros(n,1);
suma_deconv=zeros(m,1);
int_fsoot_deconv=zeros(m,1);
for h=1:m

```

```

    for j=1:n;
        aux(j,1)=Dec_h(j,125,h);
    end
    suma_deconv(h,1)=sum(aux);
    int_fsoot_deconv(h,1)=pi*radio^2*suma_deconv(h,1);
end
%%
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab\TXT');
save('fsoot integral deconvolucionada.txt', 'int_fsoot_deconv', '-ascii');
cd('C:\Users\Andrea\Documentos\Memoria\Matlab');

%% GRAFICO 3D
fc=1/12;
eje_x=zeros(n,1);
eje_y=zeros(1,n);
diametro=13;
for i=1:n;
    eje_x(i,1)=(i-126)/125;
    eje_y(1,i)=(i-126)/125;
end
h=688;
%%
volcan=Dec_h(:,:,h);
surf(eje_y,eje_x,volcan);
h=h-36;

```

Apéndice D

Resultados Experimentales

D.1. Gráficos f_{soot} para distintas alturas.

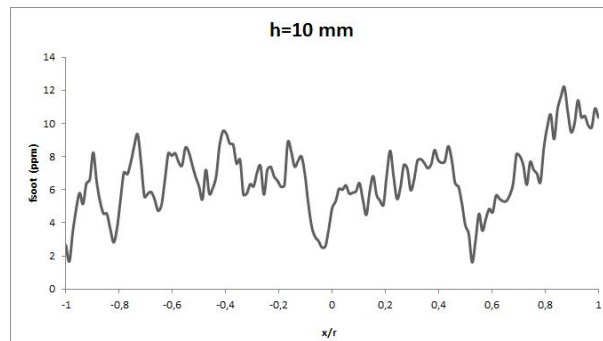


Figura D.1: f_{soot} en $h=10$ mm

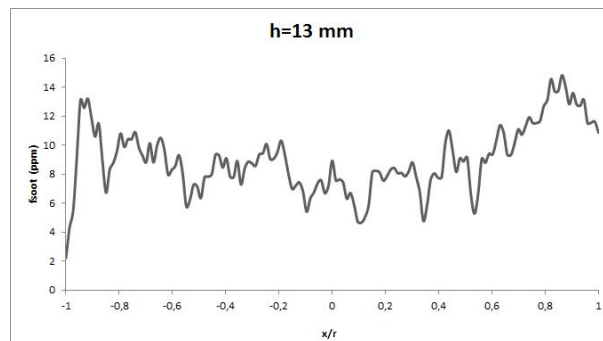


Figura D.2: f_{soot} en $h=13$ mm

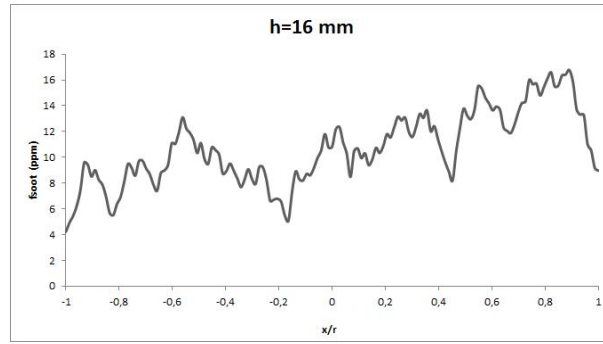


Figura D.3: f_{soot} en $h=16$ mm

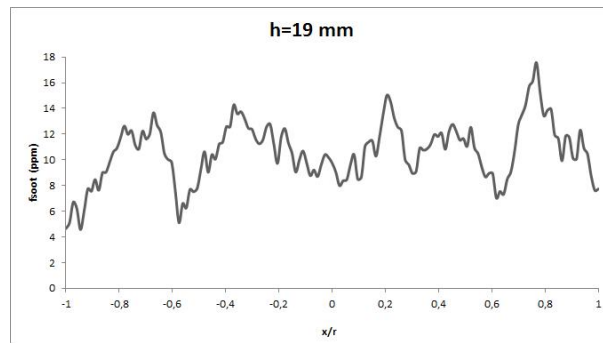


Figura D.4: f_{soot} en $h=19$ mm

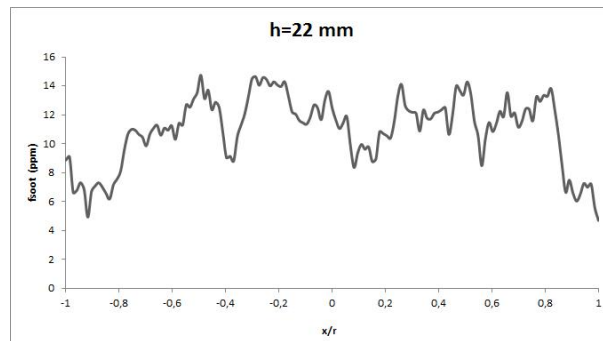


Figura D.5: f_{soot} en $h=22$ mm

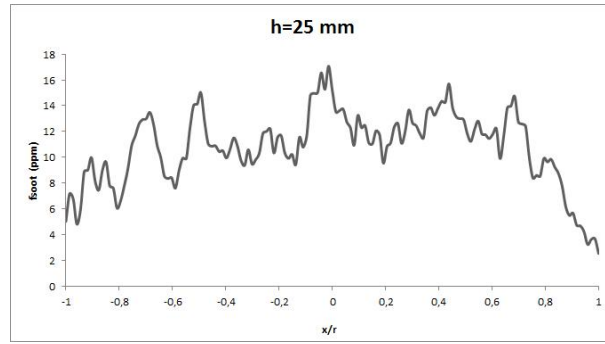


Figura D.6: f_{soot} en $h=25$ mm

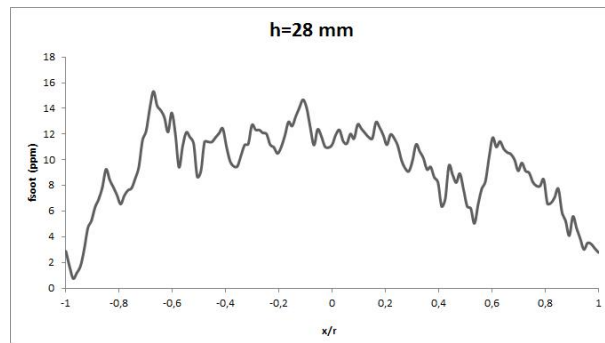


Figura D.7: f_{soot} en $h=28$ mm

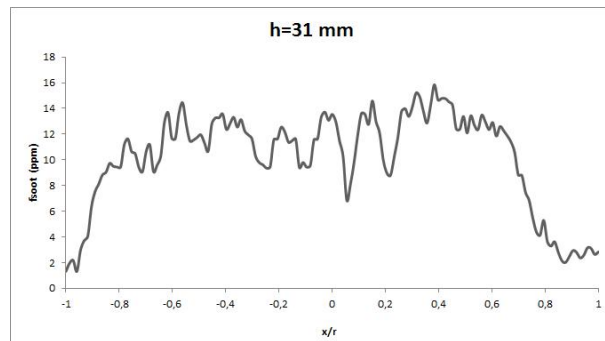


Figura D.8: f_{soot} en $h=31$ mm

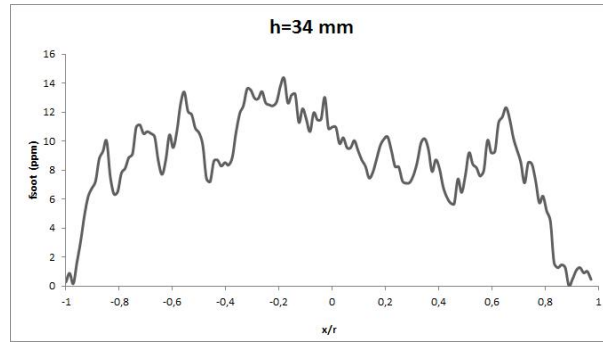


Figura D.9: f_{soot} en $h=34$ mm

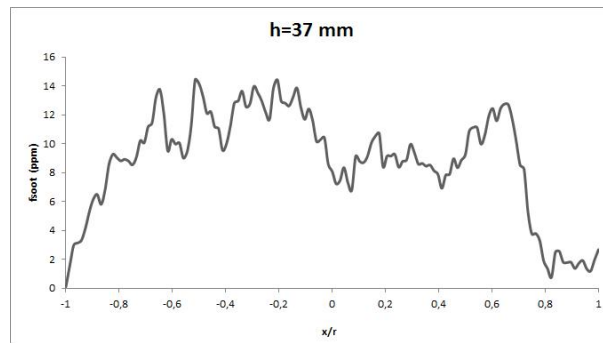


Figura D.10: f_{soot} en $h=37$ mm

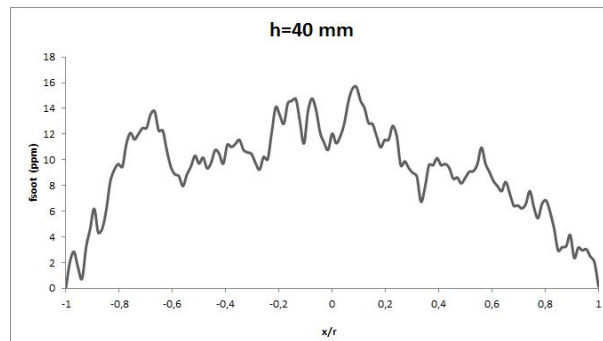


Figura D.11: f_{soot} en $h=40$ mm

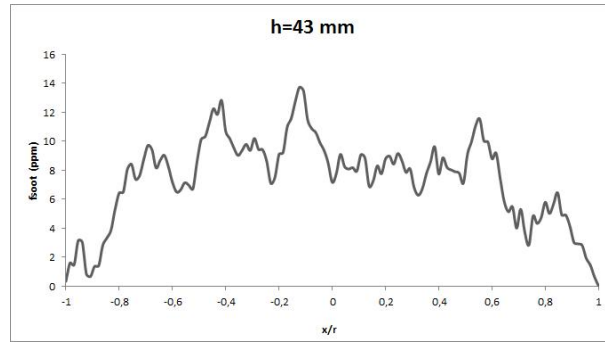


Figura D.12: f_{soot} en $h=43$ mm

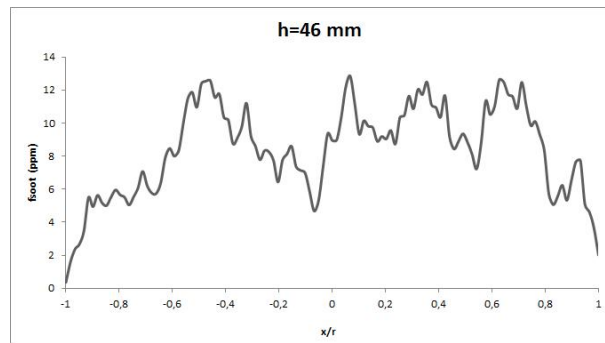


Figura D.13: f_{soot} en $h=46$ mm

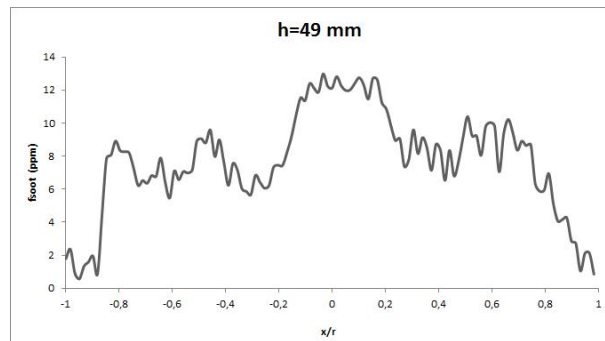


Figura D.14: f_{soot} en $h=49$ mm

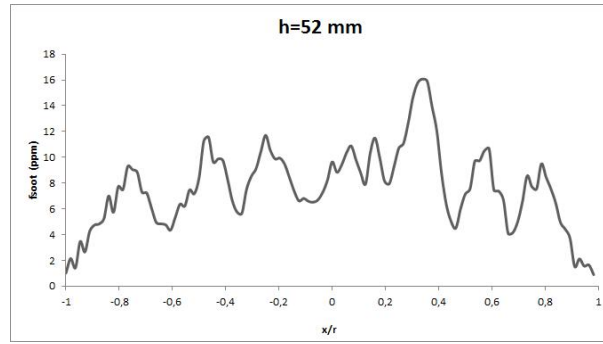


Figura D.15: f_{soot} en h=52 mm

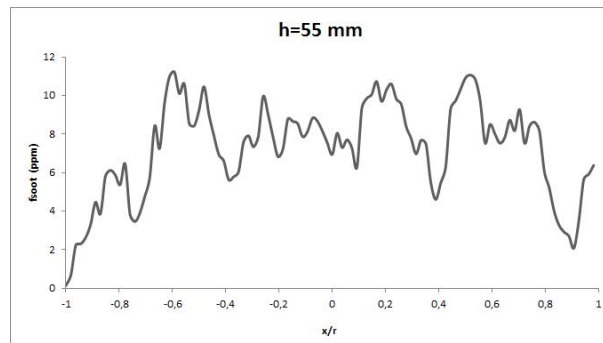


Figura D.16: f_{soot} en h=55 mm

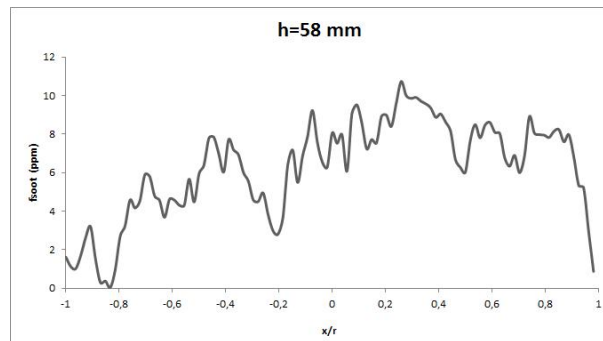


Figura D.17: f_{soot} en h=58 mm

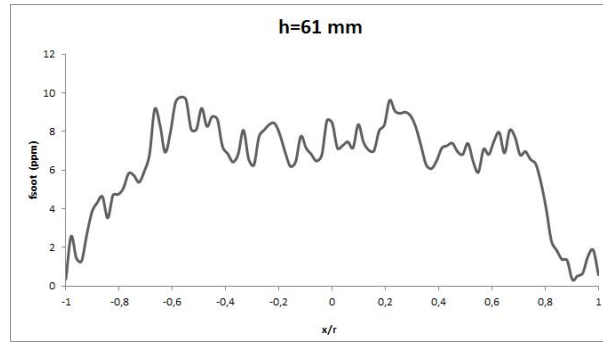


Figura D.18: f_{soot} en $h=61$ mm

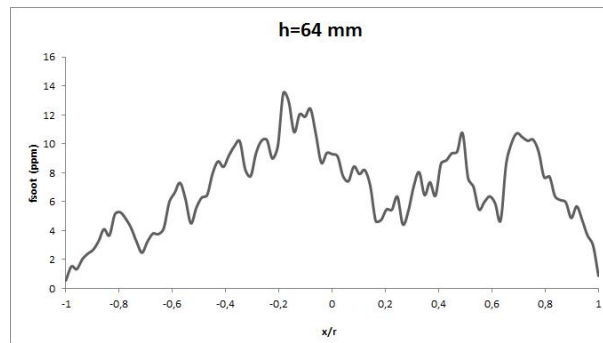


Figura D.19: f_{soot} en $h=64$ mm

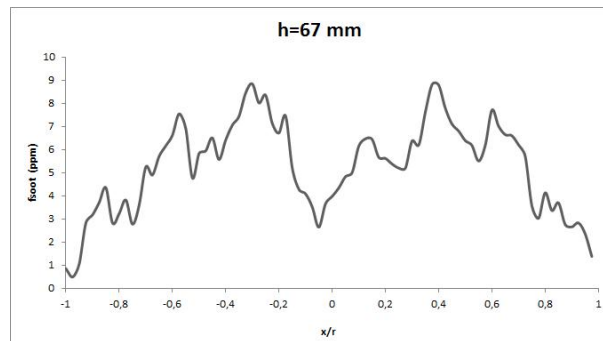


Figura D.20: f_{soot} en $h=67$ mm

D.2. Gráficos f_{soot} reconstruido radialmente para distintas alturas.

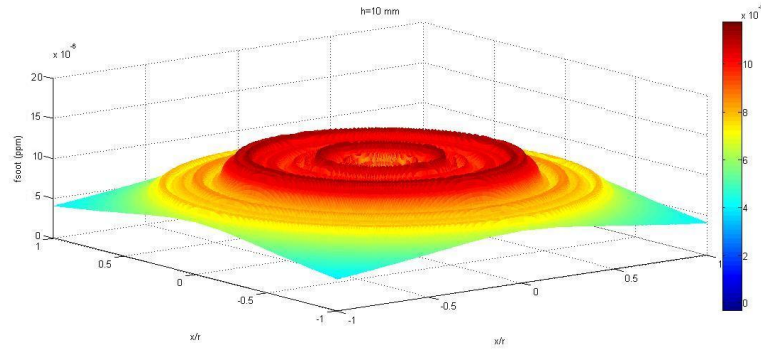


Figura D.21: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=10$ mm

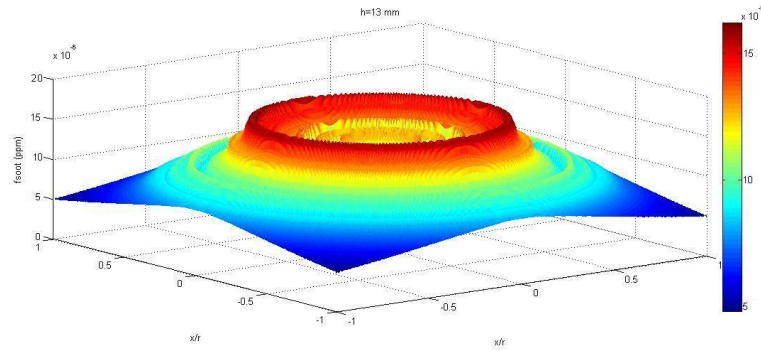


Figura D.22: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=13$ mm

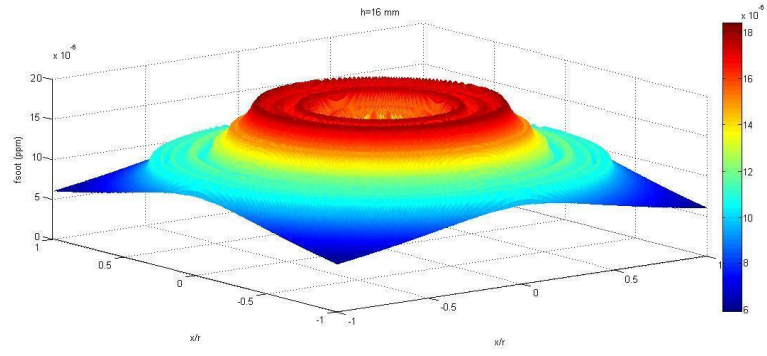


Figura D.23: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=16$ mm

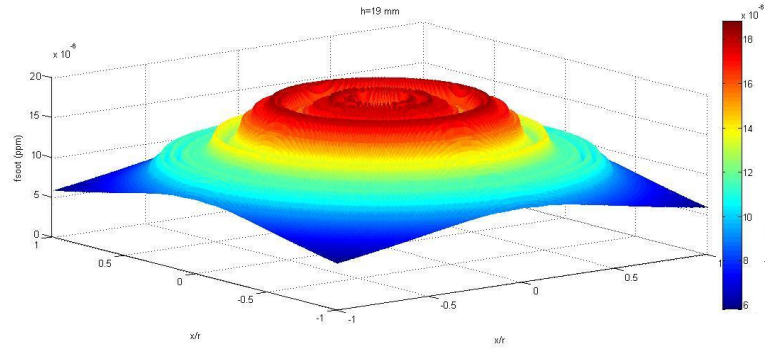


Figura D.24: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=19$ mm

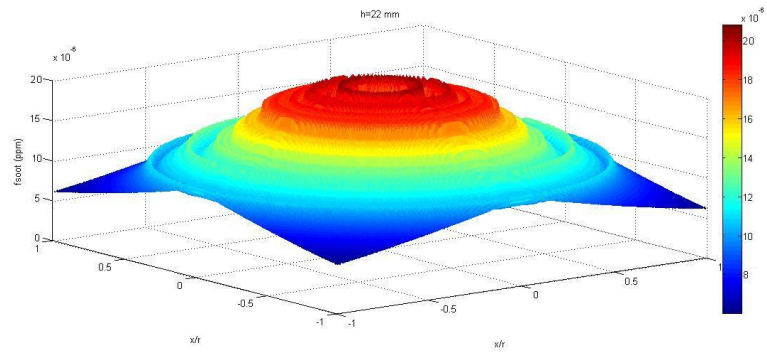


Figura D.25: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=22$ mm

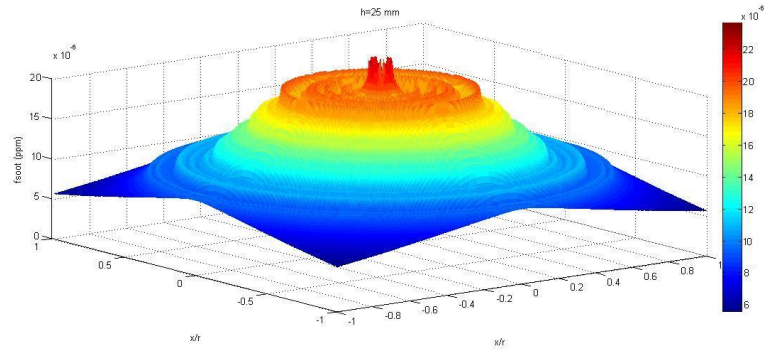


Figura D.26: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=25$ mm

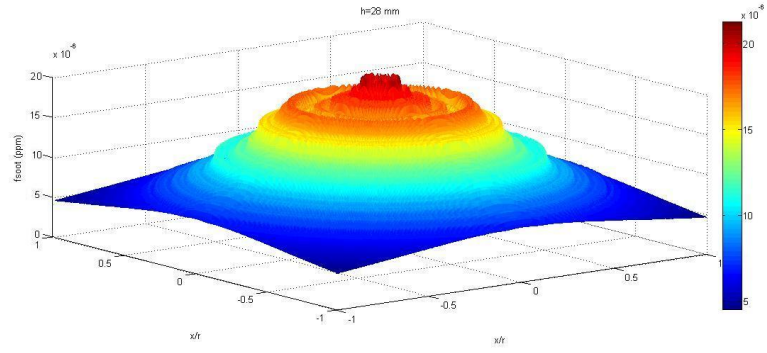


Figura D.27: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=28$ mm

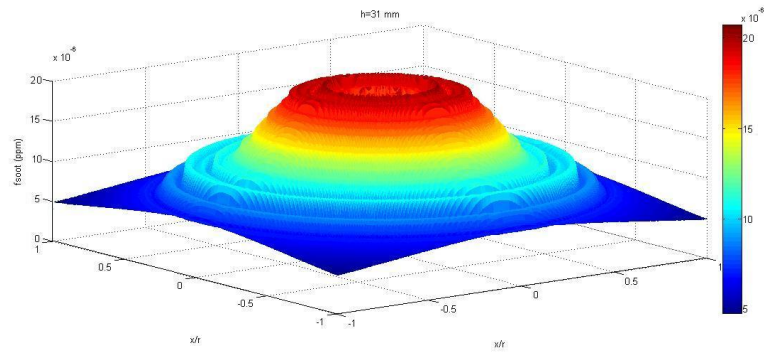


Figura D.28: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=31$ mm

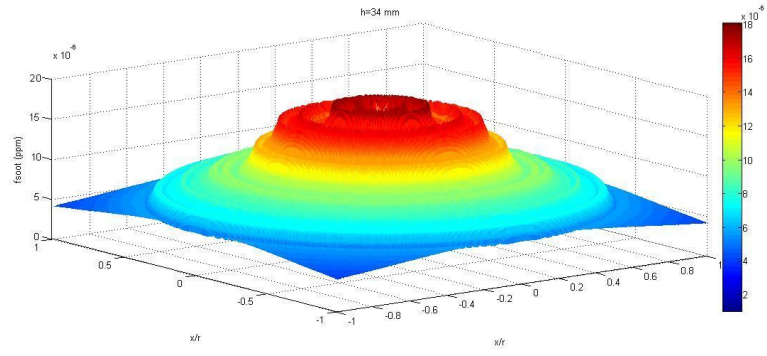


Figura D.29: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=34$ mm

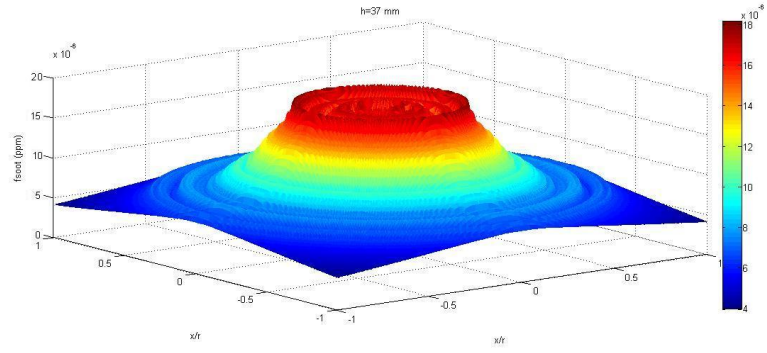


Figura D.30: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=37$ mm

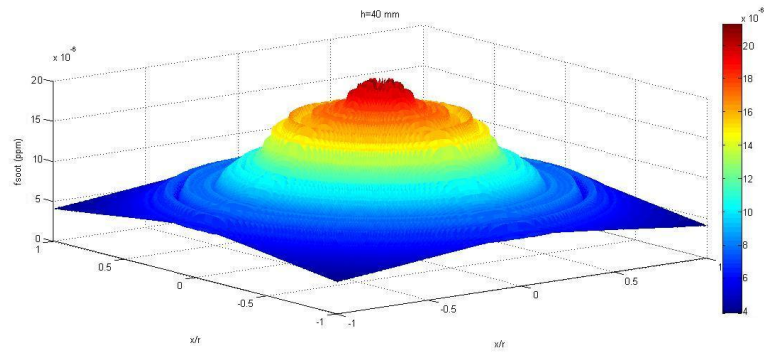


Figura D.31: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=40$ mm

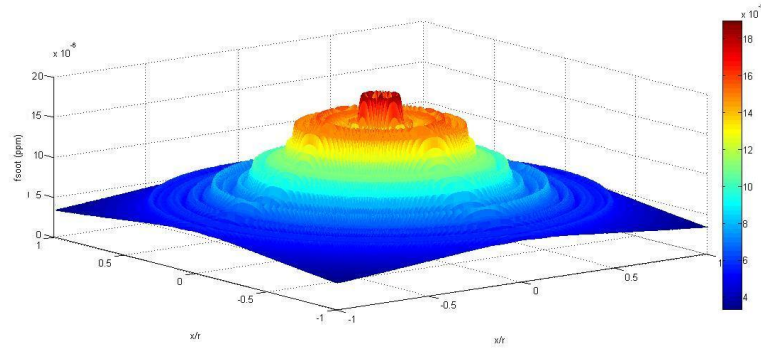


Figura D.32: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=43$ mm

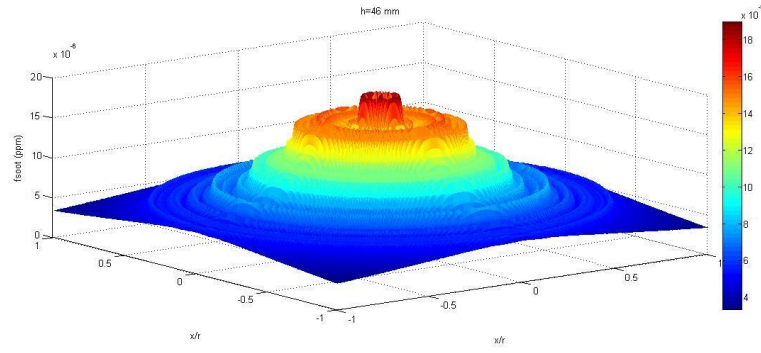


Figura D.33: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=46$ mm

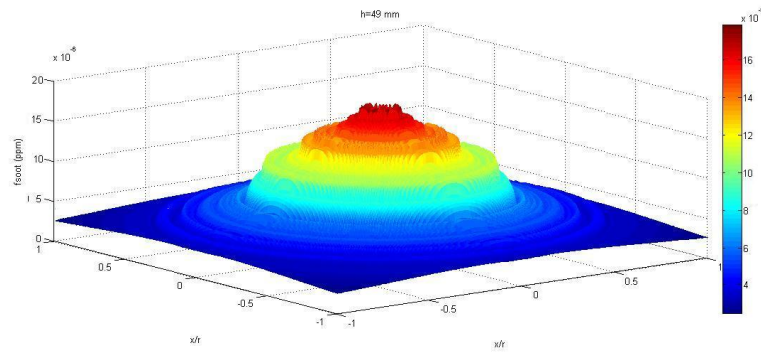


Figura D.34: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=49$ mm

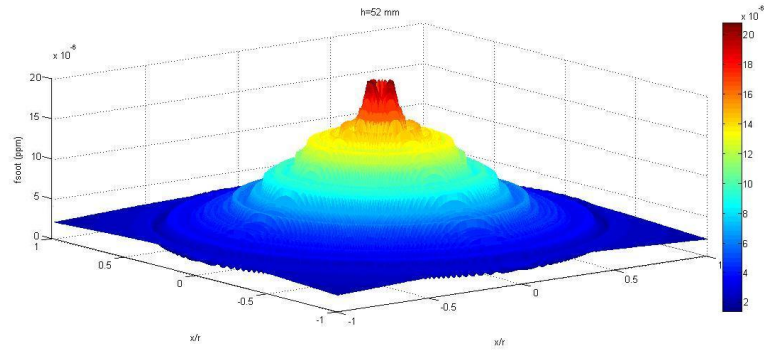


Figura D.35: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=52$ mm

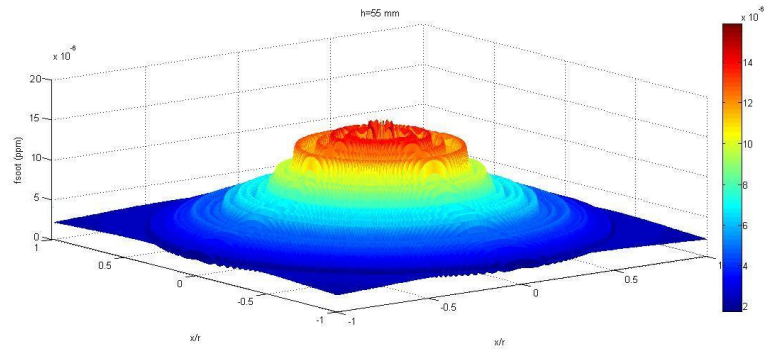


Figura D.36: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=55$ mm

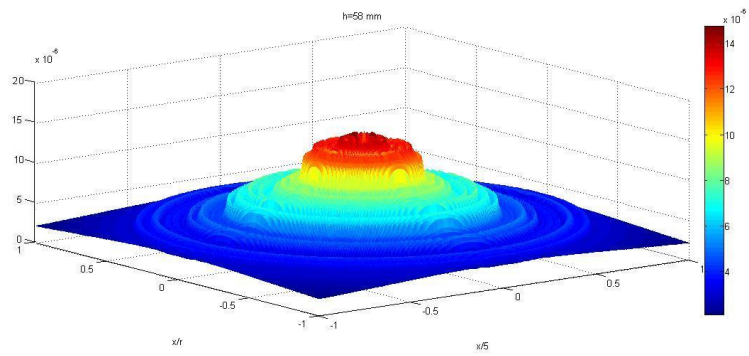


Figura D.37: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=58$ mm

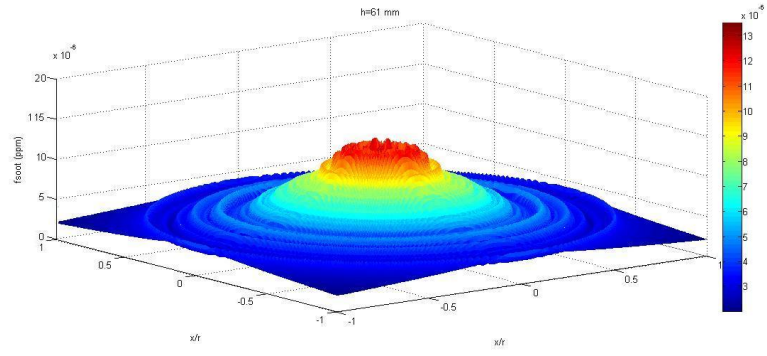


Figura D.38: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=61$ mm

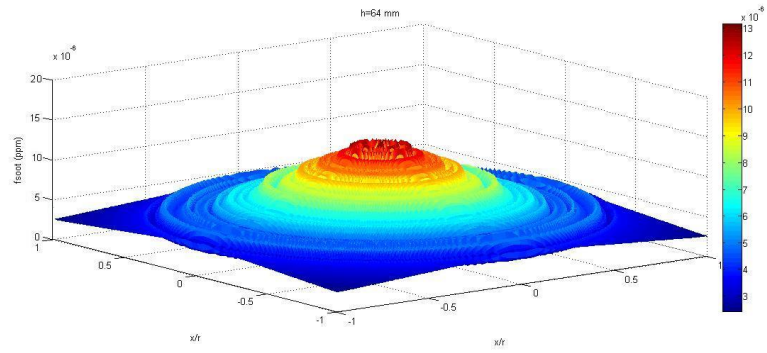


Figura D.39: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=64$ mm

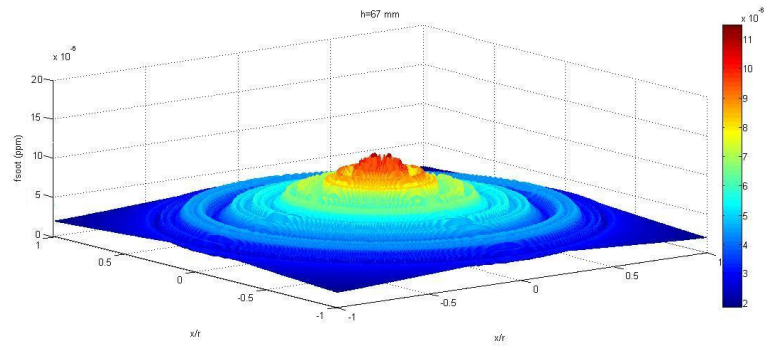


Figura D.40: f_{soot} reconstruido radialmente en $h=67$ mm