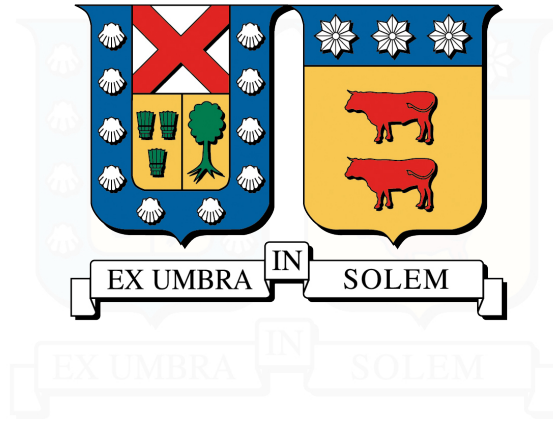


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



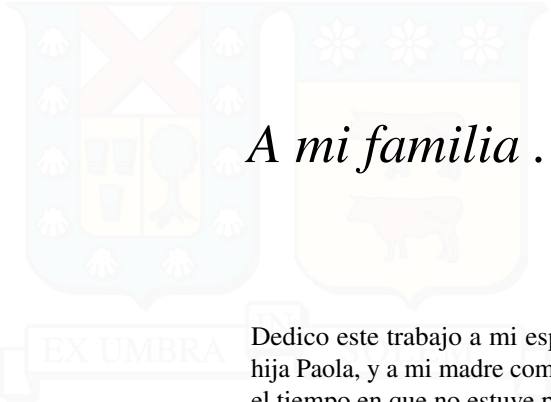
**DISEÑO, CÁLCULO, FABRICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN EN RACK
EXPERIMENTAL, DE SISTEMAS DE QUEMADORES PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE LLAMAS LAMINARES AXISIMÉTRICAS A
TRAVÉS DE DIVERSAS TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO**

GONZALO RAFAEL OLIVARES ALVAREZ

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : Andrés Fuentes Castillo
PROFESOR CORREFERENTE : Rodrigo Demarco Bull
PROFESOR CORREFERENTE : Pedro Reszka Cabello

NOVIEMBRE 2024



A mi familia ...

Dedico este trabajo a mi esposa Maricela, a mi hija Paola, y a mi madre como compensación por el tiempo en que no estuve presente.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a los profesores Rodrigo Demarco, Andrés Fuentes, Pedro Reszka, y Felipe Escudero por la oportunidad de recorrer el camino de este Magister, el que no estuvo exento de tropiezos, pero que finalmente con su comprensión y ayuda estoy logrando completar el recorrido.

También quiero agradecer especialmente al grupo de trabajo del EC2G integrado por Nicolás Mancilla, Valeria, Amanda, Tracy, Nicolas Gutierrez, Fernando, Ignacio, Juan José, Mijail, Paulo, Mathias, Carlos, Javier, Javiera, Coni, Felipe Alarcón, Pablo, Vicho, Vincenzo, Alejandro. Estos “bandidos” siempre me apoyaron y con ellos compartí extensas jornadas de trabajo en el laboratorio de combustión. Sin embargo, esas jornadas se hicieron mucho más llevaderas con su buen humor, risas y agradable convivencia. Claramente son un grupo de jóvenes fabulosos, a quienes les deseo lo mejor. Espero que con el devenir de los años y cuando pongan en modo automático sus vidas, estos buenos momentos compartidos sean un bálsamo de gratos recuerdos. También espero haberles cooperado en algo, y haber estado a la altura de ser un buen facilitador en sus propios trabajos de investigación. Espero que al menos una parte de las experiencias laborales del “Goli” les sirvan en sus próximos desafíos.

Agradezco finalmente a mi esposa Maricela, a mi hija Paola y a mi madre Concepción, quienes son el motor que me empuja día a día a tratar de ser un poco mejor. Ellas me han acompañado en los buenos y malos momentos de manera incondicional por lo que para ellas va dedicado este trabajo.

RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo de tesis, se presenta la labor desarrollada a lo largo de varios años, y que permitió iniciar el trabajo de experimentación del grupo EC2G en el Laboratorio de investigación del Departamento de Industrias. El cual está enfocado en la búsqueda de la identificación y caracterización de las variables relevantes que participan en el proceso de la formación de llamas en combustibles gaseosos, derivando posteriormente al estudio de combustibles líquidos, e inclusive sólidos como la biomasa vegetal.

Ninguna de las técnicas aplicadas para los estudios y publicaciones basadas en la experimentación y realizadas con el transcurso de los años en nuestro equipo de estudio, habría sido posible de concretar sin haber pasado por las necesarias etapas de estudio, diseño, creación, selección y compra del equipamiento mínimo necesario para ello. En este sentido, y a partir de la fabricación de los racks experimentales desarrollados, fue posible generar una columna vertebral de investigación a partir de la cual se logró ejecutar el diseño y fabricación de los sistemas de quemadores adecuados para el estudio. De esta manera, se presentan los requerimientos mínimos necesarios que debe contener un sistema de combustión que genere llamas axisimétricas estables, con resultados replicables y que permitan un análisis por imágenes tomadas por cámaras de alta velocidad en diferentes condiciones de caudal y a distintos valores de relaciones aire-combustible (OI variables).

Efectivamente, la búsqueda de la estabilidad de una llama debe ser asegurada en estos desarrollos para lograr un estudio eficaz de sus parámetros en un sistema de combustión. Este logro fue alcanzado a través de la consideración de un sistema de coflow de anillo anular, que permite lograr un recubrimiento eficaz en todo el contorno de la llama. De esta manera, también se pone de relevancia en el presente trabajo la adecuada selección de los equipos adquiridos a través de los fondos aportados por la agencia gubernamental ANID (anteriormente Conicyt) por medio de diferentes concursos Fondecyt regulares en su mayoría.

ABSTRACT

In this thesis work, the work developed over several years is presented, and that allowed to initiate the experimental work of the EC2G group in the research laboratory of the Department of Industries. This work is focused on the search for the identification and characterization of the relevant variables that participate in the process of flame formation in gaseous fuels, deriving later to the study of liquid fuels, and even solids such as vegetable biomass.

None of the techniques applied for the studies and publications based on experimentation and carried out over the years in our study team would have been possible without having gone through the necessary stages of study, design, creation, selection and purchase of the minimum equipment necessary for it. In this sense, and from the manufacture of the experimental racks developed, it was possible to generate a research backbone from which it was possible to execute the design and manufacture of the burner systems suitable for the study. In this way, the minimum requirements necessary for a combustion system that generates stable axisymmetric flames, with replicable results and that allow an analysis by images taken by high speed cameras in different flow conditions and at different values of air-fuel ratios (variable OI) are presented.

Indeed, the search for the stability of a flame must be ensured in these developments to achieve an effective study of its parameters in a combustion system. This achievement was reached through the consideration of an annular ring coflow system, which allows to achieve an effective coating on the whole flame contour. In this way, the adequate selection of the equipment acquired through the funds provided by the governmental agency ANID (formerly Conicyt) through different regular Fondecyt competitions is also highlighted in this work.

Índice de Contenidos

RESUMEN EJECUTIVO	III
ABSTRACT	IV
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. Marco Teórico y Conceptual	3
2.1. Combustion	3
2.2. Índice de Oxígeno (OI)	4
2.3. Hollín	4
2.3.1. Características	4
2.3.2. Procesos de Formación	6
2.3.2.1. Pirólisis	6
2.3.2.2. Nucleación	6
2.3.2.3. Crecimiento superficial	7
2.3.2.4. Coalescencia y Aglomeración	7
2.3.2.5. Oxidación del hollín	7
2.4. Técnicas experimentales	7
2.4.1. Modulated Absorption/Emission (MAE)	7
2.4.2. Line of Sight Attenuation (LOSA)	8
2.4.3. Laser-Induced Incandescence (LII)	10
2.4.3.1. Modelado y procesos de la técnica de LII	11
2.4.3.2. Enfriamiento por conducción y balance de masa	12
2.4.4. Transmission Electron Microscopy (TEM)	12
2.5. Llamas laminares	13
2.5.1. Llama Laminar de Difusión	13
2.5.2. Llama Laminar de Premezcla	13
2.6. Quemadores	13
2.6.1. Quemadores de Coflujo	14
2.6.2. Quemador tipo Gülder	15
2.7. Metodología para la creación del rack	15
2.7.1. Diseño	16
2.7.2. Cálculo	16
2.7.3. Fabricación y montaje	17
2.7.4. Pruebas y ajustes	18
3. Metodología implementación rack.	19
3.1. Uso de Software 3D Pro-Engineer	19

3.2. Consideraciones en el diseño del rack experimental	20
3.3. Placas de montaje instrumental, y rack experimental	22
3.4. Diseño y cálculo de quemador	25
3.5. Diseño y cálculo de quemador	28
4. Resultados de la implementación	29
4.1. Estimación de la radiación térmica del hollín, resuelta espacialmente a partir de mediciones no intrusivas.	29
4.1.1. Condiciones experimentales	29
4.1.2. Resultados obtenidos.	30
4.1.3. Análisis del error	31
4.1.4. Conclusiones del artículo	31
4.2. Caracterización del hollín formado en una llama laminar no premezclada de combustible de aviación Jet A-1.	32
4.2.1. Condiciones Experimentales	32
4.2.2. Obtención de resultados	33
4.2.3. Análisis de error	33
4.2.4. Conclusiones del artículo	34
5. Conclusiones.	35
Bibliografía	36
A. Apéndices	40
A.1. Plano Placa 600x900 Thorlabs	41
A.2. Plano Placa 200x600 Thorlabs	42
A.3. Plano Motor Lineal Thorlabs	43
A.4. Detalles técnicos Rexroth	44

Índice de Tablas

3.1. Información técnica perfil 45 x 45 Rexroth	21
3.2. Clasificación del Número de Reynolds para diferentes regímenes de flujo. [1].	27
3.3. Calculo de Reynolds tanto para el aire como para el Etileno.	28

Índice de Figuras

2.1. Aglomeraciones de partículas de hollín observadas bajo un microscopio electrónico (TEM Sampling) [2]	5
2.2. Esquema de los pasos del proceso de formación y oxidación del hollín a partir de un combustible gaseoso. Adaptado de Curinao et al. [3]	6
2.3. Set-up experimental de la técnica MAE.	8
2.4. Set-up experimental de la técnica Laser-Induced Incandescence (LII). [4]	11
2.5. Aparato experimental para la aplicación de la técnica TEM. Fuente: [5]	12
2.6. Diseño tipo Gülder	15
3.1. Línea de montaje flexible Rexroth en la sede de Robert Bosch en Alemania	20
3.2. Vista y dimensiones de Perfil 45x45 Rexroth	20
3.3. Unión de ensamble Cubica, Tuerca autobloqueante, conector en "T"	21
3.4. Representación de flexión en perfil 45x45 Rexroth	21
3.5. Deformación por elementos finitos Placa 600x900 Thorlabs	22
3.6. Estructura Mesa con Placa 900x600 Thorlabs	22
3.7. Estructura Mesa Central con Placas 200x600 Thorlabs	23
3.8. Estructura base sistema VDM para combustibles líquidos	23
3.9. Dimensiones finales rack experimental ensamblado	24
3.10. Rack experimental con instrumentación para diagnósticos LOSA, LII y radiación en combustibles gaseosos y líquidos.	24
3.11. Quemador Gulder sin aislación	25
3.12. Corte isométrico de Quemador Gülder con carcasa aislante	26
3.13. Corte en plano vertical de quemador Gülder	26
3.14. Corte técnico en plano vertical quemador Gülder	27
3.15. Montaje para movimientos en ejes cartesianos de Quemador Gülder [6].	28
4.1. Arreglo experimental utilizado en diagnóstico MAE para medición de fracción en volumen de hollín y radiación. Fuente: [7]	30
4.2. (a) Mitad izquierda: Temperatura de hollín (T_s), Mitad derecha: Fracción en volumen de hollín (f_s). (b) Mitad izquierda: Resolución espacial de la divergencia del flujo radiativo, Mitad derecha: estimación radial de la intensidad del flujo radiativo del hollín. Fuente: [7]	30
4.3. Set-up experimental con técnica Laser-Induced Incandescence (LII).	31
4.4. Setup experimental utilizado para mediciones de absorción/emisión a diferentes longitudes de onda, en un combustible vaporizado (1) quemador, (2) adquisición de datos, (3) controlador LED, (4) manguera principal calentada, (5) fuente LED, (6) esfera de integración, (7) VDM (Bronkhorst SW-100), (8) fotodiodo, (9) generador de pulsos, (10) lentes acromáticos, (11) rueda de filtros, (12) cámara EMCCD, (13) controlador de flujo másico térmico y (14) motor lineal paso a paso.	32
4.5. Campos de (a) temperatura del hollín, (b) fracción en volumen de hollín, (c) divergencia del flujo de calor radiativo de una llama de difusión de Jet A-1 dopada con metano. [8]	33

1 | Introducción

En los últimos años, la investigación en combustión ha cobrado una gran relevancia, debido a la necesidad de afrontar desafíos energéticos globales y cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas para mitigar las emisiones contaminantes, que han mostrado ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud [9, 10]. Este proceso, fundamental en sectores industriales que van desde la generación de energía hasta la producción de bienes manufacturados, demanda una constante optimización para incrementar su eficiencia y reducir el impacto ambiental. En este contexto, una caracterización precisa de los sistemas de combustión es fundamental, lo que demanda el desarrollo de ambientes controlados que faciliten su estudio, como las llamas laminares [11].

A diferencia de las llamas turbulentas, las llamas laminares son estables y replicables, lo que permite un análisis más detallado y preciso de los fenómenos que tienen lugar durante la combustión. En particular, las llamas laminares axisimétricas, por su geometría simplificada, posibilitan la aplicación de modelos matemáticos y técnicas experimentales que contribuyen a obtener mediciones resueltas espacialmente [12]. El estudio de estas llamas permite investigar, entre otros aspectos, la eficiencia con la que se libera la energía de un combustible y las dinámicas de formación de hollín, pudiendo así, emplear el conocimiento adquirido mediante estos estudios para desarrollar sistemas de combustión más eficientes y flexibles, capaces de adaptarse a distintos tipos de combustibles y condiciones operativas, con aplicaciones en industrias que demandan sistemas de alta eficiencia energética y baja emisión de contaminantes.

Para abordar estas necesidades, este trabajo de tesis se centra en el diseño e implementación de un sistema experimental enfocado en el estudio detallado de llamas de difusión laminares, utilizando específicamente un quemador tipo Gülder [13]. Este sistema experimental está diseñado para integrar de manera eficiente una variedad de equipos e instrumentos, permitiendo así la generación y control de llamas bajo condiciones cuidadosamente controladas y ajustables. Esta configuración facilita el análisis detallado de la dinámica de combustión y la caracterización de las llamas, aportando datos esenciales para comprender y optimizar los procesos de combustión.

Además, el diseño de este sistema incluye la incorporación de técnicas avanzadas de diagnóstico que proporcionan información precisa sobre los fenómenos que ocurren en la combustión. Entre estas técnicas se encuentran Line-of-Sight Attenuation (LOSA) [14], Modulated Absorption Emission (MAE) [15, 16] y Laser-Induced Incandescence (LII), con el propósito de brindar al sistema experimental la capacidad para capturar datos precisos sobre las variables críticas del proceso de combustión, tales como la concentración de especies dentro de la llama o la cantidad de partículas de hollín, lo que contribuye a un análisis exhaustivo de las características de la llama.

La construcción de este sistema experimental ofrece una base sólida para realizar experimentos bajo configuraciones controladas, lo que permite explorar las dinámicas de combustión en diferentes condiciones y optimizar el rendimiento energético de las llamas. Esta plataforma también proporciona datos críticos para el desarrollo de modelos matemáticos y computacionales que simulen con precisión el comportamiento de las llamas, contribuyendo a la mejora de los sistemas industriales y a la optimización del uso de energía en procesos de combustión.

Este manuscrito se enmarca dentro del trabajo de tesis del autor, que le permitirá obtener el grado de *Magíster en Ciencias de la Ingeniería Industrial* de la Universidad Técnica Federico Santa María.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo fundamental de este trabajo de tesis corresponde al diseño e implementación de un rack experimental que integre un sistema de quemador, equipamiento óptico, diodos y/o láser requeridos, junto con todos los instrumentos de medición necesarios, para la caracterización de llamas laminares a través de diversas técnicas de diagnóstico no intrusivo.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar los elementos mínimos requeridos para la aplicación de diversas técnicas de diagnóstico, con la finalidad de establecer los requerimientos de espacio, instrumentación óptica, conexiones y condiciones en las que debe estar dispuesto todo el equipamiento para su correcto funcionamiento.
- Diseñar un rack experimental a través del uso del software 3D Pro-Engineer, que permita contener, previsualizar, integrar y operar todos los equipos e instrumentación necesarios para la generación y control de una llama de difusión laminar.
- Calcular y fabricar un quemador tipo Gülder aplicando herramientas 3D, que permita generar llamas laminares de combustibles líquidos y gaseosos, con capacidad de operar en relaciones estequiométricas e índices de Oxígeno diversos. Manteniendo la estabilidad de llama como requerimiento fundamental.
- Disponer el montaje de los diferentes dispositivos de medición e instrumentación para implementar los sistemas de quemadores y caracterización de llamas.

2 | Marco Teórico y Conceptual

2.1. Combustion

El proceso de la combustión ha sido siempre una herramienta fundamental para el progreso humano desde los albores de la civilización y es considerada una de las tecnologías más antiguas y cruciales para el desarrollo social. El uso del fuego y la combustión se remonta a la prehistoria, cuando los primeros humanos aprendieron a encender y controlar el fuego, lo que les proporcionó calor, luz y una mejor manera de preparar sus alimentos. Este descubrimiento no solo fue esencial para la supervivencia de la especie humana, sino que también jugó un papel crucial en su evolución, sentando las bases para su progreso.

La combustión corresponde, en términos generales, a una reacción exotérmica que se genera cuando un combustible (usualmente un hidrocarburo) y un oxidante (como el aire o el oxígeno) se combinan en presencia de una fuente de energía externa que inicia la reacción química [17, 18]. Este proceso se ha perfeccionado enormemente con el tiempo y los avances científicos y tecnológicos recientes han permitido desarrollar sistemas de combustión con altos niveles de eficiencia, control y reducción de su impacto ambiental.

En los últimos años, el estudio de la combustión ha avanzado a pasos agigantados de la mano de herramientas numéricas como la “Dinámica de Fluidos Computacional” (CFD, por sus siglas en inglés), que se basa en modelos cada vez más complejos y precisos para describir el comportamiento del proceso de combustión [19]. Estas herramientas permiten simular el flujo de fluidos, las reacciones químicas y la transferencia de calor de manera detallada, optimizando así el diseño de sistemas de combustión en diversas aplicaciones industriales, desde motores de automóviles hasta plantas de generación de energía.

Un punto de partida para comprender el proceso de combustión es la relación estequiométrica de combustibles básicos. Un ejemplo clásico es la reacción balanceada del metano con oxígeno ($\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$), que produce dióxido de carbono y vapor de agua [20]. A partir de este simple modelo, se pueden agregar múltiples complejidades al proceso de la combustión, incorporando la determinación de variables como temperatura, la energía de activación, entalpía y los diversos productos intermedios de la reacción, lo que permite modelar con mayor precisión el comportamiento real de las llamas en aplicaciones prácticas.

Este conocimiento detallado del proceso de combustión es esencial para el desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y sostenibles, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental que generan las actividades humanas. No obstante, para poder aplicar este conocimiento a sistemas reales, se requieren métodos experimentales estandarizados que permitan validar los modelos teóricos y numéricos.

Para este fin, la comunidad científica utiliza quemadores estándar en condiciones controladas en laboratorio, que reproducen los diferentes fenómenos presentes en la combustión. Un ejemplo destacado de estas configuraciones experimentales es el *International Sooting Flame* [21], un protocolo ampliamente utilizado para garantizar la repetibilidad, reproducibilidad y representatividad de los experimentos en diferentes laboratorios de investigación. Estos quemadores permiten estudiar, de manera precisa y controlada, fenómenos críticos como la dinámica de fluidos en la llama, las reacciones químicas en el frente de combustión, la transferencia de calor radiativo, la geometría de las llamas y la formación de contaminantes, como hollín y óxidos de nitrógeno. Además, permiten medir con precisión las temperaturas tanto del hollín como de los gases dentro de la llama, lo cual es fundamental para entender la eficiencia de la combustión y la formación

de emisiones contaminantes.

Una de las principales razones para utilizar estos quemadores estándares es que proporcionan una base sólida para extrapolar los resultados a sistemas más complejos, como quemadores industriales o domésticos [22]. Los fenómenos observados y comprendidos en estos entornos controlados pueden aplicarse para mejorar el diseño de quemadores en términos de su eficiencia energética, reducción de emisiones contaminantes y optimización de la transferencia de calor. De esta manera, los avances experimentales y teóricos en la comprensión de la combustión en quemadores estándar sirven como base de conocimiento que se transfiere a la ingeniería de sistemas reales, promoviendo innovaciones tecnológicas en sectores clave como la generación de energía, la calefacción y el transporte, con un enfoque creciente en la sostenibilidad y el aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos.

2.2. Índice de Oxígeno (OI)

El índice de oxígeno (OI, por sus siglas en inglés) se refiere a la concentración de oxígeno en el flujo del oxidante, el cual está compuesto por oxígeno y un diluyente. Esto puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$OI = \frac{Q_{\text{oxígeno}}}{Q_{\text{oxígeno}} + Q_{\text{diluyente}}} \quad (2.1)$$

En este trabajo, el principal oxidante utilizado es el aire, por lo que el principal diluyente es el nitrógeno, con pequeñas cantidades de dióxido de carbono, hidrógeno y algunos gases nobles, tal como se señala en [23]. El índice de oxígeno tiene efectos significativos sobre la estructura de la llama, la formación de hollín y la radiación emitida por las llamas de difusión.

Haynes y Wagener [24] afirman que, a medida que aumenta el índice de oxígeno en una llama, su tendencia a producir humo disminuye, es decir, la llama libera menos hollín en forma de humo y lo retiene en mayor medida. No obstante, un mayor índice de oxígeno también genera una mayor concentración de hollín y un incremento en la temperatura en la zona reactiva de la llama. Son justamente afirmaciones teóricas como estas que podrán ser validadas a través de la implementación de nuestros diseños.

2.3. Hollín

El hollín corresponde a las partículas de carbono formadas durante la combustión incompleta o la pirólisis de hidrocarburos. Estas partículas están compuestas principalmente de carbono, aunque también contienen pequeñas cantidades de otros compuestos orgánicos volátiles como oxígeno e hidrógeno [22].

El hollín, al igual que otros productos de la combustión incompleta, es un compuesto que puede tener efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para la maquinaria industrial. Durante la Revolución Industrial, las emisiones de hollín y otros contaminantes provenientes de fábricas generaron serios problemas de salud en las comunidades cercanas, donde la inhalación constante de estas partículas causaba irritación pulmonar y enfermedades respiratorias. Dado esto y, desde un punto de vista de salud pública, el hollín es especialmente preocupante debido a su tamaño microscópico, lo que le permite ingresar a los pulmones o, en algunos casos, llegar al torrente sanguíneo y causar efectos adversos como el aumento de los ataques cardíacos, enfermedades respiratorias graves, y, en situaciones de exposición prolongadas, el riesgo de muerte prematura [10].

2.3.1. Características

Las partículas de hollín están compuestas principalmente por átomos de carbono, con una proporción que supera el 90 %, mientras que el resto de su composición está constituido principalmente por hidrógeno

[25]. Una característica distintiva de estas partículas es su diminuto tamaño, con diámetros que generalmente oscilan entre 1 y 10 micrómetros, lo que facilita su suspensión en el aire y su inhalación, aumentando así sus efectos nocivos sobre la salud.

Por otro lado, en cuanto a su estructura interna, el hollín no es un material homogéneo, ya que se compone de dos fracciones principales: el carbono orgánico (CO) y el carbono elemental (CE). La proporción entre estas fracciones depende de varios factores, como la naturaleza del combustible, la estructura de la llama y el historial tiempo-temperatura durante el proceso de combustión [26]. El CE, a menudo denominado carbono negro, es una especie clave en la reducción de la visibilidad atmosférica debido a su alta capacidad de absorción de luz, la cual proviene de su estructura cristalina [27].

Cuando se analiza una muestra de hollín bajo un microscopio electrónico, esta se observa como una red de partículas aproximadamente esféricas entrelazadas. Los diámetros de estas partículas varían entre 100 y 2000 Å, siendo los tamaños más comunes aquellos entre 100 y 500 Å. La difracción de rayos X revela que cada partícula está formada por múltiples granos, cada uno de los cuales contiene entre 5 y 10 capas de átomos de carbono, con aproximadamente 100 átomos por capa.

Otro concepto importante en el estudio del hollín es su *madurez*, que se refiere al porcentaje de grafito presente en las partículas. La madurez del hollín es un factor clave que influye en sus propiedades físicas y químicas, como su capacidad de adsorber contaminantes y su comportamiento en procesos de combustión. Diversos estudios [28, 14] han propuesto metodologías para evaluar el grado de madurez del hollín, lo que ayuda a comprender mejor su formación y evolución en distintos entornos de combustión. Otros estudios experimentales también han abordado este fenómeno, proporcionando más datos sobre cómo la estructura interna del hollín varía según las condiciones de combustión. Estos estudios serán discutidos en secciones posteriores.

En la siguiente Figura 2.1 se presenta una imagen de partículas de hollín obtenida mediante microscopía electrónica, donde es posible observar las aglomeraciones características de las partículas.

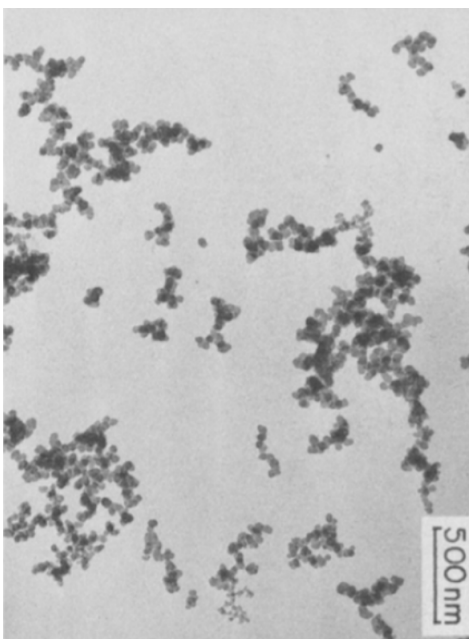


Figura 2.1: Aglomeraciones de partículas de hollín observadas bajo un microscopio electrónico (TEM Sampling) [2]

2.3.2. Procesos de Formación

El estudio del hollín es crucial no solo desde un punto de vista científico, sino también por su importancia en aplicaciones industriales, como los sistemas de propulsión. Un exceso de producción de hollín y radiación en estos sistemas puede provocar efectos adversos, especialmente en las cámaras de combustión y los componentes relacionados con los gases de escape. Además, las emisiones de hollín provenientes de turbinas y motores de combustión interna son reconocidas como uno de los principales contribuyentes al efecto invernadero [29].

La formación, crecimiento y oxidación de las partículas de hollín en las llamas de difusión implican una serie de procesos químico-físicos interrelacionados. Este proceso complejo se desarrolla en varias etapas que ocurren en diferentes zonas de la llama, como se ilustra en la Figura 2.2. Inicialmente, el proceso comienza con la pirólisis del combustible, que descompone las moléculas orgánicas en productos más simples. A continuación, se produce la nucleación, seguido del crecimiento superficial, coalescencia, aglomeración y finalmente oxidación. Cada uno de estos procesos será descrito a continuación:

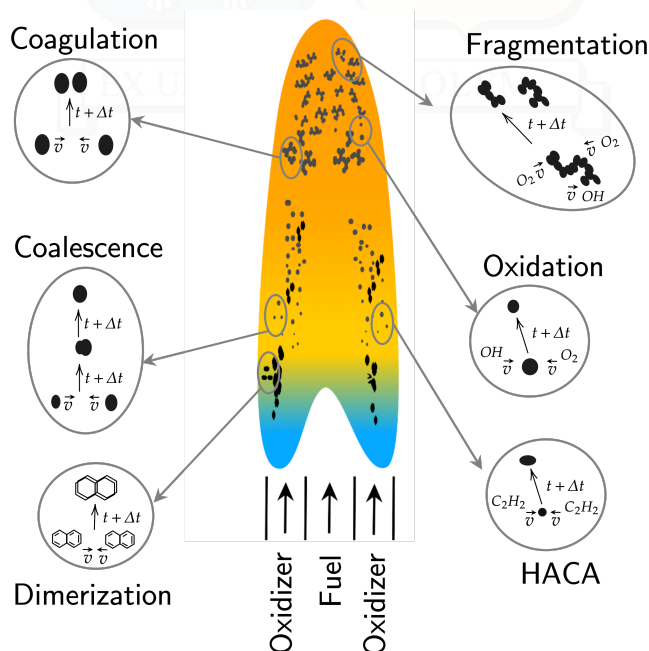


Figura 2.2: Esquema de los pasos del proceso de formación y oxidación del hollín a partir de un combustible gaseoso. Adaptado de Curinao et al. [3]

2.3.2.1. Pirólisis

La pirólisis es un proceso físico-químico generalmente endotérmico en el que los hidrocarburos alteran su estructura física y composición química a temperaturas elevadas. En esta etapa se generan precursores de hollín, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y acetileno (C_2H_2), considerados como los principales responsables de la formación inicial de hollín [30, 31].

2.3.2.2. Nucleación

Tras la pirólisis, ocurre la nucleación, donde las especies gaseosas reaccionan para formar las primeras partículas sólidas de hollín, denominadas núcleos, con diámetros de entre 1.5 y 2 nm. Este proceso es altamente

dependiente de la temperatura, ocurriendo típicamente entre 1300 y 1600 K. La nucleación está limitada a una zona cercana a la de pirólisis y precede al crecimiento superficial de las partículas [32, 33].

2.3.2.3. Crecimiento superficial

El crecimiento superficial ocurre cuando las partículas de hollín en formación aumentan su tamaño mediante la adición de hidrocarburos gaseosos, principalmente acetileno, sobre su superficie. Aunque el número de partículas no varía significativamente, su masa aumenta de forma considerable a medida que se desplazan hacia zonas más frías y menos reactivas de la llama [34].

2.3.2.4. Coalescencia y Aglomeración

La coalescencia o coagulación es el proceso en el que las partículas primarias de hollín se combinan para formar agregados más grandes. A medida que la formación de partículas progresa, estos agregados se estructuran en ramificaciones abiertas, conteniendo entre 30 y 1800 partículas primarias, con una distribución log-normal de tamaños. Este proceso se ve influenciado por la temperatura, la densidad de partículas y la energía cinética disponible [30].

2.3.2.5. Oxidación del hollín

El proceso de oxidación del hollín es crucial para reducir la cantidad de partículas que son liberadas al medio ambiente. La oxidación ocurre en la superficie de las partículas de hollín, donde el oxígeno o especies oxidantes como O_2 , O y OH reaccionan con el carbono para formar productos gaseosos como CO y CO_2 . A temperaturas superiores a 1300 K, la oxidación es más eficiente, pero el hollín tiene una notable resistencia a este proceso debido a su **estructura turbostática** [34].

En este sentido, la oxidación de las partículas pequeñas tiende a ser más rápida debido a su mayor proporción de superficie reactiva. La presencia de radicales como OH juega un papel importante en la oxidación bajo condiciones estequiométricas y ricas en combustible [7].

2.4. Técnicas experimentales

En el campo experimental, la medición de parámetros esenciales en procesos de combustión, como la temperatura, las concentraciones de especies y las propiedades del flujo, requiere el uso de técnicas que permitan obtener datos precisos sin alterar el sistema en estudio. Estos métodos, denominados técnicas experimentales no intrusivas, son cruciales para capturar información detallada sin afectar el comportamiento natural de la llama. Para este fin, se emplean dispositivos como cámaras ópticas y sistemas láser, que bajo condiciones adecuadas, posibilitan la observación y análisis de fenómenos térmicos y químicos en tiempo real, tanto en la periferia como en el interior del sistema de combustión. En esta sección se abordarán algunas de las técnicas más empleadas en el laboratorio donde se llevó a cabo este estudio, destacando su capacidad para proporcionar datos clave sin alterar el fenómeno bajo observación.

2.4.1. Modulated Absorption/Emission (MAE)

La técnica Modulation Absorption/Emission (MAE) se utiliza para determinar la fracción de volumen de hollín y el coeficiente de extinción en llamas, centrándose en la modulación de una fuente de radiación óptica. La variación en la intensidad luminosa debido a la absorción y dispersión de la luz por las partículas de hollín se cuantifica mediante la Ley Bouguer-Lambert-Beer [35], expresada en la Ecuación 2.2.

$$I_\lambda(s_1) = I_\lambda(0)e^{-\int_0^{s_1} k_\lambda ds} \quad (2.2)$$

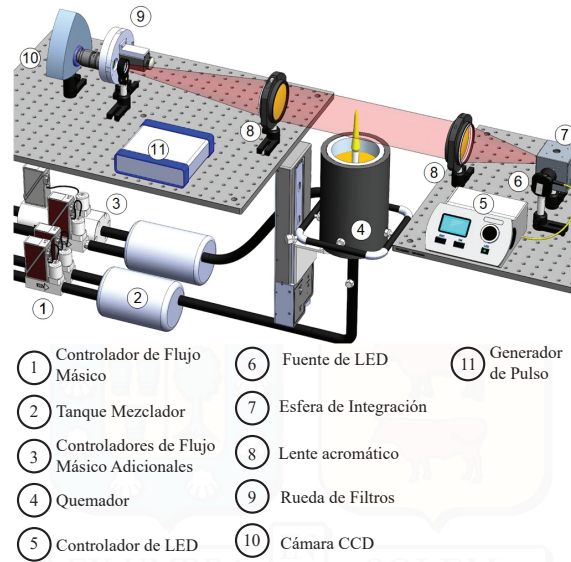


Figura 2.3: Set-up experimental de la técnica MAE.

Donde $I_\lambda(s_1)$ corresponde a la intensidad de la radiación del láser en el punto final ($s = s_1$), $I_\lambda(0)$ la intensidad en el punto inicial de visión y $k\lambda$, el coeficiente de atenuación por absorción, este último corresponde a la variable a obtener, ya que las intensidades pueden ser medidas en el laboratorio con fotodiodos.

La relación entre la fracción en volumen de hollín (f_s), el coeficiente de extinción de la llama, la longitud de onda (λ) que proviene del láser, la función de absorción (E_m) y la razón de dispersión y absorción (α_{sa}), se expresa en la Ecuación 2.3

$$f_s = \frac{k_{ext}\lambda}{6\pi E_m (1 + \alpha_{sa})} \quad (2.3)$$

Esta relación revela cómo la fracción de volumen de hollín está vinculada a propiedades que pueden ser medidas entorno a la fuente de radiación. La capacidad de controlar y medir con precisión estos parámetros permite obtener información detallada sobre la concentración y características de las partículas de hollín en la llama.

El arreglo experimental mostrado en Figura 2.3, evidencia el uso de un LED como fuente luminosa que va en dirección de la cámara CCD, a través de la llama en estudio, obteniendo de esta manera, las distintas mediciones de emisión. La técnica demanda el procesamiento posterior de las imágenes capturadas en condición de LED on y LED off en códigos Python desarrollados para estos efectos.

2.4.2. Line of Sight Attenuation (LOSA)

El estudio de la medición de temperaturas elevadas se denomina pirometría. Existen diversas formas de medir la temperatura en una llama, que incluyen técnicas intrusivas, como el uso de termocuplas, y técnicas no intrusivas, como la absorción/emisión modulada (MAE, por sus siglas en inglés). Este último método funciona bajo el mismo principio de atenuación en la línea de visión utilizado para calcular la fracción en volumen de hollín (LOSA).

Para calcular la temperatura, se pueden identificar dos métodos principales: la pirometría de un solo color y la pirometría de dos colores. Ambas técnicas permiten capturar la radiación emitida por las partículas de hollín en longitudes de onda específicas (λ) y asociar dicha emisión a la temperatura deseada.

El método de **pirometría de un solo color** es experimentalmente menos complejo, pero requiere un proceso de calibración previo de los instrumentos involucrados. En concreto, la calibración radiométrica es un método para capturar imágenes digitales y procesar los datos de las imágenes de modo que los valores de los píxeles representen medidas reales de luz [36].

Por otro lado, la **pirometría de dos colores** captura la emisión espontánea simultáneamente en dos longitudes de onda diferentes, permitiendo generar un cociente entre las señales obtenidas. Usualmente, no se requiere una calibración radiométrica, ya que ambas señales comparten los mismos parámetros geométricos (eficiencia cuántica de la cámara, ángulo de visión, etc.), lo que permite que estos factores se cancelen en el cociente.

La intensidad de radiación de emisión y absorción I_λ , desestimando los efectos de dispersión, de una llama a través de un camino óptico puede describirse con la siguiente ecuación, tomando como referencia el trabajo de Jenkins y Hanson:

$$\frac{dI_\lambda}{dl} + k_{a,\lambda}(l)I_\lambda = J_\lambda(l) \quad (2.4)$$

donde $J_\lambda = k_{a,\lambda}(r)I_{bb,\lambda}$ representa la emisión de una llama, considerando la función de Planck para obtener la intensidad radiativa de un cuerpo negro $I_{bb,\lambda}$ [37, 38, 15]. Esta intensidad está dada por la Ley de Planck:

$$I_{bb,\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (2.5)$$

Las constantes C_1 y C_2 se calculan como:

$$C_1 = \frac{2hpc^2}{\lambda^5}, \quad C_2 = \frac{hc}{k} \quad (2.6)$$

donde $k = 1,3807 \times 10^{-23}$ J/K es la constante de Boltzmann, $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J s es la constante de Planck, y $c = 2,998 \times 10^8$ m/s es la velocidad de la luz en el vacío. Resultando en:

$$C_1 = 3,742 \times 10^{-16} \text{ W m}^2, \quad C_2 = 1,4385 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad (2.7)$$

Aquí, T corresponde a la temperatura del cuerpo, en este caso, las partículas de hollín.

La solución del sistema para una posición determinada respecto al centro de una llama axisimétrica se obtiene de forma que la emisión de cuerpo negro se considera constante en cada anillo discretizado, dependiendo solo de la temperatura como incógnita. La discretización en su forma expandida toma la siguiente forma:

$$P_j(y_j) = \sum_{i=j+1}^N \left(I_{bb,i} \left[1 - \exp(-K_i \Delta l_{i,j}) \right] \exp \left(- \sum_{m=j+1}^{i-1} K_m \Delta l_{m,j} \right) \right) + \dots \quad (2.8)$$

En esta expresión, K_i representa el coeficiente de absorción $k_{a,\lambda}$ en el anillo i -ésimo, y K_m considera el efecto de autoabsorción con el segmento discretizado anterior.

Al aplicar un proceso similar al de obtención de la fracción en volumen de hollín, la expresión se puede escribir de forma matricial como:

$$A_{OP}x = b \quad (2.9)$$

donde $x = I_{bb}$ y $b = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$. La matriz AOP queda expresada de la siguiente forma:

$$A_{OP} = \begin{cases} 0 & \text{si } i < j \\ [1 - \exp(-K_i \Delta l_{i,j})] \exp\left(-\sum_{m=i+1}^{i-1} K_m \Delta l_{m,j}\right) & \text{si } i = j \\ [1 - \exp(-K_i \Delta l_{i,j})] \left(\exp\left(-\sum_{m=j}^{i-1} K_m \Delta l_{m,j}\right) - \sum_{m=j+1}^N K_m \Delta l_{m,j} + \exp\left(-\sum_{m=i+1}^N K_m \Delta l_{m,j}\right) \right) & \text{si } i > j \end{cases} \quad (2.10)$$

Resolviendo este sistema mediante el método de eliminación de Gauss-Jordan, se puede obtener la temperatura a una longitud de onda siguiendo el trabajo de L.H. Liu [39]:

$$T_m = \frac{C_2}{\lambda} \ln \left(\frac{2C_1}{I_{bb,\lambda}^5} + 1 \right) \quad (2.11)$$

De esta manera, se ha demostrado cómo obtener la temperatura del hollín mediante un enfoque directo, considerando las consideraciones geométricas apropiadas.

Entendiendo los conceptos, se puede concluir que la temperatura del hollín se determina resolviendo la ecuación de la Ley de Planck, utilizando los campos radiales de emisión de la llama J_λ y el coeficiente de absorción del hollín $k_{a,\lambda}$, medidos a 810 nm. Esta longitud de onda se prefiere para minimizar la incertidumbre de la técnica y el efecto de dispersión de la luz de las partículas de hollín.

Finalmente, tomando en cuenta la calibración de la pirometría de un solo color, la expresión para la temperatura se simplifica a:

$$T_s = -\frac{k_b \lambda}{hc} \ln \left(-\frac{1}{\lambda^5} J_\lambda \frac{2hc^2}{\gamma k_{a,\lambda}} \right) \quad (2.12)$$

donde γ es el factor de calibración explicado en la Sección 2.8. Aquí, c es la velocidad de la luz, y k_b y h son las constantes de Boltzmann y Planck, respectivamente. Esta expresión se deriva de la simplificación de la Ley de Planck, considerando que $\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \gg 1$.

Si no se tiene conocimiento de un factor de calibración γ , la pirometría de dos colores es una opción adecuada para capturar la temperatura de las partículas de hollín. En este caso, la metodología de MAE es similar, pero se basa en un cociente entre dos longitudes de onda. Siguiendo las referencias de Jenkins y Hanson [15], la expresión para la temperatura en función de dos colores se puede expresar como:

$$T_s(r) = \frac{C_2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \ln \left(\frac{I_{bb,\lambda_1}(r)}{I_{bb,\lambda_2}(r)} \right) \quad (2.13)$$

2.4.3. Laser-Induced Incandescence (LII)

La técnica de incandescencia inducida por láser (LII) es un método óptico no intrusivo que permite obtener información sobre el tamaño, concentración y distribución de partículas de hollín en llamas. Este diagnóstico se realiza mediante la detección de una señal de incandescencia emitida por las partículas de hollín tras ser calentadas por pulsos láser de alta energía, elevando su temperatura a niveles cercanos al punto de sublimación del hollín, aproximadamente a 4000 K. Este proceso de calentamiento, inducido por la absorción de energía láser, genera un balance complejo de calor y masa en la partícula.

El principio fundamental de la LII consiste en excitar partículas de hollín con un pulso láser breve, en el rango de nanosegundos, que eleva rápidamente su temperatura. A medida que las partículas se enfrían, se registra la emisión de incandescencia en distintas longitudes de onda, lo cual permite determinar parámetros importantes como el tamaño de las partículas, su concentración y su temperatura. Este método utiliza la detección de la incandescencia en dos longitudes de onda para obtener una señal espectral de incandescencia (S_{LII}), cuyo

análisis temporal revela la morfología y temperatura del hollín. La metodología propuesta por Liu et al. [40] permite obtener el diámetro geométrico y la dispersión de las partículas, entre otros parámetros.

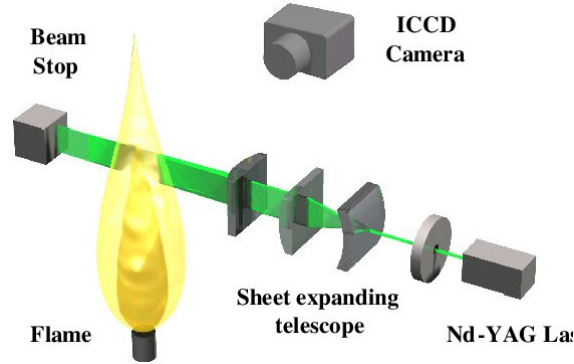


Figura 2.4: Set-up experimental de la técnica Laser-Induced Incandescence (LII). [4]

2.4.3.1. Modelado y procesos de la técnica de LII

El fundamento teórico de la LII se basa en un modelo de balance de energía transitorio que describe el cambio de temperatura en las partículas de hollín, desde el momento de absorción de energía láser hasta su enfriamiento. Este balance involucra varios mecanismos de transferencia de calor, que actúan en una escala temporal de nanosegundos, y permite una representación matemática de los procesos térmicos y de masa en la partícula.

En el modelo, se consideran algunos supuestos clave:

- Las partículas de hollín se representan como esferas monodispersas, sin interferencia entre ellas en cuanto a la absorción de energía y los mecanismos de transferencia de calor y masa.
- Se asume que cada partícula de hollín es homogénea, compuesta principalmente de grafito, manteniendo propiedades físicas y ópticas constantes durante el proceso de sublimación.
- Las propiedades ópticas como el índice de refracción $E(m)$ se consideran invariables con los cambios de temperatura.

Para describir el balance de energía, el modelo incluye términos que representan los mecanismos dominantes de transferencia de calor, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{abs} - \dot{q}_{cond} - \dot{q}_{sub} - \dot{q}_{rad} - \dot{q}_{int} = 0, \quad (2.14)$$

donde:

- $\dot{q}_{abs}$ es la tasa de absorción de radiación del láser.
- $\dot{q}_{cond}$ es la tasa de enfriamiento por conducción de calor hacia el gas circundante.
- $\dot{q}_{sub}$ es la tasa de enfriamiento por sublimación.
- $\dot{q}_{rad}$ representa la pérdida de energía por radiación.
- $\dot{q}_{int}$ es la tasa de almacenamiento de energía interna de la partícula.

El término de absorción de láser, representado por $\dot{q}_{abs} = C_a F_0 q(t)$, es clave en la generación de energía dentro de la partícula de hollín. Aquí, C_a es la sección transversal de absorción de las partículas de hollín, F_0 es la fluencia del láser (energía por área) y $q(t)$ describe la distribución temporal de la energía del pulso láser. Esta sección de absorción depende de factores como el tamaño de la partícula y el índice de refracción del hollín, m , y se simplifica para partículas mucho más pequeñas que la longitud de onda de la radiación incidente [41, 42].

2.4.3.2. Enfriamiento por conducción y balance de masa

La conducción de calor ($\dot{q}_{cond}$) representa el mecanismo principal de enfriamiento en la técnica de LII, ya que describe cómo la energía térmica en la superficie de la partícula se disipa mediante colisiones con las moléculas del gas circundante. En condiciones de baja presión, la conducción se da en el régimen molecular libre, donde la eficiencia de transferencia de calor disminuye debido a la menor cantidad de moléculas disponibles para interactuar con la partícula.

Además, el balance de masa en la LII considera la pérdida de masa de las partículas de hollín por efectos de sublimación y, en menor medida, oxidación, aunque esta última es despreciable a bajas fluencias. La ecuación general para el balance de masa es:

$$\frac{dM}{dt} = \left(\frac{dM}{dt} \right)_{sub} + \left(\frac{dM}{dt} \right)_{ox} . \quad (2.15)$$

Este modelo teórico permite una descripción precisa de los fenómenos de transferencia de calor y masa en las partículas de hollín al aplicar pulsos láser, proporcionando una herramienta útil para la caracterización de hollín en combustión y contribuyendo a mejorar la comprensión de la dinámica de hollín en entornos de llama.

2.4.4. Transmission Electron Microscopy (TEM)

La Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) es una técnica usada para analizar el hollín en llamas a nivel nanométrico [5], proporcionando información precisa sobre la morfología y tamaño de las partículas. La TEM permite obtener imágenes detalladas de las partículas de hollín, que luego se procesan para analizar características como la agregación y la estructura cristalina.

Una ecuación representativa en estudios de TEM para analizar la resolución de imagen y la distribución de partículas de hollín es:

$$\Lambda = S(d) + \frac{1}{N_{pix} \kappa} \quad (2.16)$$

Donde Λ es la resolución de imagen, $S(d)$ es una función obtenida por TEM que describe la distribución de tamaños de las partículas de hollín, N_{pix} es el número de píxeles blancos restantes tras una operación de apertura morfológica en cada iteración κ .

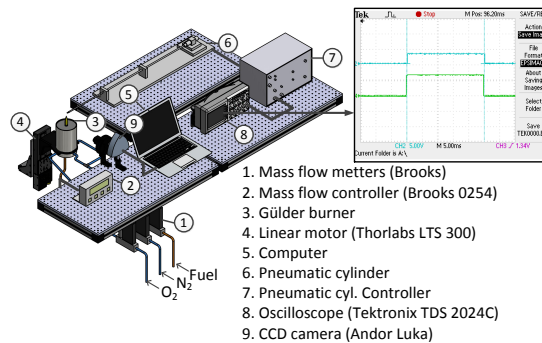


Figura 2.5: Aparato experimental para la aplicación de la técnica TEM.

Fuente: [5]

La Figura 2.5 representa el aparato experimental para obtener los datos. La información obtenida a partir de imágenes TEM acumuladas permiten trazar la curva $S(d)/S(0)$, que muestra la distribución de las partículas

y se ajusta a funciones sigmoides para analizar el tamaño promedio y el grado de agregación de las partículas de hollín.

2.5. Llamas laminares

Se les dice llamas laminares en las cuales el flujo de los gases combustibles y el comburente (como el oxígeno) es ordenado y suave, con poca o ninguna turbulencia. En este tipo de llama, las partículas de gas se mueven en capas paralelas, lo que permite un control preciso del proceso de combustión. Las llamas laminares son típicas de quemadores de laboratorio, como el quemador Gülder [13] o Bunsen [43].

Dentro de la categorías de llamas laminares, se encuentran principalmente dos: la llama laminar de difusión y la de premezcla. Cada tipo de llama laminar tiene características propias que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones, desde procesos de investigación hasta combustión industrial y aplicaciones en motores.

2.5.1. Llama Laminar de Difusión

En una llama laminar de difusión, los gases combustibles y el comburente (oxígeno) no están mezclados antes de entrar en la zona de combustión. La mezcla y, por tanto, la combustión ocurren en la interfaz donde los dos gases se encuentran y se difunden entre sí. La velocidad de combustión en este caso está limitada por la velocidad a la que los gases se mezclan, y se observa típicamente en llamas de velas y en quemadores donde el combustible se inyecta en el aire ambiente en co-flujo, por ejemplo.

2.5.2. Llama Laminar de Premezcla

En las llamas laminares de premezcla, el combustible y el comburente (oxígeno o aire) se mezclan completamente antes de llegar a la zona de combustión. En este tipo de llama, la combustión es más rápida y eficiente, ya que los reactivos están listos para reaccionar tan pronto como se inician las condiciones de combustión. Las llamas de premezcla se encuentran, por ejemplo, en mecheros de Bunsen cuando el flujo de aire está abierto [44].

2.6. Quemadores

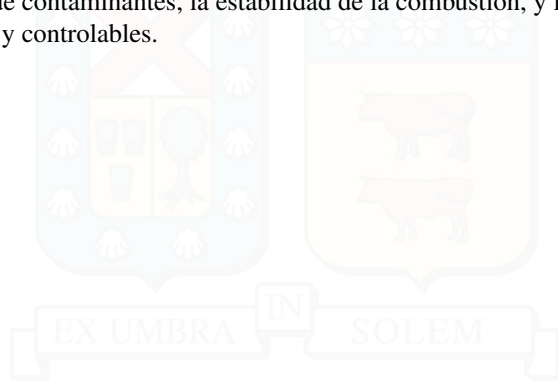
Los quemadores son dispositivos fundamentales para la transformación de energía química en energía térmica a través de la combustión de un combustible en presencia de un oxidante. Se emplean ampliamente en la industria para procesos de calentamiento, generación de energía, y transformación de materiales, además de ser esenciales en aplicaciones que demandan un control preciso de la temperatura y la composición de gases, como en la industria química, petroquímica y de materiales.

La eficiencia de un quemador, así como su capacidad de minimizar emisiones contaminantes, depende en gran medida de su diseño y de las condiciones de operación. Esto incluye aspectos como el tipo de combustible, el sistema de mezcla aire-combustible, y el control de flujo. Los quemadores industriales, por lo tanto, son diseñados para cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas, optimizando al mismo tiempo el consumo energético.

El estudio de los quemadores en el laboratorio permite explorar y entender en profundidad los procesos de combustión y las variables involucradas en diferentes configuraciones de quemadores. Esto se realiza en condiciones controladas que facilitan la medición precisa de parámetros como la temperatura de la llama, el volumen de hollín, la formación de contaminantes, y la distribución de velocidad en el campo de flujo. Dichos estudios son fundamentales para evaluar el rendimiento de un diseño, realizar mejoras y prever su comportamiento en aplicaciones industriales.

2.6.1. Quemadores de Coflujo

Los quemadores de coflujo se caracterizan por la inyección simultánea de combustible y aire en un flujo coaxial unidireccional, lo que permite un control efectivo del perfil de velocidad y de la estabilidad de la llama. Esta configuración es especialmente útil para estudiar llamas laminares y turbulentas en entornos de laboratorio, proporcionando un modelo reproducible que facilita el análisis de parámetros de combustión y transferencia de calor. Los quemadores de coflujo son ampliamente utilizados en investigaciones que buscan comprender la formación de contaminantes, la estabilidad de la combustión, y la dinámica de las llamas en condiciones bien definidas y controlables.



2.6.2. Quemador tipo Gülder

El quemador tipo Gülder es un diseño especializado utilizado en estudios de combustión, donde se busca caracterizar la estructura y dinámica de la llama en combustibles gaseosos. Este tipo de quemador es ideal para la generación de llamas premezcladas, y se emplea comúnmente en investigaciones sobre combustión y formación de contaminantes en llamas laminares. Gracias a su diseño, permite un control preciso de la mezcla de combustible y oxidante, lo que facilita la obtención de datos detallados sobre la cinética química y la estructura de la llama, aspectos esenciales para el desarrollo de modelos de combustión y la validación de simulaciones numéricas.

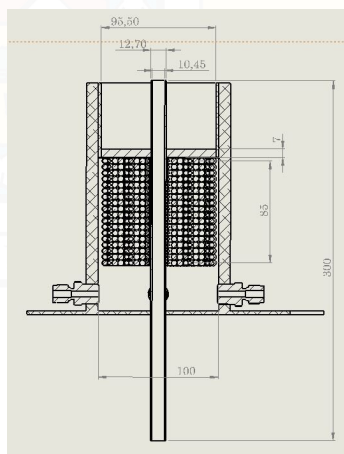


Figura 2.6: Diseño tipo Gülder [6, 13].

2.7. Metodología para la creación del rack

Rack es un término inglés que se emplea para nombrar a la estructura que permite sostener o albergar distintos dispositivos tecnológicos. Se trata de un armazón metálico que, de acuerdo a sus características, sirve para alojar una computadora, un router u otra clase de equipos. En general éstos están hechos para lograr ensamblarse y contener, en conjunto, una gran cantidad de equipos. De este modo, aquello que se entiende por rack suele ser utilizado en instituciones científicas o educativas, oficinas gubernamentales o grandes corporaciones.

Es por ello, que para crear un rack o banco de ensayos, que contenga todos los elementos requeridos para la investigación es necesario definir los tipos de técnicas que serán implementadas, como es la intensidad de la llama, absorción/emisión del hollín y de la propia llama (a través de las técnicas MAE y LOSA), incandescencia inducida por laser (LII), radiación integral de la llama, entre otras. Una vez precisado lo anterior, se deben establecer los componentes ópticos necesarios (cámaras, lentes, espejos, divisores de haz, filtros, láseres, etc.) y el espacio que debe ocupar el banco experimental en el laboratorio. Además, de asegurar de considerar el acceso y la facilidad de ajuste para los usuarios.

A continuación se detalla una metodología general para llevar a cabo la creación de un banco de ensayos, el que comienza con un diseño, selección de componentes ópticos, cálculos, fabricación, integración y montaje, y por último, pruebas y ajustes.

2.7.1. Diseño

Como paso inicial en cualquier sistema de ingeniería, es el diseño, el cual se genera por medio de un esquema o dibujo preliminar, cuyo diagrama debe indicar la ubicación de los elementos ópticos, sensores, equipos electrónicos de sincronización, generadores de luz y el camino que recorrerá cada técnica. Esto permitirá visualizar la disposición y el flujo de trabajo.

Por otra parte, si se desean realizar diversas técnicas en un mismo banco experimental, se recomienda organizar módulos independientes para cada técnica, o un diseño que permita reorganizar los elementos según las necesidades, y también permita futuras ampliaciones.

Por último, dada la disposición que tendrán los diferentes equipos y elementos, éstos requerirán de cierta estructura que soporte su peso y orientación, por lo que es importante usar materiales que minimicen las vibraciones, como plataformas de aluminio o acero para la estructura, así también planchas con soportes ajustables para los componentes ópticos.

2.7.2. Cálculo

Posterior a las actividades de diseño, se requiere continuar con el proceso de dimensionamiento o cálculo de estos componentes, los cuales estarán sujetos a los experimentos que se desean abordar. Es por ello que se deben realizar cálculos específicos en cada uno de los siguientes aspectos:

- **Cálculo de la distribución de carga:** dado que los componentes ópticos y electrónicos pueden poseer pesos elevados, es importante determinar la capacidad de carga de cada módulo del rack para asegurar que la estructura soporte adecuadamente el peso de todos los elementos en conjunto. Se recomienda para ello emplear un factor de seguridad para compensar posibles cargas dinámicas o incrementos futuros en el peso de los dispositivos.
- **Cálculo del recorrido óptico:** dado que las técnicas de medición, como la incandescencia inducida por láser (LII) y la medición de la absorción y emisión del hollín (LOSA y MAE), requieren configuraciones ópticas específicas, es necesario calcular las distancias focales y ángulos de incidencia de los elementos ópticos para asegurar una adecuada captura de datos. Esto implica seleccionar lentes y espejos con la curvatura y orientación adecuadas para minimizar la pérdida de intensidad y mejorar la precisión de las mediciones.
- **Cálculo de alineación y estabilidad:** para minimizar errores en los datos, se requiere una estructura estable que resista vibraciones o movimientos. Se deben calcular los puntos de soporte y, si es necesario, diseñar un sistema de amortiguación. En el caso de láseres, la estabilidad es especialmente crítica, por lo que se pueden añadir plataformas antivibratorias para asegurar una alineación óptica constante durante los experimentos.
- **Cálculo del espacio necesario:** dada la necesidad de incorporar múltiples técnicas experimentales en un mismo banco, es importante calcular el espacio mínimo requerido para cada módulo. Esto asegura no solo una distribución adecuada de los elementos sino también que el personal de laboratorio tenga un acceso seguro y cómodo a cada parte del equipo para realizar ajustes o mantenimiento.

Una vez definidos y evaluados estos cálculos, se puede proceder a la fabricación y ensamblaje de los módulos del rack, lo que permitirá optimizar el diseño final del banco experimental, asegurando así su estabilidad y eficiencia en el funcionamiento.

2.7.3. Fabricación y montaje

Con los diseños y cálculos completados, el siguiente paso consiste en la fabricación y montaje de la estructura y los módulos del banco de ensayos. Este proceso incluye varias etapas clave para asegurar que el rack cumpla con los requisitos de estabilidad, funcionalidad y precisión necesarios para el desarrollo de los experimentos.

- **Fabricación de la estructura:** con base en los materiales seleccionados (como aluminio por su bajo valor), se procede a la fabricación de la estructura principal, asegurando que cada módulo cuente con los soportes necesarios y la capacidad de carga. Se recomienda utilizar plataformas y estructuras antivibratorias o sistemas de anclaje entre las uniones de cada estructura, a modo de reducir la transmisión de vibraciones y asegurar la estabilidad de los componentes ópticos y electrónicos.
- **Preparación de módulos ópticos:** los componentes ópticos, tales como lentes, espejos, divisores de haz y filtros, se deben ensamblar en módulos específicos según los requerimientos de cada técnica experimental (LOSA, MAE, LII, etc.). Estos módulos deben fabricarse con materiales que permitan ajustes precisos y deben ser colocados sobre soportes ajustables para facilitar la alineación óptica.
- **Montaje de dispositivos electrónicos y de sincronización:** se colocan los dispositivos de adquisición de datos y sincronización en zonas de fácil acceso, de modo que las conexiones eléctricas y electrónicas puedan realizarse sin interferir con los elementos ópticos. Es importante asegurar que el cableado esté organizado y protegido para evitar interferencias electromagnéticas que puedan afectar la precisión de los datos.
- **Montaje de control de combustible:** se colocan los dispositivos de control de consumo de combustibles en zonas de fácil acceso, de modo que las conexiones puedan realizarse sin interferir el funcionamiento de otros componentes, ubicando estos sistemas en la parte inferior del banco experimental. Es importante asegurar que el cableado esté organizado y protegido para evitar fugas que representen un riesgo en la seguridad de trabajo.
- **Ajuste y alineación de los componentes ópticos:** una vez montados los módulos, se procede a realizar la alineación fina de los elementos ópticos. Utilizando herramientas de ajuste como niveles láser y alineadores ópticos, cada componente se orienta para optimizar el recorrido del haz de luz en cada técnica. Este paso es crucial para asegurar la precisión en los experimentos y reducir las pérdidas de señal.
- **Pruebas de estabilidad y funcionamiento:** finalmente, se realizan pruebas de estabilidad estructural y de funcionamiento para verificar que la estructura soporta adecuadamente el peso y que los módulos ópticos y electrónicos están alineados correctamente. Además, se simulan las condiciones experimentales para garantizar que todos los sistemas (ópticos, de enfriamiento y electrónicos) funcionan de manera óptima y segura.

Al concluir estas etapas, el rack o banco experimental estará listo para su calibración y los ajustes finales, permitiendo la realización de los experimentos con alta precisión y confiabilidad.

2.7.4. Pruebas y ajustes

Una vez completado el montaje, se llevan a cabo las pruebas y ajustes finales del banco experimental. Este proceso asegura que todos los sistemas funcionen de acuerdo con los requisitos específicos de los experimentos y permite realizar ajustes finos que optimicen la precisión y repetibilidad de las mediciones, los cuales también se rigen por condiciones experimentales validadas por la comunidad científica. Las etapas principales son las siguientes:

- **Calibración y verificación de los sistemas ópticos y electrónicos:** se procede a verificar cada uno de los elementos ópticos (lentes, espejos, filtros) y dispositivos electrónicos (cámaras, sensores de luz, láseres) para garantizar que las mediciones se realicen en las condiciones exactas requeridas. Esta verificación y futura calibración, incluye ajustar la distancia focal, los ángulos de incidencia y la intensidad de las fuentes de luz para que cumplan con los valores teóricos.
- **Ajuste de alineación y estabilidad de los componentes ópticos:** utilizando herramientas de ajuste fino, se verifica que la alineación de los componentes ópticos permanezca estable y precisa, especialmente en el caso de técnicas sensibles como la incandescencia inducida por láser (LII) y la medición de la emisión/absorción del hollín (LOSA y MAE). Las pruebas incluyen comprobar que no existan desviaciones en el trayecto del haz de luz debido a vibraciones o desplazamientos en la estructura.
- **Pruebas de funcionamiento bajo condiciones simuladas:** se realizan pruebas bajo condiciones experimentales simuladas para verificar que cada módulo responde adecuadamente. Esto incluye encender fuentes de luz y láseres, sincronizar cámaras y sensores, y verificar la estabilidad de los datos de adquisición en condiciones similares a las de los experimentos. También se comprueba la efectividad del sistema de enfriamiento, verificando que la temperatura de los dispositivos se mantenga dentro de los límites operativos.
- **Evaluación de la precisión de las mediciones:** se ejecutan pruebas iniciales de medición para analizar la precisión de los datos obtenidos. Esto incluye la captura de imágenes de prueba para analizar la calidad de las técnicas de diagnóstico (como la resolución espacial y la intensidad de señal en la captura de partículas de hollín) y asegurar que las lecturas de temperatura y velocidad sean consistentes y precisas. Si es necesario, se realizan ajustes adicionales en los parámetros de los dispositivos.
- **Verificación de seguridad y accesibilidad:** se revisa que el banco experimental cumpla con los estándares de seguridad, verificando que todos los componentes estén correctamente asegurados y que las conexiones eléctricas son seguras. Además, se asegura que la disposición del banco permita el acceso fácil y seguro para el personal de laboratorio, considerando la comodidad en el ajuste y mantenimiento de los equipos.
- **Ajustes finales y documentación:** después de realizar las pruebas y ajustes, se documentan las configuraciones finales de cada componente, incluyendo la posición de los elementos ópticos, los parámetros de operación de los dispositivos electrónicos, y los procedimientos de encendido y ajuste. Esta documentación es esencial para garantizar la reproducibilidad y facilitar futuras calibraciones o modificaciones del banco experimental.

Con estas pruebas y ajustes completados, el banco de ensayos queda listo para realizar experimentos con un alto grado de precisión y confiabilidad, asegurando que las condiciones experimentales sean replicables y optimizadas para obtener resultados de calidad.

3 | Metodología implementación rack.

3.1. Uso de Software 3D Pro-Engineer

Pro-Engineer (actualmente conocido como Creo) es un software de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D desarrollado originalmente por la empresa Parametric Technology Corporation (PTC). Es ampliamente utilizado en ingeniería mecánica y de productos para la creación de modelos 3D detallados y completos de piezas y ensamblajes, ofreciendo herramientas avanzadas para la parametrización, simulación y análisis de componentes en entornos virtuales. El software permite a los ingenieros y diseñadores trabajar de forma precisa, optimizando desde la fase de diseño hasta la simulación, reduciendo la necesidad de prototipos físicos. A continuación se detallan algunas de las ventajas de aplicar el software en el diseño de un aparato experimental:

- **Modelado Paramétrico:** Pro-Engineer permite crear modelos paramétricos, lo cual es útil para ajustar fácilmente dimensiones y configuraciones sin tener que rehacer el diseño. Esto es esencial en la etapa de diseño experimental, donde los componentes pueden requerir cambios o iteraciones rápidas.
- **Análisis Integrado:** El software integra módulos de análisis de elementos finitos (FEA), mecánica de fluidos computacional (CFD) y simulación estructural. Estas herramientas permiten evaluar el comportamiento del aparato experimental bajo diferentes condiciones antes de la construcción, optimizando diseño y materiales para mayor eficiencia y seguridad.
- **Bibliotecas y Componentes Estandarizados:** Pro-Engineer cuenta con una biblioteca extensa de componentes estándar (como pernos, tornillos y rodamientos), lo que facilita la creación de ensamblajes complejos al reducir el tiempo necesario para diseñar cada componente desde cero.
- **Visualización en 3D y Animación:** La capacidad de visualizar el aparato experimental en 3D y de crear animaciones para simular su funcionamiento mejora la comprensión de su comportamiento y permite detectar posibles interferencias o problemas de montaje. Esto es especialmente útil para presentar ideas o conceptos a equipos multidisciplinarios.
- **Optimización de Materiales y Costos:** A través de simulaciones y análisis de rendimiento, se pueden identificar materiales más adecuados y evaluar costos asociados. Esto es útil para cumplir con restricciones de presupuesto y reducir el desperdicio.
- **Colaboración y Gestión de Datos:** El software facilita la colaboración entre equipos mediante la gestión integrada de datos (PLM) y herramientas de compartición, que permiten un flujo de trabajo más eficiente y aseguran que todos los miembros del equipo trabajen con la versión más actualizada del diseño.

Si bien existen versiones más actualizadas del software, la versión que se dará el uso de Pro-Engineer es suficiente en el diseño de un aparato experimental.

3.2. Consideraciones en el diseño del rack experimental

La base del diseño de rack experimental está ensamblada con perfiles estructurales 45x45 (mm) de duraluminio del proveedor Rexroth (Alemania), lo cual permite una gran versatilidad en diseños y dimensionamiento. Entre las ventajas que presentan estas estructuras se encuentran:

- Alta resistencia mecánica de carga.
- Sistema simple de fijación de dispositivos en el canal o agujero central (por tuerca autobloqueante).
- Tecnologías de unión fija.
- Accesorios adaptables según requerimiento con opciones de aplicación ilimitadas.



Figura 3.1: Línea de montaje flexible Rexroth en la sede de Robert Bosch en Alemania

Desde estanterías y armazones de perfiles de aluminio hasta puestos de trabajo y montaje ergonómicos en líneas de producción totalmente automatizadas, la tecnología de montaje de Rexroth destaca por su versatilidad y mejora continua luego de décadas de desarrollo. Los componentes y perfiles de Rexroth permiten configurar un laboratorio de manera individual, con soluciones rápidas, flexibles y ampliables según nuestras necesidades.

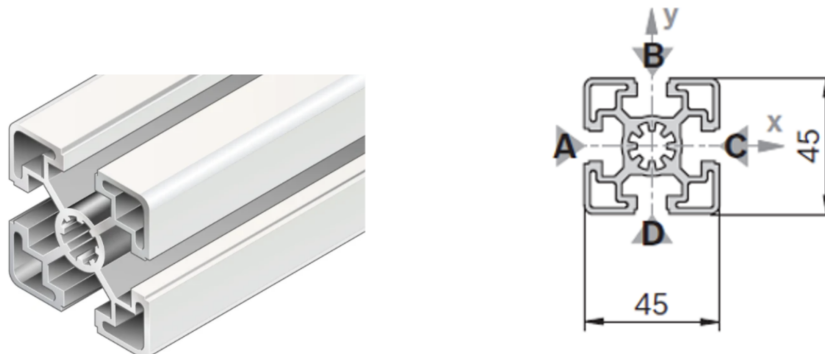


Figura 3.2: Vista y dimensiones de Perfil 45x45 Rexroth

Los principales sistemas de fijación aplicados en el rack experimental son los siguientes:

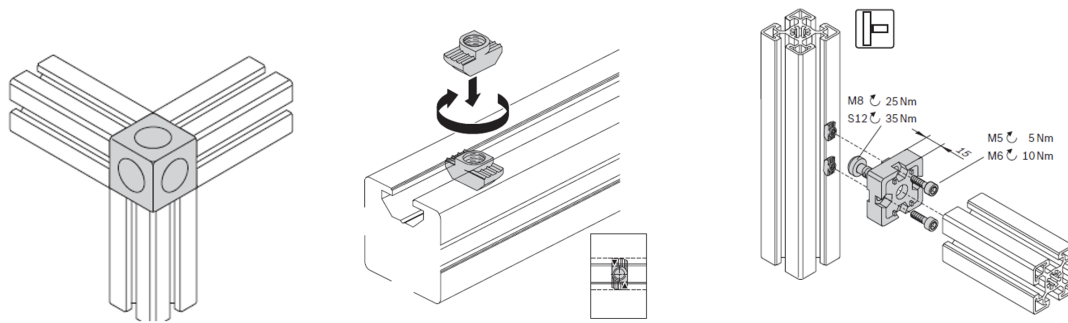


Figura 3.3: Unión de ensamble Cubica, Tuerca autobloqueante, conector en "T"

Aún cuando las solicitaciones de carga a las que serán sometidas estas estructuras no son importantes, los elevados parámetros de resistencia de los perfiles Rexroth cumplen perfectamente con las exigencias en flexión requeridas en nuestro Laboratorio.

Tipo de Perfil	Ranura (mm)	Superficie (cm ²)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	W _x (cm ³)	W _y (cm ³)	I _t (cm ⁴)	W _t (cm ³)	Masa (kg/m)
45x45	10	7.5	13.8	13.8	6.1	6.1	2.65	0.96	2.0

Tabla 3.1: Información técnica perfil 45 x 45 Rexroth

Algunos de los parámetros anteriores permiten establecer el esfuerzo por flexión que tendrá que soportar la disposición de estos perfiles en la configuración de mesa una vez ensamblada en el rack. Para ello, se utiliza el cálculo de viga en flexión empotrada en ambos extremos sometida a una carga de 1000 (N) , y considerando los valores de la Tabla 3.1, la flexión del perfil para la fuerza F señalada estará dada por:

$$f = \frac{F \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I^4 \cdot 10^4} \quad (3.1)$$

Donde f es la flexión en (mm), F es la fuerza ejercida en (N), L es la longitud del perfil utilizado equivalente a 810(mm), W es el Módulo de Sección en (cm³), I es el Momento de Inercia en (cm⁴) y E es el Módulo de Elasticidad de 70.000 (N/mm²).

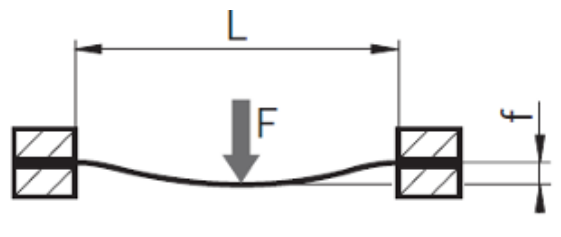


Figura 3.4: Representación de flexión en perfil 45x45 Rexroth

A manera de ejemplo, la relación 3.1 determina un valor de flexión para una carga puntual de 1000 (N) aproximadamente de $f=2,9 \cdot 10^{-5}$ (mm), lo que valida la excelencia en la resistencia de estas estructuras.

Para mayores detalles se adjunta en anexo las especificaciones técnicas del fabricante.

3.3. Placas de montaje instrumental, y rack experimental

Sobre la base estructural anterior deben disponerse placas que aseguren una óptima planicidad y versatilidad en la disposición de los componentes ópticos y equipos requeridos. De esta forma el diseño considera el uso de placas base Thorlabs de grandes dimensiones 900x600 (mm), y de 200x600 (mm). Estas placas base de aluminio sólido, no magnéticas, entregan una plataforma muy conveniente para ensamblar conjuntos ópticos prototipo, realizar experimentos y montar subsistemas pequeños. Poseen una terminación (“coating”) de anodizado negro mínimamente reflectante. Además, se encuentran perforadas con un patrón de orificios estándar cada 25 (mm) en dimensión M6 a partir de los 12,5 (mm) desde los bordes de la placa. Los orificios están roscados completamente a través de estas placas de pruebas, lo que permite que los componentes se fijen y aseguren perfectamente. Cada placa de pruebas tiene cuatro orificios de montaje que están desplazados de la matriz de orificios roscados de medida M6 creando de esta manera una superficie ininterrumpida para cualquier aplicación prevista. En la siguiente imagen podemos apreciar la mínima deformación que experimenta la placa base de 600x900 de marca Thorlabs ante una fuerza central puntual de 120(N).

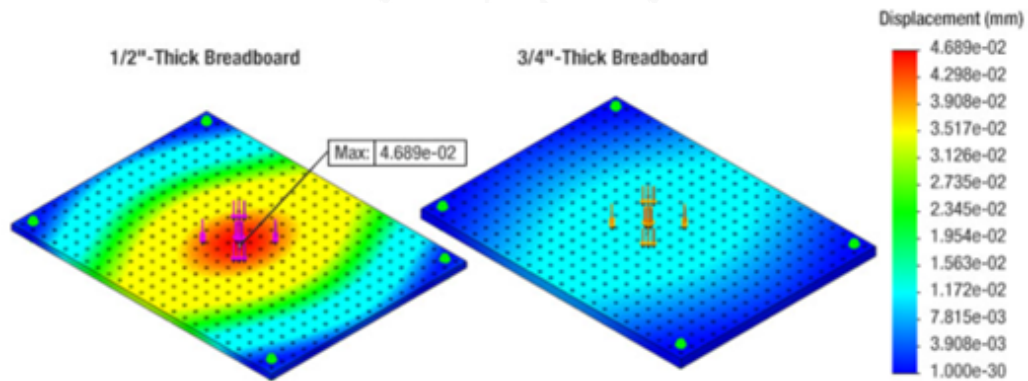


Figura 3.5: Deformación por elementos finitos Placa 600x900 Thorlabs

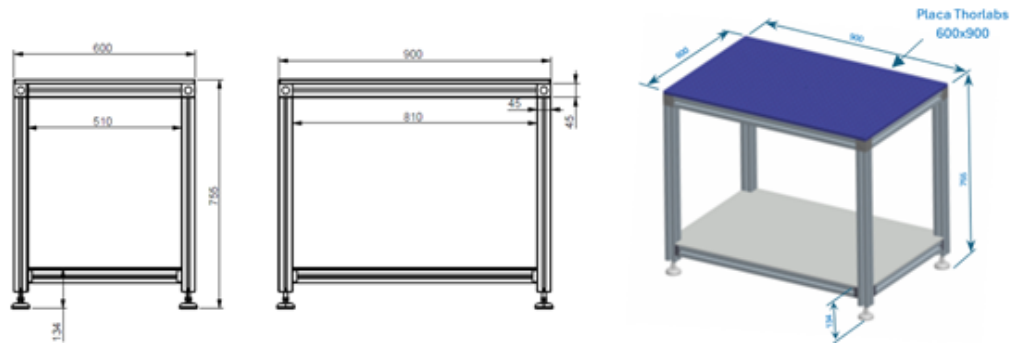


Figura 3.6: Estructura Mesa con Placa 900x600 Thorlabs

. [6].

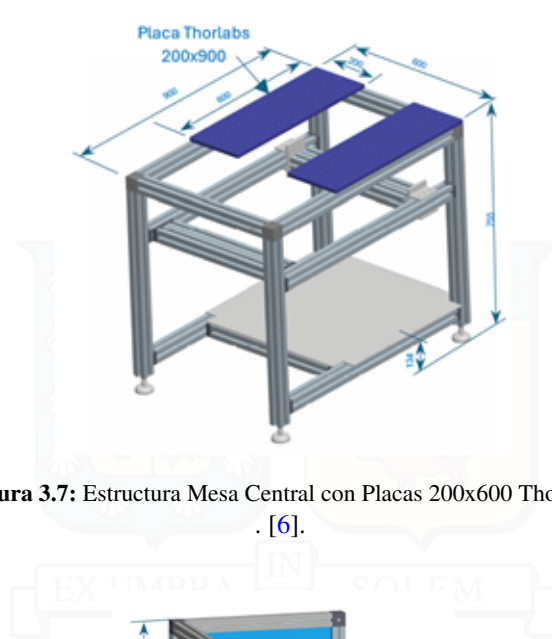


Figura 3.7: Estructura Mesa Central con Placas 200x600 Thorlabs . [6].

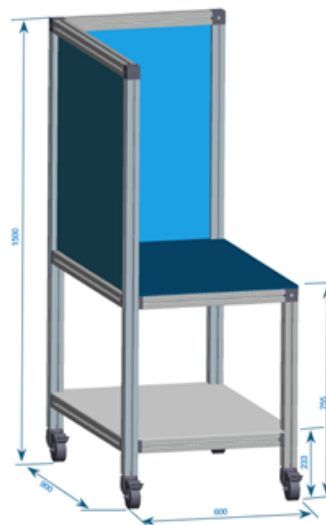


Figura 3.8: Estructura base sistema VDM para combustibles líquidos

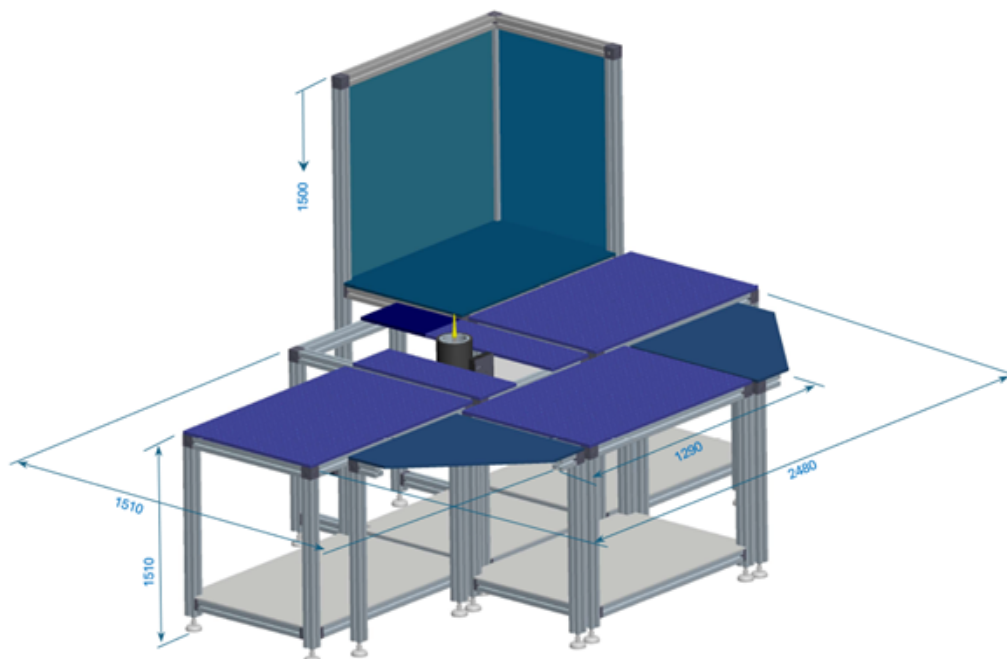


Figura 3.9: Dimensiones finales rack experimental ensamblado

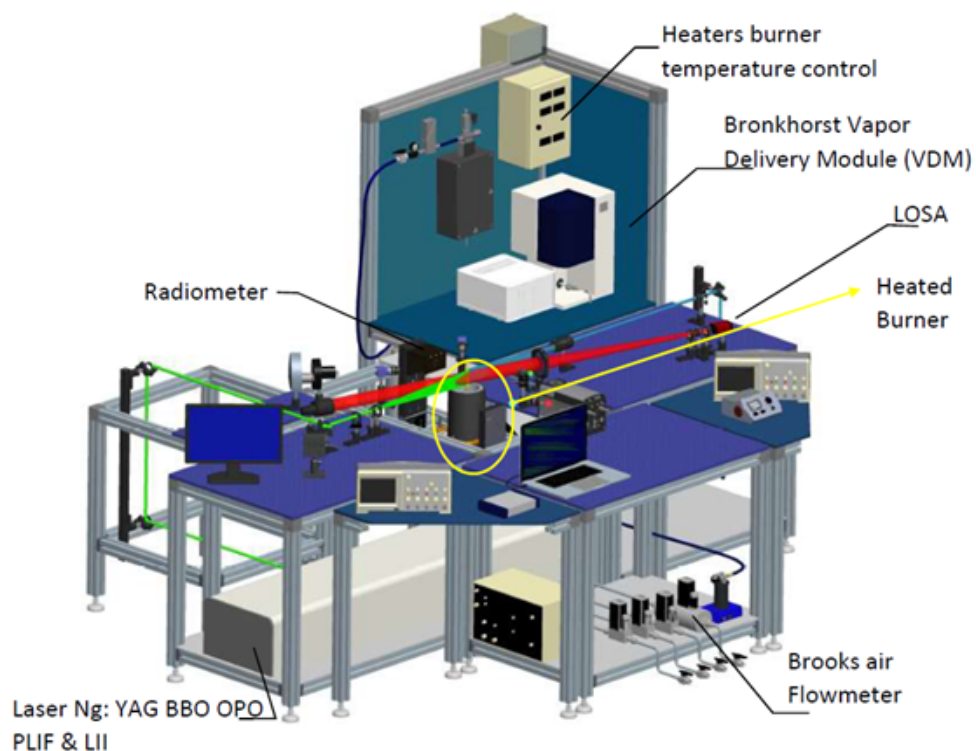


Figura 3.10: Rack experimental con instrumentación para diagnósticos LOSA, LII y radiación en combustibles gaseosos y líquidos.

3.4. Diseño, cálculos, componentes y montaje de quemador.

Anteriormente se planteó en el marco teórico algunas de las técnicas MAE, LOSA, LII que serán aplicadas en nuestro Laboratorio, a partir de ello fue posible establecer los requerimientos en cuanto a equipamiento necesario. Sin embargo la naturaleza gaseosa o líquida de los combustibles empleados que darán origen a las llamas estudiadas, también es una variable importante a considerar en el diseño del equipo quemador construido. En la sección 2.6.2 se muestra una imagen básica del equipo quemador Gülder, cuyas mejoras implementadas permiten trabajar ya sea con combustibles gaseosos o líquidos. Después de múltiples variantes estudiadas, se llegó al diseño final fabricado, el cual presenta las siguientes características:

- Capacidad de generación de llamas de difusión laminares replicables en cualquier parte del mundo.
- Gran estabilidad en la llama generada, a partir de un flujo de coflow de protección que permite su estudio y análisis por medio de imágenes tomadas con cámaras de alta velocidad.
- Capacidad de mantener bajo control una alta temperatura (150°C) en la alimentación de combustible y flujo de coflow por medio de calefactores ("heaters") eléctricos en ducto de combustible y cuerpo principal.
- Alimentación de aire de coflow a través de manifold distribuidor directo a precámara de acondicionamiento.
- Protección de quemador con aislación en Technyl aislante para mantener temperaturas de acondicionamiento (requerido especialmente en combustibles líquidos), la que además evita eventuales reflexiones indeseables de luces láser.
- Homogenización en la mezcla aire combustible facilitada por espuma de cobre metálica de 60 PPI.

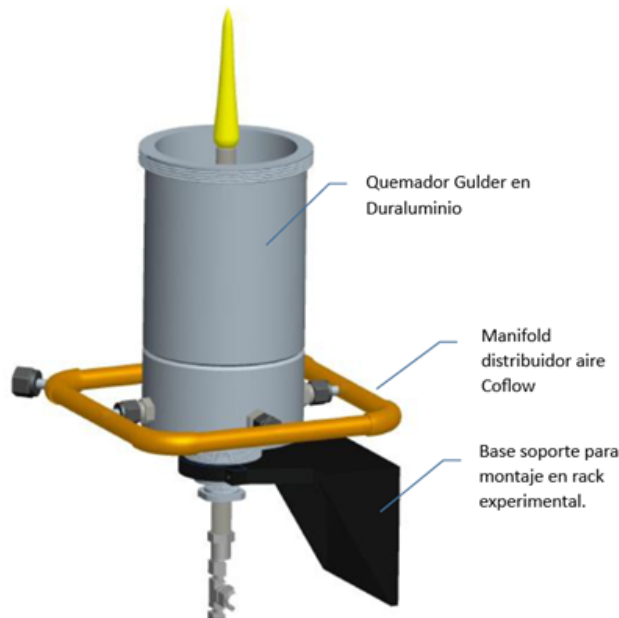


Figura 3.11: Quemador Gulder sin aislación . [6].

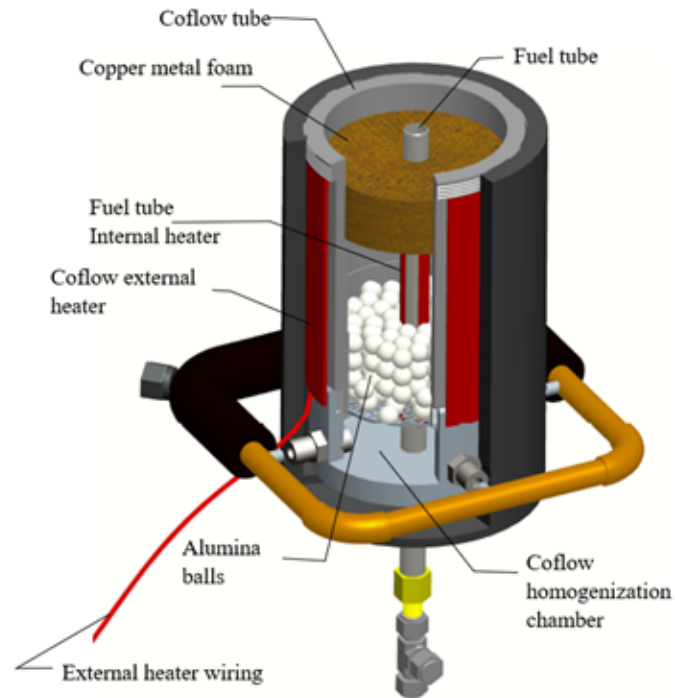


Figura 3.12: Corte isométrico de Quemador Gülder con carcasa aislante . [6].

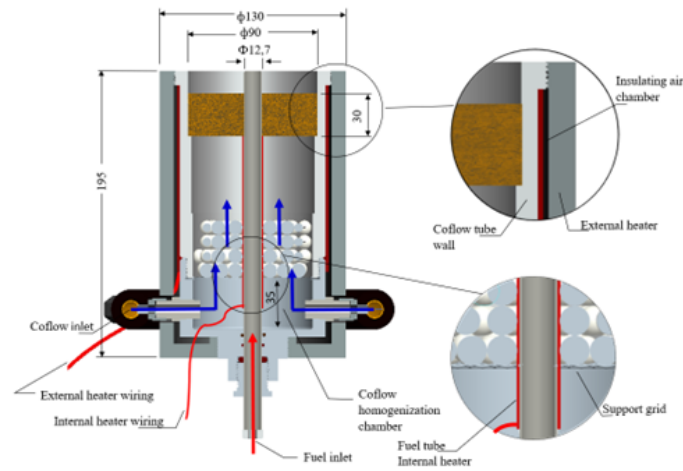


Figura 3.13: Corte en plano vertical de quemador Gülder . [6].

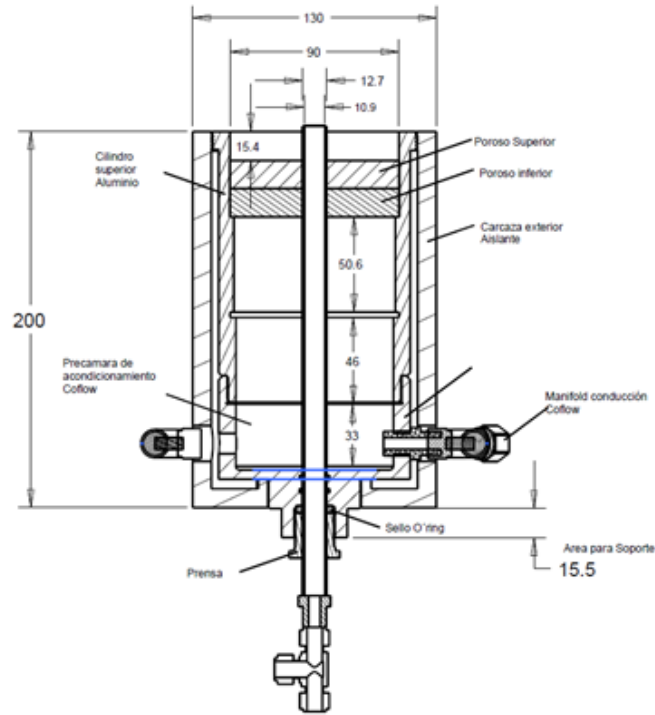


Figura 3.14: Corte técnico en plano vertical quemador Gülder . [6].

Tomando como referencia las dimensiones de la figura 3.14, y considerando los valores de caudal de aire en el coflow y de combustible de Etileno utilizados en el trabajo “Determining spatially-resolved thermal radiation from non-intrusive measurements of soot properties” de Escudero et al. [7], podemos estimar a manera de referencia y a través de relaciones conocidas las siguientes velocidades y números de Reynolds según los caudales aplicados:

$$\text{Caudal: } Q = v \cdot A \quad (3.2)$$

$$\text{Reynolds: } Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3.3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido que se está estudiando, v es la velocidad del fluido, d es el largo característico el cual para este caso corresponde al diámetro del ducto por el cual es fluido está circulando, finalmente μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Para determinar el régimen del fluido se utiliza la Tabla 3.2 la cual fue propuesta por Osborne Reynolds en el siglo XIX.

Régimen de Flujo	Número de Reynolds (Re)
Laminar	$Re < 2,300$
Transición	$2,300 \leq Re \leq 4,000$
Turbulento	$Re > 4,000$

Tabla 3.2: Clasificación del Número de Reynolds para diferentes regímenes de flujo. [1].

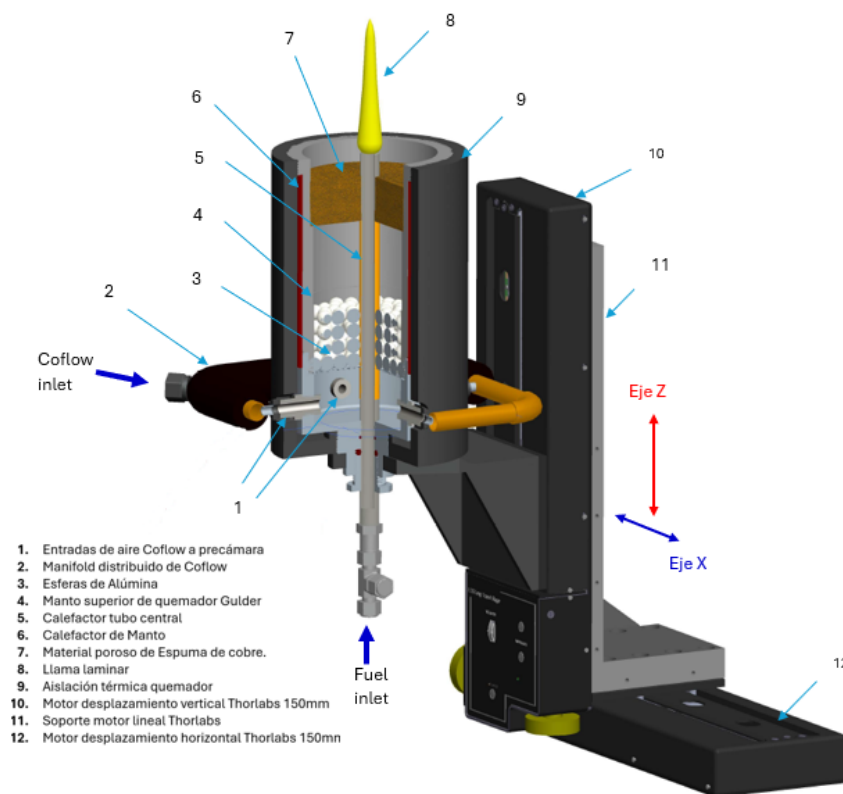
Tabla 3.3: Calculo de Reynolds tanto para el aire como para el Etileno.

Fluido	Q slpm	ρ^1 (kg/m ³)	d (m)	A (m ²)	v (m/s)	μ (Pa·s)	Re (-)
Aire	60	1,2	0,09	0,0063585	0,1572698	0,0000174	976
Etileno	0,12	1,178	0,0109	9,3266E-05	0,02144408	0,0000103	27

Según lo anterior, y como referencia para los valores dados, el fluido se encuentra en regimen laminar tanto para el caso del combustible como para el aire (comburente) coflow, ya que los números de Reynolds obtenidos son menores a 2300.

3.5. Montaje del Quemador Gülder.

Por otro lado, la figura 3.15 presenta los elementos usados para el montaje y desplazamiento en los ejes coordenados del quemador Gülder. Se destaca y aprecia la aplicación de motores lineales modelos LTS150C/M de marca Thorlabs de amplia confiabilidad y prestaciones. Los que permiten posicionar y centrar la llama en el camino óptico requerido.

**Figura 3.15:** Montaje para movimientos en ejes cartesianos de Quemador Gülder [6].

4 | Resultados de la implementación

La comprensión de las llamas involucradas en los procesos de combustión requiere el uso de técnicas de medición in situ altamente especializadas para la caracterización de sus propiedades. Entre estas propiedades se incluyen: la fracción en volumen del hollín generado (f_s) y la temperatura de la llama (T_s). En este contexto, la aplicación de técnicas de diagnóstico no intrusivo, como el análisis de emisiones moduladas (MAE) y la espectroscopía óptica de absorción (LOSA), resultan fundamentales para obtener una comprensión mínima del comportamiento de las llamas de difusión laminares generadas durante los procesos de combustión. Estas técnicas nos permiten estudiar las características térmicas y radiativas de la llama sin interferir directamente en el proceso, lo que facilita una evaluación más precisa de su comportamiento y optimización.

A continuación se presentan artículos científicos publicados cuyos resultados fueron fruto de la implementación del rack. En estos se aplican técnicas no intrusivas para la determinación de las propiedades de llamas de difusión de combustibles gaseosos y líquidos. Asimismo, análisis en distintas llamas pero con el rack experimental basado en el presente estudio, pueden ser encontrados en diversos trabajos [8, 23, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55].

4.1. Estimación de la radiación térmica del hollín, resuelta espacialmente a partir de mediciones no intrusivas.

4.1.1. Condiciones experimentales

Los resultados mostrados fueron obtenidos en nuestro laboratorio bajo las siguientes condiciones experimentales:

- **Tipo de combustible:** Caudal de gas de etileno de 0,120 (slpm) y diámetro del tubo de salida de 1,09 (cm).
- **Coflujo aplicado:** Caudal de aire con un índice de oxígeno (OI) del 21 % y caudal de 60 (slpm), con diámetro del ducto de salida de 9 (cm).

Se aplicó la técnica MAE (Modulated Absorption Emission) para obtener información sobre la distribución del campo de temperaturas (T_s) y la fracción en volumen del hollín (f_s). La medición se realizó secuencialmente en dos condiciones experimentales: con el LED encendido (LED on) y con el LED apagado (LED off), lo que permitió separar los efectos de la radiación emitida por la llama de los efectos de la radiación proporcionada por la fuente LED. Para garantizar una modulación adecuada entre la cámara y la fuente de luz LED, el arreglo experimental incorpora un generador de pulsos Quantum (equipo 11 en Figura 4.1), el cual controla la activación y desactivación del LED en sincronía con las mediciones. Esta modulación es esencial para obtener datos precisos sobre las emisiones y absorciones de radiación, permitiendo la reconstrucción del perfil térmico y la distribución del hollín a lo largo del volumen de la llama.

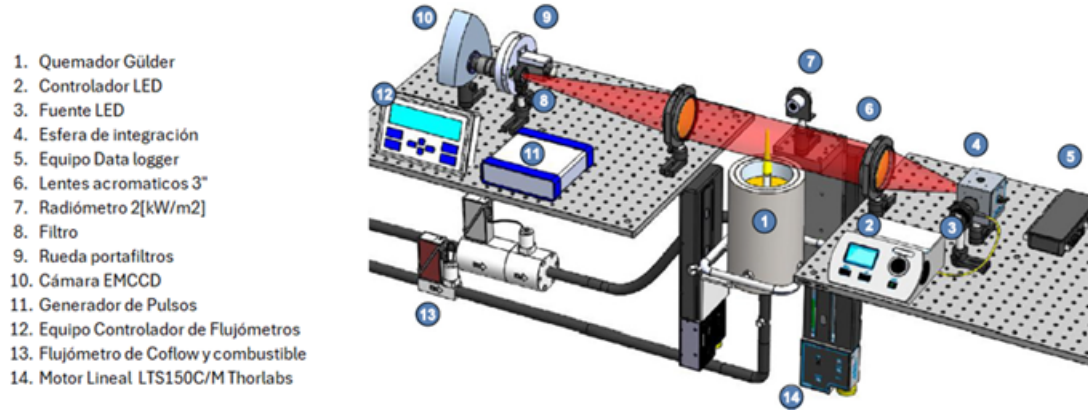


Figura 4.1: Arreglo experimental utilizado en diagnstico MAE para medicin de fraccin en volumen de holln y radiacin. Fuente: [7]

Se utilizaron tambin dos filtros "pasa banda" con longitudes de onda de $\lambda = 500$ (nm) y $\lambda = 660$ (nm), cada uno con un rango de ± 5 nm. A lo largo del experimento, se adquirieron un total de 100 imgenes, las cuales fueron procesadas posteriormente utilizando cdigos en Python. Estos cdigos incorporan diversos algoritmos avanzados, entre ellos, la deconvolucin con regularizacin de Tikhonov. Este proceso de deconvolucin se aplic a los promedios de los campos de emisin y extincin obtenidos a partir de las imgenes capturadas por la cmara CCD. Gracias a esta tcnica, se logr obtener una distribucin radial local de la emisin de holln de la llama, lo que permiti un anlisis ms preciso de las caractersticas espaciales de la distribucin del holln. La aplicacin de la regularizacin de Tikhonov fue crucial para mejorar la resolucin y reducir el ruido inherente en las imgenes, asegurando resultados ms robustos y confiables en el clculo de la distribucin radial.

4.1.2. Resultados obtenidos.

Segn lo anterior, junto con la descripcin de la tcnica MAE explicada en 2.4.1., es posible mostrar los campos determinados experimentalmente de temperatura (T_s) y fraccin en volumen del holln (f_s) para las condiciones de la llama generada.

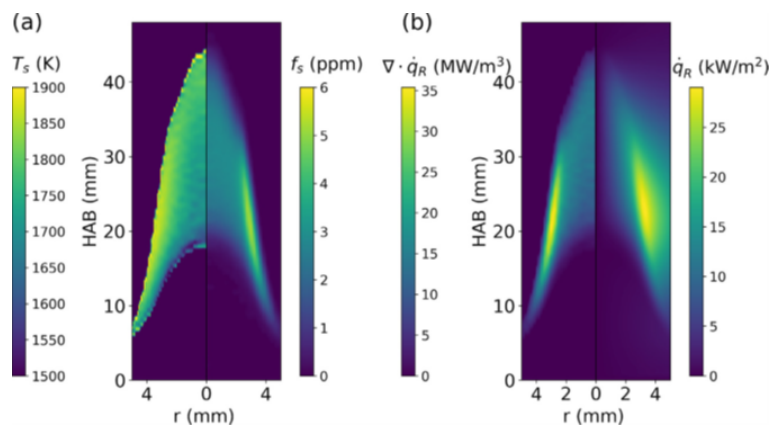


Figura 4.2: (a) Mitad izquierda: Temperatura de holln (T_s), Mitad derecha: Fraccin en volumen de holln (f_s). (b) Mitad izquierda: Resolucin espacial de la divergencia del flujo radiativo, Mitad derecha: estimacin radial de la intensidad del flujo radiativo del holln. Fuente: [7]

La información anterior de T_s y f_s permiten estimar otro parámetro importante como lo es la divergencia espacial del flujo radiativo $\nabla \cdot \dot{q}_R$ que genera el hollín del combustible Etileno utilizado. Al mismo tiempo la implementación en el rack experimental de un radiómetro de marca "Medtherm" de capacidad 2 (kW/m²), junto con la aplicación de soluciones numéricas permite estimar otros parámetros importantes generados por la presencia del hollín tal como el flujo de calor estimado $\dot{q}_R$ (kW/m²).

Según las estimaciones basadas en la Figura 4.2 es posible establecer que la mayor zona de radiación se encuentra asociada a la mayor presencia de hollín de aproximadamente 6 (ppm), por lo que no es casualidad que la mayor temperatura de 1900 K se encuentre justamente en estas zonas claramente destacadas. Al mismo tiempo se produce la mayor potencia radiativa de 35 (MW/m²).

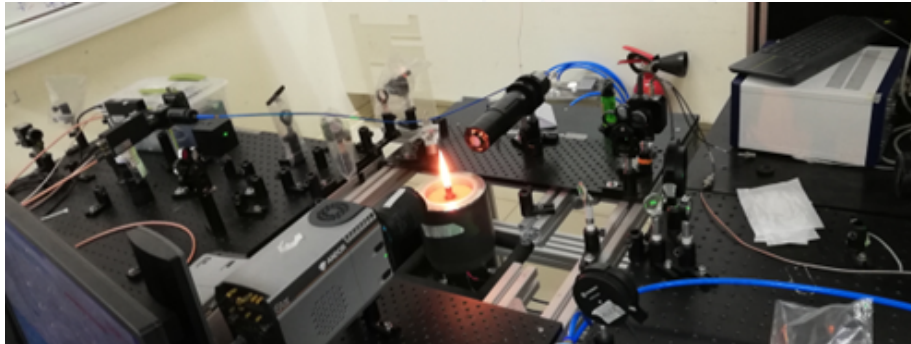


Figura 4.3: Set-up experimental con técnica Laser-Induced Incandescence (LII).

4.1.3. Análisis del error

El análisis permitió evaluar la precisión de las estimaciones de la radiación de hollín a partir de mediciones puntuales de radiómetros mediante diferentes métodos de factor de visión, comparándolos con un valor de referencia obtenido utilizando f_s y T_s como entradas en la ecuación de transferencia radiativa. Teniendo en cuenta que las estimaciones de f_s y T_s a partir de mediciones no intrusivas están sujetas a incertidumbres experimentales, se realizó un análisis de propagación de errores Monte Carlo para estimar el propagado error de f_s y T_s a $\nabla \cdot \dot{q}_R$.

Se observó que las incertidumbres en f_s y T_s procedentes de ruido experimental afectan a la radiación de referencia obtenida y a las señales simuladas que llegan a un radiómetro; por lo tanto, la precisión relativa de las estimaciones obtenidas a partir de métodos de factor de visión con respecto al valor de referencia no se espera que cambie significativamente.

De lo anterior, se rescata que los bordes visibles de la llama presentan errores significativos debido a la rápida disminución de la relación señal/ruido en estas zonas. Además errores se acumulan hacia la línea central debido al proceso de deconvolución; y que los errores más bajos para cada propiedad se encuentran en la zona de máxima fracción de volumen de hollín.

4.1.4. Conclusiones del artículo

El estudio experimental y numérico realizado permitió resolver espacialmente la radiación térmica del hollín ($\dot{q}_R$) a partir de mediciones ópticas no intrusivas de la fracción de volumen de hollín (f_s) y la temperatura (T_s) en una llama axisimétrica. Esta metodología permite calcular una señal radiométrica simulada que representa la intensidad radiativa incidente sobre una superficie, que luego puede compararse con las mediciones capturadas del radiómetro y utilizarse para calcular la fracción radiante del hollín.

Finalmente, el análisis de Monte Carlo permitió cuantificar la propagación del error en todo el procedimiento, donde los errores más grandes se encontraron en la línea central de la llama, debido al proceso de deconvolución, y en zonas con baja fracción de volumen.

4.2. Caracterización del hollín formado en una llama laminar no premezclada de combustible de aviación Jet A-1.

4.2.1. Condiciones Experimentales

Para revelar la dependencia espectral de las propiedades ópticas del hollín dentro de una llama de combustible líquido, mediciones de emisión fueron llevadas a cabo desde la región espectral visible hasta la región cercana al infrarrojo en un rango entre los 500 nm y los 810 nm.

El aparato experimental usado en esta investigación posee: LEDs pulsados (5) acoplados a una esfera integradora (6) y colimados por una lente acromática (10) que generan una fuente de luz de fondo uniforme de 70 mm de diámetro, la cual es utilizada para realizar las mediciones de extinción de la luz. Además, otra lente acromática (10) enfoca la luz de fondo atenuada (LED-on) y la emisión de la llama en una rueda de filtros (11) acoplada al objetivo de una cámara EMCCD (12). Las mediciones de extinción de la luz (LED-on) y de emisión de la llama (LED-off) se realizaron secuencialmente a cuatro longitudes de onda (500 ± 5 , 532 ± 5 , 660 ± 5 , 810 ± 5 nm), sincronizando la cámara al doble de la frecuencia del LED. Un fotodiodo rápido de silicio (8) que funcionaba a 250 Hz y estaba enfocado en la punta de la llama verificaba continuamente la estabilidad de la llama mediante el análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT).

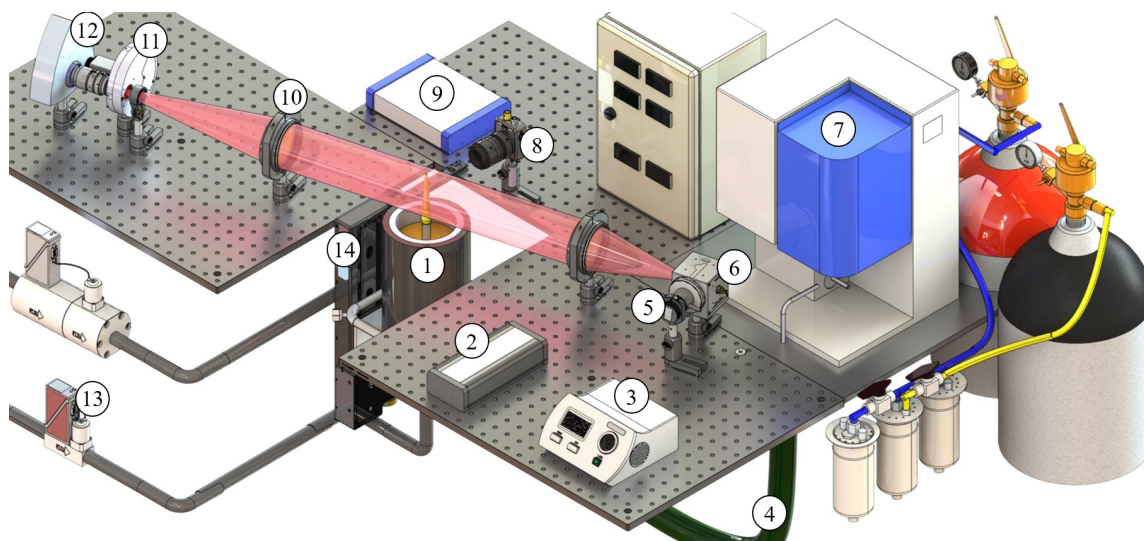


Figura 4.4: Setup experimental utilizado para mediciones de absorción/emisión a diferentes longitudes de onda, en un combustible vaporizado (1) quemador, (2) adquisición de datos, (3) controlador LED, (4) manguera principal calentada, (5) fuente LED, (6) esfera de integración, (7) VDM (Bronkhorst SW-100), (8) fotodiodo, (9) generador de pulsos, (10) lentes acromáticos, (11) rueda de filtros, (12) cámara EMCCD, (13) controlador de flujo másico térmico y (14) motor lineal paso a paso.

Por otra parte, los flujos utilizados se encuentran a continuación.

- **Tipo de combustible:** Flujo másico de JET A-1 de 4 (g/h) vaporizado a 175 C y pre-mezclado con 0.230 (slpm) de gas metano.
- **Coflujo aplicado:** Caudal de aire con un índice de oxígeno (OI) del 21 % y caudal de 150 (slpm).

4.2.2. Obtención de resultados

Se emplearon mediciones láser no intrusivas de atenuación y emisión multilongitud de onda de línea de visión (Multi-wavelength line-of-sight attenuation and emission, MW-LOSA) para cuantificar las propiedades del hollín de manera espacialmente resuelta.

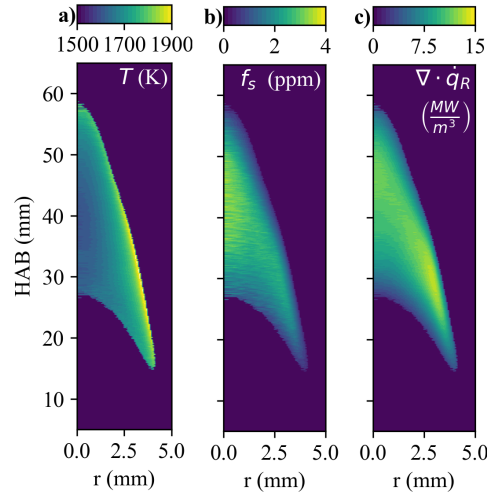


Figura 4.5: Campos de (a) temperatura del hollín, (b) fracción en volumen de hollín, (c) divergencia del flujo de calor radiativo de una llama de difusión de Jet A-1 dopada con metano. [8]

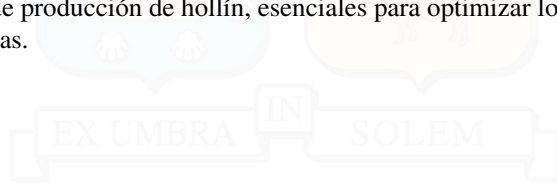
Se observó que la temperatura del hollín era similar a la de los combustibles alquenos y alcanos, aumentando radialmente hacia el borde de la llama y axialmente hacia la punta, alcanzando un máximo de 1950 K. En este trabajo también se midió el nivel de madurez (no atingente a este trabajo de tesis pero que puede ser descrita en profundidad en [14]) el cual fue mayor en regiones de alta temperatura del hollín, revelando una relación entre la temperatura y el proceso de maduración. Las partículas de hollín gráfico se encontraron predominantemente en la parte superior de la llama, cerca de la línea central y en las proximidades de las alas de la llama.

4.2.3. Análisis de error

El análisis del error en el estudio de las propiedades del hollín en la llama de Jet A-1 fue meticulosamente llevado a cabo utilizando el método de Monte Carlo para evaluar las incertidumbres asociadas con las mediciones experimentales y los valores derivados de las propiedades del hollín. Este procedimiento consideró incertidumbres de los equipos y la variabilidad en los datos obtenidos de 250 imágenes de extinción de luz y emisión de llama. Introduciendo ruido gaussiano en los datos, se generaron 75 campos perturbados para cada propiedad del hollín, permitiendo recalcular y estimar las desviaciones estándar de la temperatura, el índice de madurez β , la función de absorción y la divergencia del flujo radiativo. Los resultados mostraron que las incertidumbres eran menores en las zonas con señales más fuertes y aumentaban considerablemente en las regiones con baja relación señal/ruido y en los procesos de deconvolución, evidenciando la importancia crítica de un análisis de error robusto para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados experimentales.

4.2.4. Conclusiones del artículo

El estudio realizado sobre la caracterización de las propiedades del hollín en una llama no premezclada de coflujo laminar usando combustible Jet A-1 llevado por metano proporcionó valiosos insights sobre la propensidad a la formación de hollín, la radiación térmica y sobre la madurez del hollín. Los campos medidos de la fracción de volumen de hollín, temperatura, índice de madurez, y compuestos orgánicos y gráficos revelaron dos principales zonas de producción de hollín: a lo largo de las alas de la llama y sobre la región central superior de la llama, destacando que la máxima fracción de volumen de hollín se encuentra cerca del eje central. Este estudio también demostró cómo la temperatura influye significativamente en el proceso de maduración del hollín, indicando una fuerte dependencia de la maduración con la temperatura. Además, se observó que la radiación térmica emitida por la llama es más intensa cerca de la región de máxima fracción de volumen de hollín. Estos resultados no solo avanzan en la comprensión de la formación de hollín en combustibles comerciales como el Jet A-1, sino que también proporcionan un conjunto de datos integral para la validación de modelos de producción de hollín, esenciales para optimizar los procesos de combustión y minimizar emisiones nocivas.



5 | Conclusiones.

Se ha logrado completar exitosamente el diseño, construcción e implementación de un sistema de rack experimental resistente, modular, con capacidad de ampliación y capaz de contener la instrumentación necesaria para llevar a cabo diagnósticos no intrusivos en llamas no premezcladas.

El sistema de quemador tipo Gülder desarrollado, ha permitido generar llamas laminares muy estables y axisimétricas. Las imágenes capturadas a través de las técnicas MAE, LOSA, LII y otros diagnósticos aplicados posteriormente como TEM así lo corroboran. La estimación de los números de Reynolds calculados para los flujos de aire y combustible de Etileno, al menos nos indican que estamos efectivamente en presencia de una llama laminar para las condiciones señaladas. Esto nos permite concluir que las condiciones de estudio de este tipo de llamas son replicables, tal como lo demuestra la adaptación de un quemador tipo Gülder, basado en el diseño presentado en el presente trabajo, en el laboratorio CORIA. Esta adaptación fue llevada a cabo por el Dr. Jérôme Yon y ha permitido el estudio de llamas laminares de coflujo en diferentes artículos [14].

La versatilidad del rack implementado ha permitido llevar adelante importantes investigaciones y aportes en el ámbito de la combustión, los cuales han quedado plasmados en las numerosas publicaciones del grupo de estudio EC2G y trabajos colaborativos. Existe un reconocimiento importante de parte de la comunidad científica, de los aportes a la investigación realizados por nuestro equipo de trabajo.

Con el desarrollo experimental a través de las técnicas MAE, LOSA y LII se ha obtenido información valiosa de la fracción en volumen de hollín, temperatura de llama, y potencia radiativa para combustibles diversos tanto gaseosos como líquidos. Inclusive aplicando variaciones en la relación aire-combustible a diferentes OI.

Todo lo anterior ha permitido establecer un camino en la investigación que solo puede continuar ampliando los horizontes del conocimiento.

Bibliografía

- [1] Frank M White. *Fluid mechanics*. New York, 1990. (document), 3.2
- [2] Qingan Zhang. *Detailed modeling of soot formation/oxidation in laminar coflow diffusion flames*. University of Toronto Toronto, Canada, 2009. (document), 2.1
- [3] Jorge Curinao, Francisco Cepeda, Felipe Escudero, Seth B Dworkin, and Rodrigo Demarco. Understanding soot formation: A comprehensive analysis using reactive models in inverse non-premixed flames. *Combustion and Flame*, 267:113569, 2024. (document), 2.2
- [4] Nida Qamar, Graham Nathan, Zeyad Alwahabi, and K. King. Effects of turbulent mixing on soot sheet dimensions, 01 2005. (document), 2.4
- [5] Daniela Cortés, José Morán, Franklin Liu, F Escudero, J-L Consalvi, and Andrés Fuentes. Effect of fuels and oxygen indices on the morphology of soot generated in laminar coflow diffusion flames. *Energy & fuels*, 32(11):11802–11813, 2018. (document), 2.4.4, 2.5
- [6] Ricardo R. Castro and Luís Fernando Figueira da Silva. Experimental study of soot volume fraction and temperature of laminar non-premixed ethylene-air flames. In *COBEM 2019*, 2019. (document), 2.6, 3.6, 3.7, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15
- [7] F Escudero, R Demarco, JJ Cruz, I Verdugo, G Carvajal, G Olivares, F Valenzuela, D Han, H Lin, and A Fuentes. Determining spatially-resolved thermal radiation from non-intrusive measurements of soot properties. *Applied Thermal Engineering*, 215:118968, 2022. (document), 2.3.2.5, 3.4, 4.1, 4.2
- [8] Vincenzo Rosati, Juan Cruz, F. Escudero, Dongping Chen, and Andrés Fuentes. Soot properties characterization of aviation jet a-1 laminar non-premixed coflow flame. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 151:111092, 10 2023. (document), 4, 4.5
- [9] Manabu Shiraiwa, Kathrin Selzle, and Ulrich Pöschl. Hazardous components and health effects of atmospheric aerosol particles: reactive oxygen species, soot, polycyclic aromatic compounds and allergenic proteins. *Free radical research*, 46(8):927–939, 2012. 1
- [10] Leen Rasking, Priyanka Koshy, Eva Bongaerts, Hannelore Bové, Marcel Ameloot, Michelle Plusquin, Katrien De Vusser, and Tim S Nawrot. Ambient black carbon reaches the kidneys. *Environment International*, 177:107997, 2023. 1, 2.3
- [11] RJ Santoro, HG Semerjian, and Richard A Dobbins. Soot particle measurements in diffusion flames. *Combustion and Flame*, 51:203–218, 1983. 1
- [12] Kyle J Daun, Kevin A Thomson, Fengshan Liu, and Greg J Smallwood. Deconvolution of axisymmetric flame properties using tikhonov regularization. *Applied optics*, 45(19):4638–4646, 2006. 1
- [13] Ömer L Gülder, Kevin A Thomson, and David R Snelling. Effect of fuel nozzle material properties on soot formation and temperature field in coflow laminar diffusion flames. *Combustion and flame*, 144(1-2):426–433, 2006. 1, 2.5, 2.6

- [14] Jérôme Yon, Juan José Cruz, Felipe Escudero, José Morán, Fengshan Liu, and Andrés Fuentes. Revealing soot maturity based on multi-wavelength absorption/emission measurements in laminar axisymmetric coflow ethylene diffusion flames. *Combustion and Flame*, 227:147–161, 2021. 1, 2.3.1, 4.2.2, 5
- [15] TP Jenkins and RK Hanson. Soot pyrometry using modulated absorption/emission. *Combustion and Flame*, 126(3):1669–1679, 2001. 1, 2.4.2, 2.4.2
- [16] Guillaume Legros, Qianlong Wang, Jérôme Bonnetty, Muhammad Kashif, Céline Morin, Jean-Louis Consalvi, and Fengshan Liu. Simultaneous soot temperature and volume fraction measurements in axis-symmetric flames by a two-dimensional modulated absorption/emission technique. *Combustion and Flame*, 162(6):2705–2719, 2015. 1
- [17] Irvin Glassman, Richard A Yetter, and Nick G Glumac. *Combustion*. Academic press, 2014. 2.1
- [18] Suhas Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC press, 2018. 2.1
- [19] V Novozhilov. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion science*, 27(6):611–666, 2001. 2.1
- [20] D.P. Mishra. *FUNDAMENTALS OF COMBUSTION*. PHI Learning, 2007. 2.1
- [21] International sooting flame (isf) workshop, 2018. 2.1
- [22] Henning Bockhorn. *Soot formation in combustion: mechanisms and models*, volume 59. Springer Science & Business Media, 2013. 2.1, 2.3
- [23] Francisco Cepeda, Rodrigo Demarco, Felipe Escudero, Juan José Cruz Villanueva, Gonzalo Carvajal, and Andrés Fuentes. Influence of the oxygen index on acoustically forced laminar ethylene non-premixed flames. *Combustion and Flame*, 236:111745, 2022. 2.2, 4
- [24] Brian S Haynes and H Gg Wagner. Soot formation. *Progress in energy and combustion science*, 7(4):229–273, 1981. 2.2
- [25] G. Blanquart and H. Pitsch. Analyzing the effects of temperature on soot formation with a joint volume-surface-hydrogen model. *Combustion and Flame*, 156:1614–1626, 2009. 2.3.1
- [26] Yongming Han, Junji Cao, Shun cheng Lee, K. Ho, and Z. An. Different characteristics of char and soot in the atmosphere and their ratio as an indicator for source identification in xi'an, china. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10:595–607, 2009. 2.3.1
- [27] G. Wolff. Characteristics and consequences of soot in the atmosphere. *Environment International*, 11:259–269, 1985. 2.3.1
- [28] Mohammad Reza Kholghy, Armin Veshkini, and Murray John Thomson. The core-shell internal nanostructure of soot – a criterion to model soot maturity. *Carbon*, 100:508–536, 2016. 2.3.1
- [29] G. Kelesidis, Amogh Nagarkar, Una Trivanovic, and S. Pratsinis. Toward elimination of soot emissions from jet fuel combustion. *Environmental Science and Technology*, 57:10276 – 10283, 2023. 2.3.2
- [30] H Gg Wagner. Soot formation in combustion. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 17, pages 3–19. Elsevier, 1979. 2.3.2.1, 2.3.2.4
- [31] KO Johansson, MP Head-Gordon, PE Schrader, KR Wilson, and HA Michelsen. Resonance-stabilized hydrocarbon-radical chain reactions may explain soot inception and growth. *Science*, 361(6406):997–1000, 2018. 2.3.2.1
- [32] Lu Liu, Huajie Xu, Quan Zhu, Haisheng Ren, and Xiangyuan Li. Soot formation of n-decane pyrolysis: A mechanistic view from reaxff molecular dynamics simulation. *Chemical Physics Letters*, 760:137983, 2020. 2.3.2.2

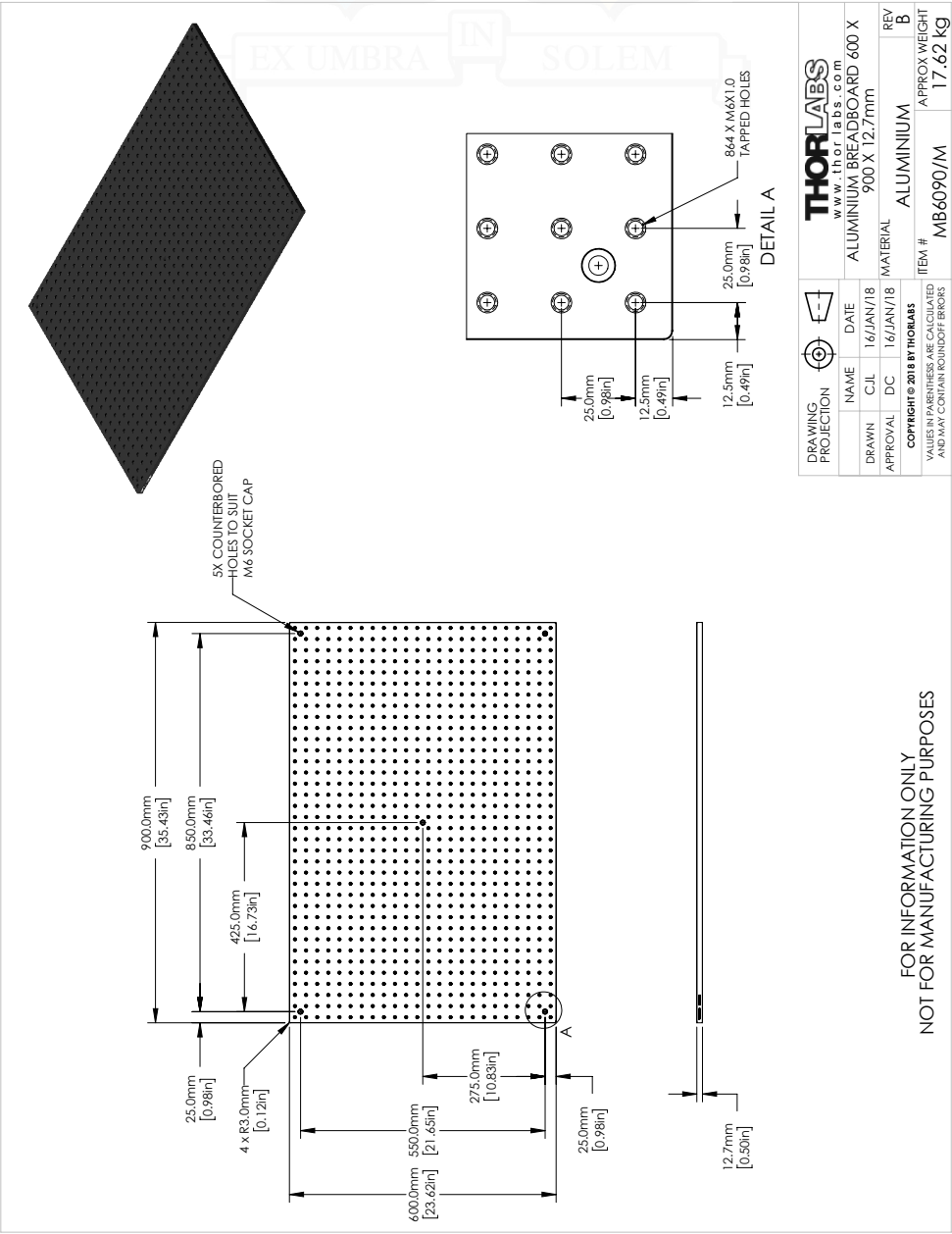
- [33] Jacob W Martin, Maurin Salamanca, and Markus Kraft. Soot inception: Carbonaceous nanoparticle formation in flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 88:100956, 2022. 2.3.2.2
- [34] Irvin Glassman. Explosive and general oxidative characteristics of fuels. *Combustion*, pages 57–118, 1996. 2.3.2.3, 2.3.2.5
- [35] Michael F Modest and Sandip Mazumder. *Radiative heat transfer*. Academic press, 2021. 2.4.1
- [36] Leonard GC Hamey. Radiometric camera calibration. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, pages 1–10, 2007. 2.4.2
- [37] Jurgen Warnatz, Ulrich Maas, Robert W Dibble, and J Warnatz. *Combustion*. Springer, 2006. 2.4.2
- [38] Sara McAllister, Jyh-Yuan Chen, and A Carlos Fernandez-Pello. *Fundamentals of combustion processes*, volume 302. Springer, 2011. 2.4.2
- [39] LH Liu and J Jiang. Inverse radiation problem for reconstruction of temperature profile in axisymmetric free flames. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 70(2):207–215, 2001. 2.4.2
- [40] Fengshan Liu, Barry J. Stagg, David R. Snelling, and Gregory J. Smallwood. Effects of primary soot particle size distribution on the temperature of soot particles heated by a nanosecond pulsed laser in an atmospheric laminar diffusion flame. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(3-4):777–788, 2006. 2.4.3
- [41] David R. Snelling, Fengshan Liu, Gregory J. Smallwood, and Ömer L. Gülder. Determination of the soot absorption function and thermal accommodation coefficient using low-fluence lii in a laminar coflow ethylene diffusion flame. *Combustion and Flame*, 136(1):180 – 190, 2004. 2.4.3.1
- [42] H. A. Michelsen. Understanding and predicting the temporal response of laser-induced incandescence from carbonaceous particles. *The Journal of Chemical Physics*, 118(15):7012–7045, 2003. 2.4.3.1
- [43] William B Jensen. The origin of the bunsen burner. *Journal of Chemical Education*, 82(4):518, 2005. 2.5
- [44] Shijie Liu. *Bioprocess engineering: kinetics, sustainability, and reactor design*. Elsevier, 2020. 2.5.2
- [45] P Pinto, M Littin, JI Rivera, G Severino, JJ Cruz, and A Fuentes. A simpler tractable contour technique to model thermal radiation from buoyant diffusion flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 149:111027, 2023. 4
- [46] M Littin, A Poux, G Lefevre, M Mazur, A Fuentes, and Jérôme Yon. On the consideration of signal trapping for soot sizing by angular light scattering in laminar flames. *Journal of Aerosol Science*, 181:106429, 2024. 4
- [47] M Littin, A Poux, G Lefevre, M Mazur, F Escudero, A Fuentes, and Jérôme Yon. Spline-based abel transform (sat) radial property reconstruction for noise and trapping correction: Application to axisymmetric sooting flames. *Fuel*, 374:132365, 2024. 4
- [48] G Severino, A Cabrera, J Contreras, P Pinto, JJ Cruz, and A Fuentes. A new burner to characterize laminar diffusion flames generated from wildland fuels. *Fire Safety Journal*, 114:102947, 2020. 4
- [49] Juan J Cruz, Felipe Escudero, Ignacio Verdugo, Paulo Rivera, Nicolás Gutiérrez-Cáceres, Jérôme Yon, and Andrés Fuentes. Sooting propensity and maturity of gasoline/anisole blends in a laminar coflow diffusion flame. *Fuel*, 345:128091, 2023. 4
- [50] Amanda García, Ignacio Verdugo, Juan J Cruz, Felipe Escudero, Valentina Yap, Javier Gallardo, Rodrigo Demarco, Jérôme Yon, and Andrés Fuentes. Effect of hydrogen addition on soot maturity and volume fraction of ethylene non-premixed flames under different oxygen indices. *Proceedings of the Combustion Institute*, 40(1-4):105539, 2024. 4

- [51] C Barrera, V Castro, F Escudero, JJ Cruz, I Verdugo, J Yon, and A Fuentes. Maturity characterization of soot in laminar coflow diffusion flames of methane/anisole under different oxygen indices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 151:111101, 2024. 4
- [52] Felipe Escudero, Victor Chernov, Juan J Cruz, Efraín Magaña, Benjamín Herrmann, and Andrés Fuentes. Robust automatic retrieval of soot volume fraction, temperature and radiation for axisymmetric flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 40(1-4):105493, 2024. 4
- [53] Nicolás Gutiérrez, Nicolás Mancilla, Juan J Cruz, Paulo Rivera, Felipe Escudero, Juan Carlos Eli-cer, Rodrigo Hernandez, Rodrigo Demarco, and Andrés Fuentes. Spatially and temporally resolved measurements of soot propensity, temperature, radiation, and cold flow velocity of laminar ethylene non-premixed flames under acoustic forced injection. *Fuel*, 371:131957, 2024. 4
- [54] Ignacio Verdugo, Juan José Cruz, Emilio Álvarez, Pedro Reszka, Luís Fernando Figueira da Silva, and Andrés Fuentes. Candle flame soot sizing by planar time-resolved laser-induced incandescence. *Scientific Reports*, 10(1):11364, 2020. 4
- [55] F Patiño, JJ Cruz, I Verdugo, J Morán, JL Consalvi, F Liu, X Du, and A Fuentes. Soot primary particle sizing in a n-heptane doped methane/air laminar coflow diffusion flame by planar two-color tire-lii and tem image analysis. *Fuel*, 266:117030, 2020. 4

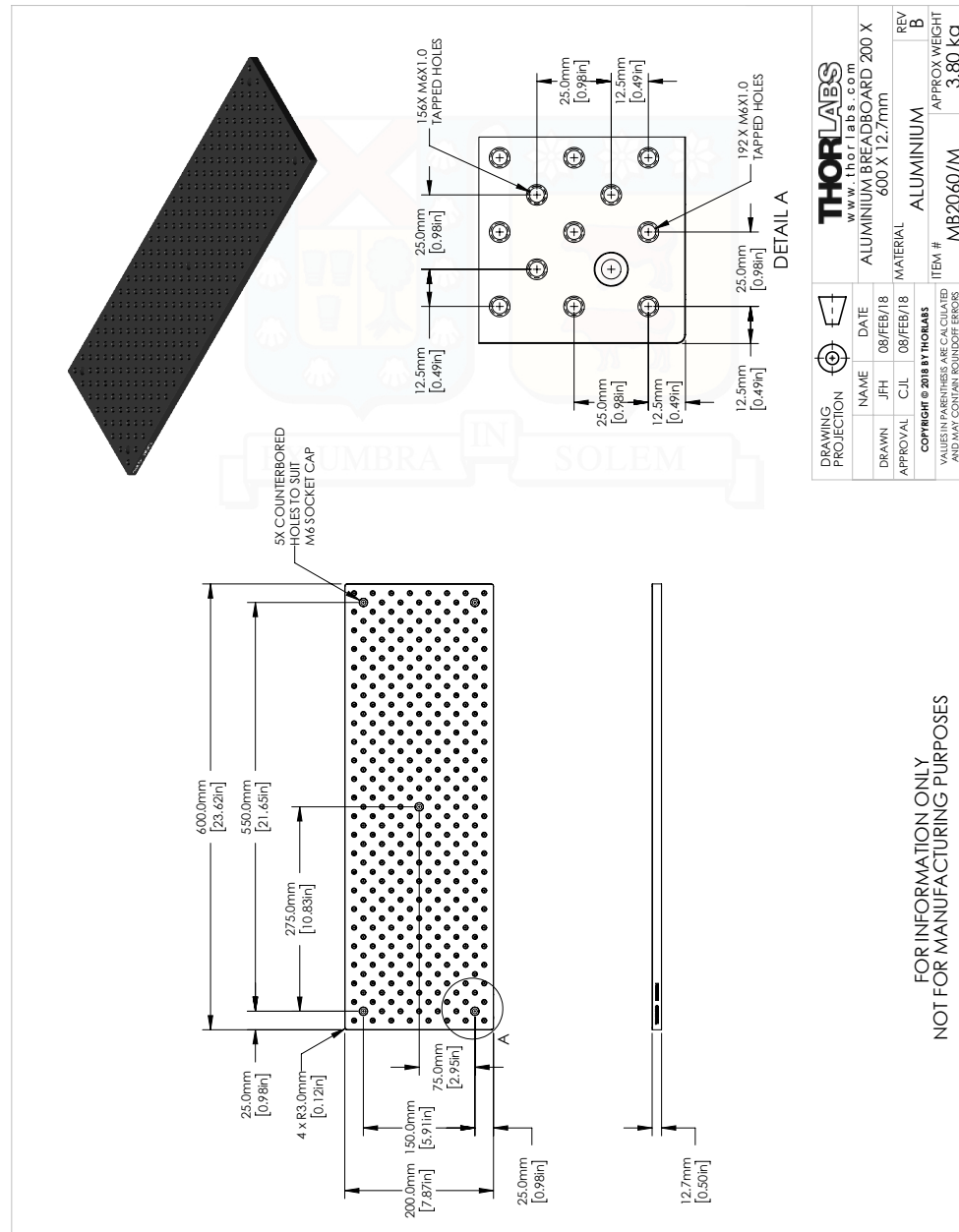


A | Apéndices

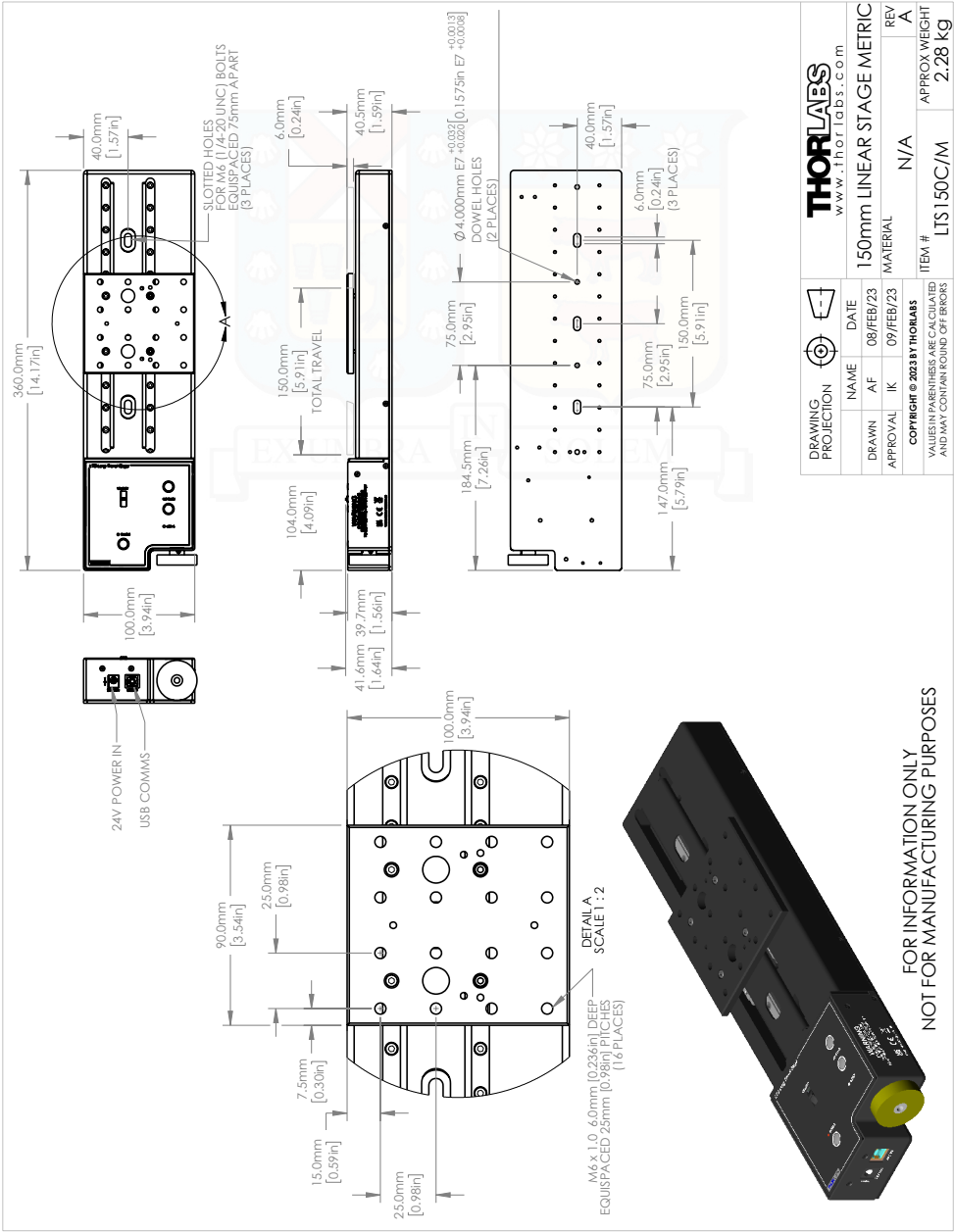
A.1. Plano Placa 600x900 Thorlabs



A.2. Plano Placa 200x600 Thorlabs



A.3. Plano Motor Linear Thorlabs



A.4. Detalles técnicos Rexroth

Perfiles de soporte | MGE 14.0 2-3

Datos técnicos: perfiles

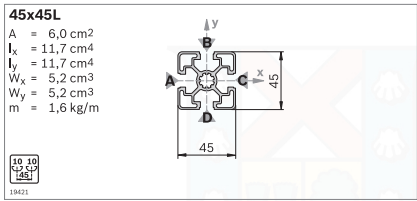
Perfil		Ranura	Superficie del perfil		Momento de inercia		Momento de resistencia		Valor característico de torsión		Masa m (kg/m)	Página
			A (cm²)	I _x (cm⁴)	I _y (cm⁴)	W _x (cm³)	W _y (cm³)	I _t (cm⁴)	W _t (cm³)			
20x20			6	1,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,08	0,17	0,4	2-11
20x20 1N			6	1,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,60	0,67	0,5	2-11
20x20 2N			6	1,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,31	0,52	0,5	2-11
20x20 2NVS			6	1,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,37	0,52	0,5	2-12
20x20 3N			6	1,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,19	0,34	0,5	2-12
20x20 R			6	1,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,21	0,39	0,4	2-12
20x40			6	2,9	4,6	1,2	2,5	1,4	0,68	0,91	0,8	2-13
20x60			6	3,5	14,2	1,7	4,7	1,7	2,30	2,00	0,9	2-13
20x40x40			6	4,2	6,0	6,0	2,6	2,6	1,50	1,30	1,1	2-13
10x40			6	2,1	3,2	0,2	1,6	0,4	–	–	0,6	2-14
30x30			8	3,1	2,8	2,8	1,8	1,8	0,29	0,33	0,9	2-16
30x30 1N			8	3,7	3,1	3,5	2,0	2,3	2,80	1,50	1,0	2-16
30x30 2N			8	3,5	2,8	3,5	2,1	2,7	1,50	1,20	1,0	2-16
30x30 2NVS			8	3,5	3,1	3,1	2,0	2,0	1,70	1,10	1,0	2-17
30x30 3N			8	3,3	3,1	2,8	2,3	2,1	0,86	0,73	0,9	2-17
30x30°			8	3,7	3,5	3,6	2,0	1,9	1,50	2,00	1,0	2-17
30x45°			8	4,0	3,6	5,1	2,1	2,3	2,10	2,40	1,1	2-18
30x60°			8	3,6	3,0	4,1	1,7	1,9	1,50	2,00	1,0	2-18
30x30 R			8	2,9	2,3	2,3	1,4	1,4	0,81	1,20	0,8	2-18
30x60			8	5,5	19,6	5,1	7,0	3,9	2,60	2,10	1,5	2-19
30x60 4N			8	5,8	20,2	5,5	6,7	3,8	4,80	2,40	1,6	2-19
30x60x60			8	8,2	26,2	26,2	7,6	7,6	6,40	3,60	2,2	2-19
30x90			8	7,7	60,7	7,3	13,5	4,9	5,10	3,80	2,1	2-20
30x120			8	9,9	136,3	9,6	22,7	6,4	7,60	5,60	2,7	2-20
30x45			8/10	4,0	8,1	3,9	3,9	2,9	1,30	1,30	1,1	2-21
60x60 8N			8	9,8	39,7	39,7	13,2	13,2	19,30	6,80	2,6	2-21
11x20			8	1,0	0,5	0,1	0,7	0,3	–	–	0,3	2-21
15x120			8	9,0	110,4	2,2	18,4	2,7	–	–	2,4	2-22
40x40L			10	5,6	9,1	9,1	4,5	4,5	1,30	0,74	1,5	2-25
40x40L ON			10	6,3	10,4	10,4	5,2	5,2	10,70	4,30	1,7	2-25
40x40L 1N			10	6,1	9,8	10,3	4,7	5,1	6,90	3,70	1,7	2-25
40x40L 2N			10	6,0	9,0	10,3	4,5	5,2	4,00	3,00	1,6	2-26
40x40L 2NVS			10	6,0	9,7	9,7	4,9	4,9	4,50	2,70	1,6	2-26
40x40L 3N			10	5,8	9,7	9,0	4,8	4,5	2,60	1,70	1,6	2-26
40x30°			10	6,2	9,4	11,8	4,7	5,9	3,00	3,10	1,7	2-27
40x45°			10	6,8	9,9	16,6	5,0	8,3	4,20	3,70	1,8	2-27
40x60°			10	6,3	8,7	13,1	4,3	6,5	3,00	3,10	1,7	2-27
40x40L R			10	5,0	7,2	7,2	3,6	3,6	2,50	2,00	1,3	2-28
40x40 HR			10	5,5	8,1	7,6	4,0	3,6	4,60	2,80	1,5	2-28

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 395 (2019-07)

2-4 MGE 14.0 | Perfiles de soporte

Perfil		Ranura	Superficie del perfil	Momento de inercia		Momento de resistencia		Valor característico de torsión		Masa m (kg/m)	Página
			A (cm²)	I _x (cm⁴)	I _y (cm⁴)	W _x (cm³)	W _y (cm³)	I _t (cm⁴)	W _t (cm³)		
40x80L		10	9,9	63,4	17,3	15,9	8,7	8,02	4,80	2,7	2-29
40x80L 2N		10	10,9	66,6	20,8	16,6	10,4	22,40	7,58	2,9	2-29
40x80L 4N		10	10,4	65,2	19,1	16,3	9,9	13,30	4,40	2,8	2-29
40x80L 2NVS		10	10,7	67,8	19,0	17,0	9,5	19,24	7,55	2,9	2-30
40x80L 3NVS		10	10,6	67,8	19,0	17,0	9,5	15,90	5,20	2,9	2-30
40x80x80L		10	15,4	96,6	96,6	24,2	24,2	19,60	9,80	4,2	2-30
40x120L		10	15,5	203,2	27,8	33,9	13,9	17,20	10,00	4,2	2-31
40x160L		10	20,5	466,7	37,2	58,3	18,6	25,80	14,60	5,5	2-31
80x80L		10	18,2	132,1	132,1	33,0	33,0	59,80	17,20	4,9	2-32
80x80L 4N		10	19,1	142,5	142,5	35,6	35,6	83,90	15,4	5,2	2-32
80x80L 4NVS		10	19,3	142,5	142,5	35,6	35,6	92,00	16,80	5,2	2-33
80x80L 6N		10	18,8	134,1	140,9	33,5	36,2	72,60	15,00	5,1	2-33
40x120x120L		10	24,6	318,0	318,0	42,2	42,2	37,10	19,00	6,7	2-33
80x120L		10	25,6	389,2	192,8	64,9	48,2	119,00	29,10	6,9	2-34
80x160L		10	32,9	850,7	253,4	106,3	63,4	182,00	41,10	8,9	2-34
45x45L		10	6,0	11,7	11,7	5,2	5,2	1,46	0,75	1,6	2-35
45x45L 0N		10	6,7	13,5	13,5	6,0	6,0	16,20	6,10	1,8	2-35
45x45L 1N		10	6,5	12,6	13,5	5,5	6,0	10,00	5,20	1,8	2-36
45x45L 2N		10	6,4	11,6	13,5	5,2	6,0	5,50	4,30	1,7	2-36
45x45L 2NVS		10	6,4	12,6	12,6	5,6	5,6	6,30	3,80	1,7	2-36
45x45L 3N		10	6,2	12,6	11,7	5,4	5,2	3,40	2,40	1,7	2-37
45x30°		10	6,9	12,7	15,2	5,0	5,3	6,60	5,70	1,9	2-37
45x45°		10	7,6	13,4	21,4	5,2	6,4	9,00	6,80	2,0	2-37
45x60°		10	6,8	11,4	16,9	4,4	5,2	6,80	4,30	1,8	2-38
45x45L R		10	4,9	8,6	8,6	5,0	5,0	3,30	2,80	1,3	2-38
45x45HR		10	6,6	11,0	10,7	4,4	4,8	7,60	3,40	1,8	2-38
45x45		10	7,5	13,8	13,8	6,1	6,1	2,65	0,96	2,0	2-39
45x60		10	11,0	37,2	22,7	12,4	10,1	6,70	4,09	3,0	2-40

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 395 (2019-07)



Tapa	Color	ESD	N.º
45x45 (1x)	Gris señales	100	3 842 548 752
45x45 (1x)	Negro	20	3 842 548 753

Material:

PP

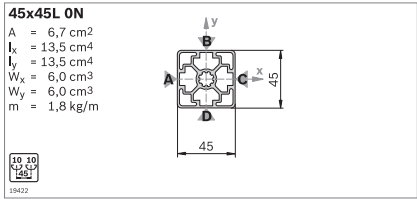
Tapa con orificio	Color	ESD	N.º
45x45 (1x)	Gris señales	20	3 842 548 796
45x45 (1x)	Negro	20	3 842 548 797

Material:

PP

Tapa ZN	ESD	N.º	FS
45x45-ZN	3 842 518 205		FS2

Material: tapa: fundición a presión de cinc
material de fijación: acero; galvanizado



Tapa: véase 45x45

45x45L	L (mm)	N.º
1 unidad	50 ... 6070	3 842 992 425 / L
1 unidad M12	60 ... 6000	3 842 992 426 / L
1 unidad M12 M12	110 ... 6000	3 842 992 427 / L
1 unidad M12 D17	90 ... 6000	3 842 992 960 / L
1 unidad D9,8 D9,8	80 ... 6000	3 842 992 967 / L
1 unidad D17	60 ... 6000	3 842 992 953 / L
1 unidad D17 D17	80 ... 6000	3 842 992 954 / L
1 unidad D17 D17V	80 ... 6000	3 842 992 956 / L
20 unidades	6070	3 842 553 611

Quick & Easy (pág. 2-7, véanse las páginas desplegables)

45x45L	3 842 993 737 / ...
Longitud L (mm)	50 ... 6070
Mecanizado de perfiles estándar L _{max} = 6000 mm (tener en cuenta la longitud mínima, pág. 2-24)	M12/D9,8/D17/ DB17/F1 (A) ¹⁾
Mecanizado individual de perfiles (L _{max} = 5400 mm)	DI/DIS/MT/MTS/ MI/MIS/DG ²⁾

¹⁾ En las ranuras mencionadas

²⁾ DG_{max} = 45°; L_{min1}/L_{min2} = 378/456 mm



45x45L 0N	L (mm)	N.º
20 unidades	6070	3 842 540 955

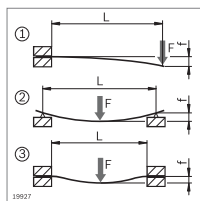
Quick & Easy (pág. 2-7, véanse las páginas desplegables)

45x45L 0N	3 842 993 761 / ...
Longitud L (mm)	50 ... 6070
Mecanizado de perfiles estándar L _{max} = 6000 mm (tener en cuenta la longitud mínima, pág. 2-24)	M12/D9,8/D17/ DB17
Mecanizado individual de perfiles (L _{max} = 5400 mm)	DI/DIS/MT/MTS/ MI/MIS/DG ¹⁾

¹⁾ DG_{max} = 45°; L_{min1}/L_{min2} = 378/456 mm

18-14 **MGE 14.0** | Datos técnicos

Flexión de los perfiles



$$f_{\text{①}} = \frac{F \times L^3}{3 E \times I \times 10^4}$$

Flexión del perfil mediante la fuerza F para los casos de carga estática ①②③

$$f_{\text{②}} = \frac{F \times L^3}{48 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\text{③}} = \frac{F \times L^3}{192 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\text{④}} = \frac{m' \times g \times L^4}{8 E \times I \times 10^4}$$

Flexión del perfil mediante el peso propio del perfil

$$f_{\text{⑤}} = \frac{5 \times m' \times g \times L^4}{384 E \times I \times 10^4}$$

$$f_{\text{⑥}} = \frac{m' \times g \times L^4}{384 E \times I \times 10^4}$$

$$\sigma_{\text{⑦}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{W \times 10^3}$$

Control de la tensión máxima producida por la flexión $\sigma_{b, \text{máx}}$

$$\sigma_{\text{⑧}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{4 W \times 10^3}$$

$$\sigma_{\text{⑨}} = \frac{(m' \times g \times L + F) \times L}{8 W \times 10^3}$$

$$\sigma_{b, \text{max}} < \sigma_{b, \text{zul.}}^1$$

 $S_{F, \text{nec.}}$: seguridad necesaria contra la deformación

$$\sigma_{b, \text{zul.}} = \frac{R_{p0.2}}{S_{F, \text{erf.}}}$$

 $\sigma_{b, \text{adm.}}$: tensión máxima admisible producida por la flexión

f (mm)

F (N)

L (mm)

I (cm⁴)W (cm³)E = 70000 N/mm²

m' (kg/mm); m' = m/1000; m (pág. 2-3...2-6)

g = 9,81 m/s² ≈ 10 m/s²

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 395 (2019-07)