



Universidad de Valladolid

INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE
COMBUSTIÓN PREMEZCLADA MEDIANTE
TÉCNICAS SCHLIEREN**

Autor:

Rodríguez Cubillo, Adrián

Tutor:

Dr. Melgar Bachiller, Andrés
Ingeniería Energética y Fluido
mecánica

Valladolid, diciembre 2016.



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid

INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid

RESUMEN DEL TFG

En este Trabajo de Fin de Grado se ha instalado un equipo de visualización basado en el método Schlieren para observar el proceso de combustión premezclada en una cámara de combustión a volumen constante en el laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.

La instalación se ha realizado mediante la fabricación de la estructura principal y el ajuste del sistema óptico para obtener los resultados deseados. También se ha puesto a punto la instalación eléctrica para el registro de presiones y el salto de la chispa.

La introducción de la mezcla en la cámara de combustión se realiza mediante el método de presiones parciales para ello se utilizan captadores de presión y un sensor de temperaturas que se registran mediante un programa desarrollado en LabView.

PALABRAS CLAVE

Schlieren, cámara de alta velocidad, combustión premezclada y óptica y refracción.

ABSTRACT

In this Final Degree Work, a visualization equipment based on the Schlieren method has been installed to observe the combustion process premixed in a combustion chamber at constant volume in the laboratory of Machines and Thermal Motors of the E.T.S. Of Industrial Engineers of the University of Valladolid.

The installation has been made by manufacturing the main structure and adjusting the optical system to obtain the desired results. The electrical installation has also been set up for the recording of pressures and the jump of the spark.

The introduction of the mixture into the combustion chamber is done by the partial pressure method. Pressure sensors and a temperature sensor are used to record them using a program developed in LabView.

KEY WORDS

Schlieren, high speed camera, combustion chamber, premixed combustion, optics and refraction.



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid

INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

INDICES



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1.	INTRODUCCIÓN	9
1.2.	OBJETIVOS GENERALES	9
1.3.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
2.	SISTEMA SCHLIEREN	13
2.1.	INTRODUCCIÓN	13
2.2.	ANTECEDENTES HISTORICOS.....	13
2.3.	ANTECEDENTES FISICOS	14
2.3.1.	ÓPTICA.....	14
2.3.2.	REFLEXIÓN	15
2.3.3.	REFRACCIÓN	16
2.3.4.	DIFRACCIÓN.....	17
2.3.5.	ESPEJOS PLANOS	18
2.3.6.	ESPEJOS PARABÓLICOS ESFÉRICOS	19
2.4.	FUNDAMENTOS.....	19
2.5.	MEJORAS EN LA RESOLUCIÓN.....	28
2.5.1.	RESOLUCIÓN ESPACIAL	28
2.5.2.	RANGO DINÁMICO	28
2.5.3.	EL RUIDO	29
2.6.	COMPARACION DE INTERFEROMETRIA, SCHLIEREN Y SHADOWGRAFIA	29
2.7.	ELEMENTOS.....	30
2.8.	TIPOS DE MONTAJES	30
2.8.1.	MONTAJES CON LENTES.....	31
2.8.2.	MONTAJE CON ESPEJOS	32
2.8.3.	SEMEJANZAS EN LOS DIFERENTES SISTEMAS	34
3.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	37
3.1.	INTRODUCCIÓN	37
3.2.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA.....	38
3.2.1.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN	38
3.2.2.	VENTANAS DE SÍLICE FUNDIDO	39



3.2.3.	RESISTENCIAS	41
3.2.4.	BUJÍAS.....	42
3.3.	SENSORES DE PRESIÓN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	44
3.4.	LÍNEA DE GASES.....	48
3.4.1.	GASES	48
3.4.2.	PANEL DE CONTROL DE GASES.....	49
3.4.3.	ENTRADA-SALIDA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.....	50
3.4.4.	BOMBA DE VACÍO.....	51
3.4.5.	VISUALIZACIÓN PRESIÓN CÁMARA COMBUSTIÓN	52
3.5.	INSTRUMENTACIÓN ÓPTICA	53
3.5.1.	SOPORTE DE LA ESTRUCTURA.....	53
3.5.2.	RAIL ÓPTICO	56
3.5.3.	BASE DE MONTANTES DESLIZANTE PARA RAIL ÓPTICO.....	57
3.5.4.	SECCIÓN SOPORTE PARA EL ESPEJO.....	59
3.5.5.	ESPEJOS PARABÓLICOS	60
3.5.6.	MONTURA DE GRAN APERTURA	61
3.5.7.	FUENTE DE LUZ.....	62
3.5.8.	FIBRA ÓPTICA Y ADAPTADOR	63
3.5.9.	CÁMARA	64
3.5.10.	OBJETIVO	64
3.5.11.	DISPARO CÁMARA.....	65
3.5.12.	SOPORTE DE LA CÁMARA.....	65
3.5.13.	CUCHILLA.....	67
3.5.14.	SISTEMA DE ADQUISIÓN DE IMAGENES.....	67
3.6.	DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS	68
3.7.	SINCRONIZACIÓN	70
3.8.	PUESTAS A PUNTO	70
4.	RESULTADOS	75
4.1.	EXPERIMENTO	76
4.2.	COMPARACIÓN CON DIFERENTES DOSADOS.....	77
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	81
5.1.	CONCLUSIONES	81
5.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	81



6.	BIBLIOGRAFÍA	85
7.	ANEXOS	89
7.1.	INVENTARIO	89
7.1.1.	INVENTARIO DE PIEZAS DE TORNILLERÍA	89
7.1.2.	INVENTARIO DE SECCIONES	91

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1	Ley de Snell.....	17
Ecuación 2.2	Ley de refracción.....	17
Ecuación 2.3	Ecuación de Lorentz – Lorentz.....	22
Ecuación 2.4	Ecuación de Gladstone – Dale.....	22
Ecuación 2.5	Ecuación de gases ideales.....	23
Ecuación 2.6	Relación del índice de refracción con la temperatura.....	23
Ecuación 2.7	Relación del índice de refracción con el ángulo del haz de luz.....	24
Ecuación 2.8	Relación contraste con el ángulo de inclinación y la temperatura.....	27

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Configuración óptica de Hooke	13
Figura 2.2	Conceptos de óptica	15
Figura 2.3	Reflexión de la luz	16
Figura 2.4	Refracción de la luz	17
Figura 2.5	Disco de Airy	18
Figura 2.6	Formación de imágenes en espejos	18
Figura 2.7	Formación de imágenes en espejos parabólicos esféricos	19
Figura 2.8	Posicionamiento de la luz desplazada respecto de la cuchilla	21
Figura 2.9.	Desviación del rayo de luz en un frente de onda	23
Figura 2.10.	Esquema óptico frontal del sistema Schlieren	25
Figura 2.11	Esquema óptico del sistema Schlieren con respecto ángulo inclinación	27
Figura 2.12	Configuración óptica de Hooke.....	31
Figura 2.13	Configuración óptica con lentes	31
Figura 2.14	Configuración óptica montaje tipo Z	32
Figura 2.15	Configuración óptica montaje único espejo coincidente	33
Figura 2.16.	Configuración óptica alineación fuera del eje.....	33
Figura 3.1	Vista general de la instalación	37
Figura 3.2	Cilindro de acero	38
Figura 3.3	Juntas elásticas.....	39



Figura 3.4 Ventosa.....	39
Figura 3.5 Cámara de combustión.....	40
Figura 3.6. Juntas cámara de combustión.....	40
Figura 3.7 Calentador.....	41
Figura 3.8 Cuadro eléctrico para alimentación de calentadores.....	41
Figura 3.9 Conexión convertidores analógico-digital.....	42
Figura 3.10 Bujía.....	42
Figura 3.11 Posicionamiento bujías en la cámara de combustión.....	43
Figura 3.12 Bobina de encendido.....	43
Figura 3.13 Sistema de encendido.....	44
Figura 3.14 Captadores de presión y distribución.....	44
Figura 3.15 Conexión captadores de presión.....	45
Figura 3.16 Cuadro eléctrico alimentación captadores de presión.....	46
Figura 3.17 Alimentación cuadro eléctrico.....	47
Figura 3.18 Esquema cuadro eléctrico.....	48
Figura 3.19 Red de alimentación de aire y combustible.....	49
Figura 3.20 Esquema de alimentación de aire y combustible.....	50
Figura 3.21 Sistema de admisión de la cámara.....	50
Figura 3.22 Eyector de vacío.....	51
Figura 3.23 Graficas del eyector de vacío.....	51
Figura 3.24 Interfaz Visualización.....	52
Figura 3.25 Soporte de la estructura.....	53
Figura 3.26 Dimensiones del soporte de la estructura en cm.....	54
Figura 3.27. Conexiones del soporte de brida.....	54
Figura 3.28 Escuadras.....	55
Figura 3.29 Pie de nivelación.....	55
Figura 3.30 Pieza pie de nivelación.....	56
Figura 3.31 Rail óptico.....	56
Figura 3.32 Posicionamiento rail óptico.....	57
Figura 3.33 Base montante deslizante rail óptico.....	58
Figura 3.34 Poste de montaje.....	58
Figura 3.35 Conjunto sobre rail óptico.....	59
Figura 3.36 Sección de soporte para el espejo.....	59
Figura 3.37 Espejo parabólico.....	60
Figura 3.38 Montura de gran apertura.....	61
Figura 3.39 Fuente de luz.....	62
Figura 3.40 Adaptador Storz.....	62
Figura 3.41 Fibra óptica.....	62
Figura 3.42 Adaptador de fibra óptica.....	63
Figura 3.43 Cámara.....	64
Figura 3.44 Objetivo.....	64
Figura 3.45 Disparo cámara.....	65
Figura 3.46 Soporte cámara.....	66
Figura 3.47. Soporte cámara con cámara.....	66
Figura 3.48 Dimensiones soporte cámara.....	66



Figura 3.49 Cuchilla	67
Figura 3.50 Interfaz Camera Control Software.....	68
Figura 3.51 Disposición de los elementos	68
Figura 3.52 Piezas alineamiento óptimo.....	69
Figura 3.53 Circuito sincronización	70
Figura 3.54 Adaptación cuchilla	71
Figura 4.1 Experimento Etapa 1 y 2.....	76
Figura 4.2 Experimento Etapa 3 y 4.....	76
Figura 4.3 Experimento Etapa 5 y 6.....	77
Figura 7.1 Conexión de soporte de brida 40mm.....	89
Figura 7.2 Conexión de soporte de brida 80mm.....	89
Figura 7.3 Pie de nivelación.....	90
Figura 7.4 Tornillo cabeza T.....	90
Figura 7.5 Casquillo	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Proporciones aire-combustible.	75
Tabla 4.2 Tabla comparativa de diferentes dosados relativos.....	78
Tabla 7.1 Inventario piezas de tornillería.....	89
Tabla 7.2 Inventario secciones.....	91



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Los flujos compresibles son estudiados bajo técnicas que no interfieren en ellas, es decir, no intrusivas para que su análisis no influya en los resultados. Un método de estudio no invasivo y de buenos resultados es el análisis óptico.

La técnica de Schlieren es una técnica óptica de visualización de un flujo de alta sensibilidad ante cambios de densidad del cual se obtiene información de las variables de dicho flujo, como son las diferentes densidades del fluido a lo largo de la superficie estudiada.

Los procesos de combustión se producen a alta velocidad y por lo tanto es necesario un equipo de captación de imágenes lo suficientemente rápido. El avance del frente de llama se puede observar gracias a la variación de la densidad que genera el proceso de combustión.

En 2003, Álvaro de la Fuente en su Proyecto de Fin de Carrera “Metodología para el diagnóstico de la velocidad de combustión laminar de mezclas de gases combustibles a partir de la medida de presión instantánea en una bomba de combustión a volumen constante” realizado en las mismas instalaciones que este proyecto, se centraba en una bomba sin visualización del interior. Surgió la necesidad de visualizar como se produce la combustión en una cámara de volumen constante y esto fue la base del diseño de este proyecto.

La memoria se centra en la instalación, la puesta a punto y la observación de los resultados del sistema óptico Schlieren para el análisis directo de las diferentes densidades producidas por una combustión premezclada en una cámara de combustión.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de esta memoria es la instalación y la posterior visualización de las diferentes densidades de una combustión premezclada en una cámara de combustión por medio del método óptico Schlieren.

1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las características y los parámetros básicos del método Schlieren.
- Posicionar las lentes, espejos y equipos ópticos necesarios para una correcta visualización del método Schlieren en una bancada.
- Realizar el montaje del sistema realizando pruebas de visualización.
- Puesta a punto del método de llenado, el salto de chispa y la sincronización con la cámara de alta velocidad.
- Analizar los resultados obtenidos.



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



CAPÍTULO 2: SISTEMA SCHLIEREN



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

2. SISTEMA SCHLIEREN

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizará las bases físicas, el fundamento y las diferentes variantes del sistema Schlieren.

Se comenzará exponiendo los antecedentes tanto históricos como físicos; a continuación, se expondrá los fundamentos del sistema Schlieren con las mejoras para la resolución y una comparación de los tres sistemas ópticos más comunes.

Para finalizar el capítulo se analizarán los elementos que componen el sistema y las diferentes disposiciones de las mismas.

2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El famoso físico experimental Robert Hooke (1635-1703) fue probablemente el primer científico en utilizar una configuración de tipo Schlieren. El objetivo de visualizar las diferentes densidades producidas por la combustión le llevo a diseñar el sistema que consistía en una sola lente, un par de velas y el uso del iris del mismo sujeto como filtro. En la fig.2.1 se aprecia que el sistema está formado por una vela que funciona como fuente de luz y la otra produce las diferentes densidades del aire circundante debido al flujo de calor proveniente de la misma. Desafortunadamente su método no era lo suficientemente claro para obtener buenos resultados.

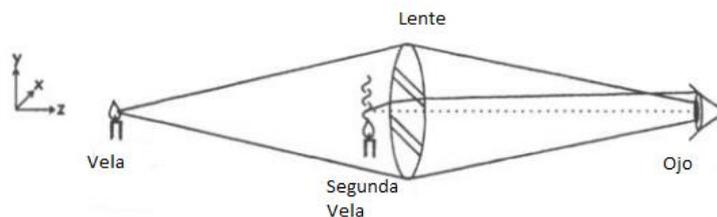


Figura 2.1 Configuración óptica de Hooke [P1]

Los fabricantes de lentes utilizaban la técnica Schlieren para comprobar irregularidades en las lentes que se remonta al astrónomo holandés Christiaan Huygens (1629-1695). Este sistema consistía en una fuente de luz distante que se enfoca en la lente a estudiar dando como resultado una imagen de luminosidad variable que indica las irregularidades originadas en la lente. Pequeñas desviaciones de los rayos de luz de fondo resultan en una luminosidad cambiante en la pantalla.

El físico francés Jean Bernard León Foucault (1819-1868) mejoro la prueba proporcionando un método excepcionalmente preciso para bloquear la mitad de la luz con un filo de una cuchilla en el punto focal. Las mejoras de Foucault del método de prueba óptica demostraron ser el fundamento mismo para el uso de los métodos Schlieren en física.



En 1870 el físico alemán August Toepler (1836-1912) inventó el primer sistema Schlieren avanzado para visualizar flujos. Desarrollado a partir de la configuración de prueba de lente de Foucault, significó una mejora en la calidad y la sensibilidad de las imágenes Schlieren. Usando el filtro introducido por Foucault la configuración fue capaz de mejorar el contraste de imágenes Schlieren comparado con el Shadowgraph y la disposición de Hooke.

Dado que las cámaras fotográficas no eran lo suficientemente buenas en ese momento la visualización seguía siendo a través del ojo del espectador. Inmediatamente vio la posibilidad de la técnica para el estudio de flujos, aunque trató de representar las ondas sonoras en el aire sin éxito, durante sus pruebas comenzó a describir las ondas de choque, que más tarde se convertirían en el campo de investigación más importante del sistema Schlieren.

La técnica vio una propagación rápida debido a que era un buen instrumento para la visualización de fluidos, especialmente en la aerodinámica. El famoso físico Ernst Mach (1838-1916) y Ludwig Prandtl (1874-1953) utilizaron el sistema Schlieren como una herramienta importante para sus famosas investigaciones en dinámica de fluidos.

La técnica Schlieren en principio se limitaba al estudio de fenómenos térmicos, en concreto a la convección. Más adelante el estudio se amplió a las ondas de choque, la mezcla de líquidos y gases, y la aplicación de filtros de color para obtener datos cuantificables.

En la primera mitad del siglo XX Schlieren se convirtió en una herramienta crucial en el campo de la aerodinámica. Alemania, con investigadores como Hubert Schardin (1902-1965) fue el líder mundial en investigación aerodinámica Schlieren entre las dos guerras mundiales. No cambiando su esencia hasta hoy, el sistema Schlieren mantuvo su forma durante el siglo pasado hasta hoy. Sin embargo, la importancia de Schlieren en la dinámica de fluidos se superó lentamente por simulaciones de computadoras en las últimas décadas.

2.3. ANTECEDENTES FISICOS

2.3.1. ÓPTICA

La óptica es la rama de la física que se ocupa del estudio de la luz, de sus características y sus manifestaciones. La reflexión y la refracción, estudiados según el camino de los rayos luminosos, y las interferencias y la difracción que se interpretan recurriendo a la descripción en forma de onda de la luz.

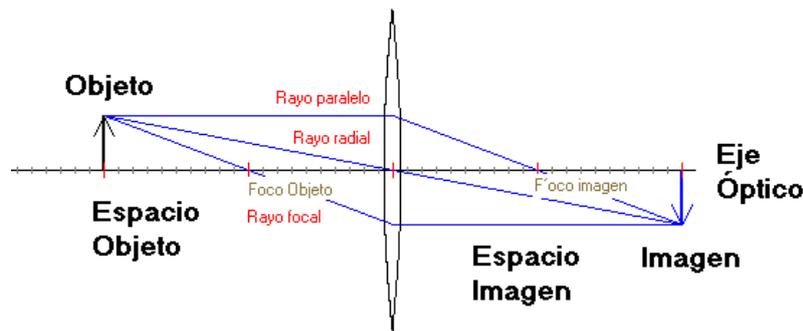


Figura 2.2 Conceptos de óptica [P1]

Para estudiar la posición de una imagen con respecto a un objeto se analizan los siguientes conceptos en la fig. 2.2.:

- Eje óptico: Eje de abscisas perpendicular al plano refractor. El sentido positivo se toma hacia la derecha del plano refractor, es decir, el sentido de avance de la luz.
- Espacio objeto: Espacio que queda a la izquierda de la lente.
- Espacio imagen: Espacio que queda a la derecha de la lente.
- Imagen real: Imagen formada por dos rayos refractados convergentes.
- Imagen virtual: Imagen formada por dos rayos refractados divergentes.
- Foco objeto: Punto F del eje óptico cuya imagen se encuentra en el infinito del espacio imagen.
- Foco imagen: Punto F' del eje óptico que es la imagen de un punto del infinito del espacio objeto.

2.3.2. REFLEXIÓN

La reflexión se define como el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar con la superficie de un objeto. Existen dos formas de reflexión: la primera se da cuando los rayos de luz inciden sobre una superficie uniforme, en este caso todos los rayos son reflejados todos en la misma dirección y con el mismo ángulo, esto se llama reflexión especular. En caso contrario si el haz de luz choca con una superficie rugosa el haz de luz reflejado se dispersa en diferentes direcciones y ángulo, aborreciendo la imagen, esto se le llama reflexión difusa.

En este fenómeno está basada la formación de imágenes en los espejos:

- Espejos planos
- Espejos esféricos
 - o Cóncavos: La superficie refractante es la cara interna.
 - o Convexos: La superficie refractante es la cara externa.

En la fig.2.3 es importante denotar:

- El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal, a este ángulo se le llama ángulo reflejado.
- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en el mismo plano, y por lo tanto son coplanarios.



Figura 2.3 Reflexión de la luz [P1]

2.3.3. REFRACCIÓN

Cuando un rayo de luz que se propaga a través de un medio transparente incide oblicuamente sobre una frontera con otro medio transparente parte del rayo es reflejado, pero otra parte es transmitida hacia el segundo medio, lo cual implica que los haces reflejado y refractado tendrán menos intensidad luminosa que el rayo incidente. Dicho reparto de intensidad se produce en una proporción que depende de las características de los medios de contacto y del ángulo de incidencia respecto de la superficie limite. El rayo que entra en el segundo medio experimenta un cambio de dirección, debido a la variación de la velocidad que se produce al cambiar de medio, esto se denomina refracción.

Para obtener el ángulo del rayo refractado utilizamos la ley de Snell:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2 \quad \text{Ecu 2.1}$$

Donde n es el índice de refracción del material que se define como la relación la velocidad de la luz en el vacío c_0 y la velocidad de la luz en el medio de estudio c .

$$n = \frac{c_0}{c} \quad \text{Ecu 2.2}$$

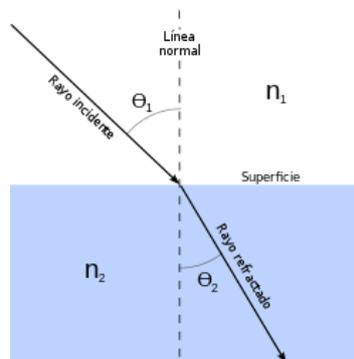


Figura 2.4 Refracción de la luz

De la expresión de Snell que se observa en la fig.2.4. se deduce que:

- Cuando la luz pasa de un medio que es menos refringente (por ejemplo, el aire) a otro medio más refringente (por ejemplo, el vidrio), el rayo refractado se acerca a la normal.
- La reflexión total se da cuando para un ángulo de incidencia determinado le corresponde un ángulo de refracción de 90° , este fenómeno tiene aplicaciones técnicas en las fibras ópticas.

2.3.4. DIFRACCIÓN

Fenómeno basado en el curvado y el esparcido de las ondas cuando un rayo de luz encuentra un obstáculo, pasa a través de un cuerpo opaco o por una abertura inferior o igual a su longitud de onda. Cuando las rendijas son de una abertura mayor que la longitud de onda estas siguen la propagación rectilínea.

Por lo tanto, la difracción hace que la luz no se concentre en un punto preciso, sino que se va a dispersar formando lo que se conoce como disco de Airy, como se

muestra en la fig. 2.5. que no es más que la representación de esa deformación de la onda proyectada en el plano con normal al haz de luz.

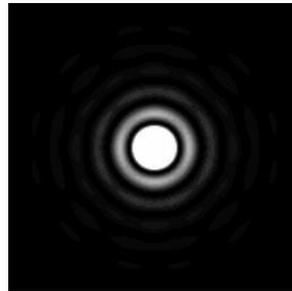


Figura 2.5 Disco de Airy

El diafragma de la cámara permite que cuanto más se cierra la imagen estará más enfocada, pero llegará un momento en el cual a partir de cerrar más el diafragma da lugar a una pérdida de nitidez debido a que limitamos la superficie de entrada de luz limpia al mínimo y casi toda la que pasa al sensor de la cámara es luz distorsionada por los bordes del propio diafragma.

2.3.5. ESPEJOS PLANOS

Debido a la superficie plana la imagen formada proviene detrás del espejo, sin embargo, la imagen proviene del objeto por reflexión especular. En el caso de los espejos planos de la fig.2.6.:

- La imagen obtenida es virtual.
- Es simétrica del objeto con respecto al espejo.
- Es derecha
- El tamaño del objeto y su imagen son iguales.

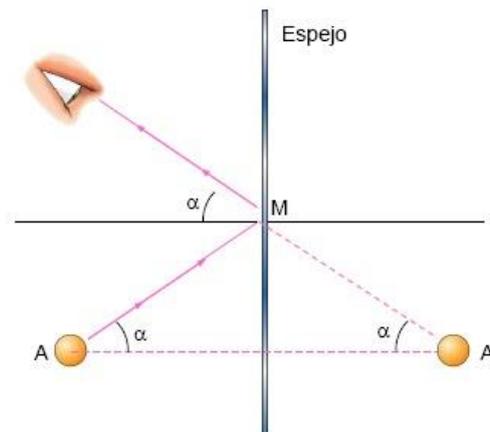


Figura 2.6 Formación de imágenes en espejos

2.3.6. ESPEJOS PARABÓLICOS ESFÉRICOS

Los espejos parabólicos esféricos se comportan como una lente convexa pero el haz de luz no atraviesa el cuerpo óptico como en el caso de la lente, sino que se refleja en el cuerpo, como se observa en la fig.2.7. Tienen la propiedad de enfocar la luz colimada en un punto, la distancia focal. Cada espejo se puede caracterizar por su distancia del punto focal al plano medio del mismo. La denominada longitud focal se define por la curvatura de ambas superficies y en índice de refracción n del material que se fabrica la espejo.

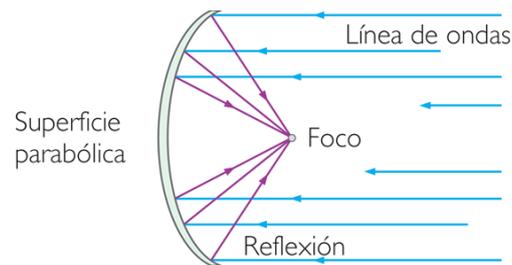


Figura 2.7 Formación de imágenes en espejos parabólicos esféricos

La superficie de estos espejos es equivalente a la sección de una esfera. En este tipo de espejos la luz incidente, supuestamente proveniente de un haz paralelo, converge en un foco.

Si el haz de luz incidente no está perfectamente orientado y centrado en la superficie del espejo la imagen formada no será totalmente óptima.

En este cuerpo óptico existe el problema de la aberración cromática que ocurre cuando se utiliza luz blanca. A medida que la longitud de onda es más larga se refracta más fuerte, la longitud focal varía con la longitud de onda. Por lo tanto, sólo la longitud de onda puede ser enfocada en un plano de distancia distinta. Una solución simple al problema es el uso de una fuente de luz monocromática o un filtro de longitud de onda.

2.4. FUNDAMENTOS

El sistema óptico o fotografía Schlieren es una técnica óptica en la que se observa la variación en el gradiente de la densidad de un medio transparente y no homogéneo. Este estudio se puede aplicar tanto a líquidos como a sólidos, ya que los cambios en la densidad o en el índice de refracción pueden ser debidos a diferentes factores como el cambio en la temperatura, la exposición a flujos de altas velocidades y/o la presencia de impurezas o elementos que no pertenecen al material a estudiar.

La técnica Schlieren es muy sensible a los cambios del haz de luz incidente y gracias a esto se puede observar los cambios de densidad e índice de refracción.



Para la explicación de los fundamentos es elegido el sistema de tipo Z monocromático Schlieren que comprende dos espejos parabólicos, una cuchilla y una fuente de luz. Los componentes ópticos y el láser de la fuente de luz se mantienen en la línea central con una cierta elevación. El haz de luz procedente de la fuente después de la expansión debe coincidir con la parte central de los sistemas ópticos. El haz de luz que se obtiene del segundo espejo se colima hacia el punto focal de este, donde se sitúa la cuchilla.

La cuchilla está posicionada para cortar una parte de la luz incidente de modo que en ausencia de perturbaciones en la sección de prueba la iluminación de la pantalla se reduce de manera uniforme.

El montaje permite el movimiento de la cuchilla en dirección vertical y horizontal para que así corte el grado deseado de intensidad de luz. En la práctica la cuchilla se posiciona para que el borde la cuchilla sea perpendicular a la dirección de los gradientes de densidad de la prueba. Es decir, si los gradientes de densidad son predominantemente en dirección vertical el filo de la cuchilla tiene que estar en horizontal.

Las mediciones de Schlieren se basan en la intensidad de luz medida por la cámara de adquisición de datos. El sensor de la cámara es un dispositivo lineal que convierte la intensidad en voltaje, si esta intensidad supera la admitida por la cámara no se cumple esa linealidad y se dice que la cámara está saturada de intensidad.

Dado que el haz de luz en el filo de la cuchilla es un punto, las intensidades son grandes y por lo tanto es necesario una cuchilla para evitar la saturación de la cámara. El problema de la saturación es muy grave cuando se usan láseres como fuente de luz.

Alternativamente se podría colocar una lente adicional en la distancia focal del segundo espejo para colimar la luz y generar un haz de mayor diámetro y menor intensidad.

Una parte importante es la colocación de la cuchilla ya que está determina la calidad de las imágenes obtenidas. Si la posición de la cuchilla no es la correcta la imagen obtenida, sin perturbaciones en la prueba, no es uniforme y tendrá zonas más oscuras que otras. Cuando la posición de la cuchilla es la óptima la imagen obtenida es uniforme con respecto a intensidades de luz.

Un paso importante para la posición óptima es ajustar el porcentaje de corte por el filo de la cuchilla para obtener la sensibilidad deseada. Si el corte del haz es pequeño una gran cantidad de luz pasa por encima de la pantalla y los resultados son óptimos cuando los contrastes son pequeños sin embargo pueden saturar la cámara. Si el corte del haz es grande los resultados son óptimos para contrastes grandes, pero se puede perder información en regiones de baja densidad, es decir, cuando los

contrastes son bajos. En la fig.2.8 se observa el posicionamiento de la luz desplazada con respecto del posicionamiento de la cuchilla.

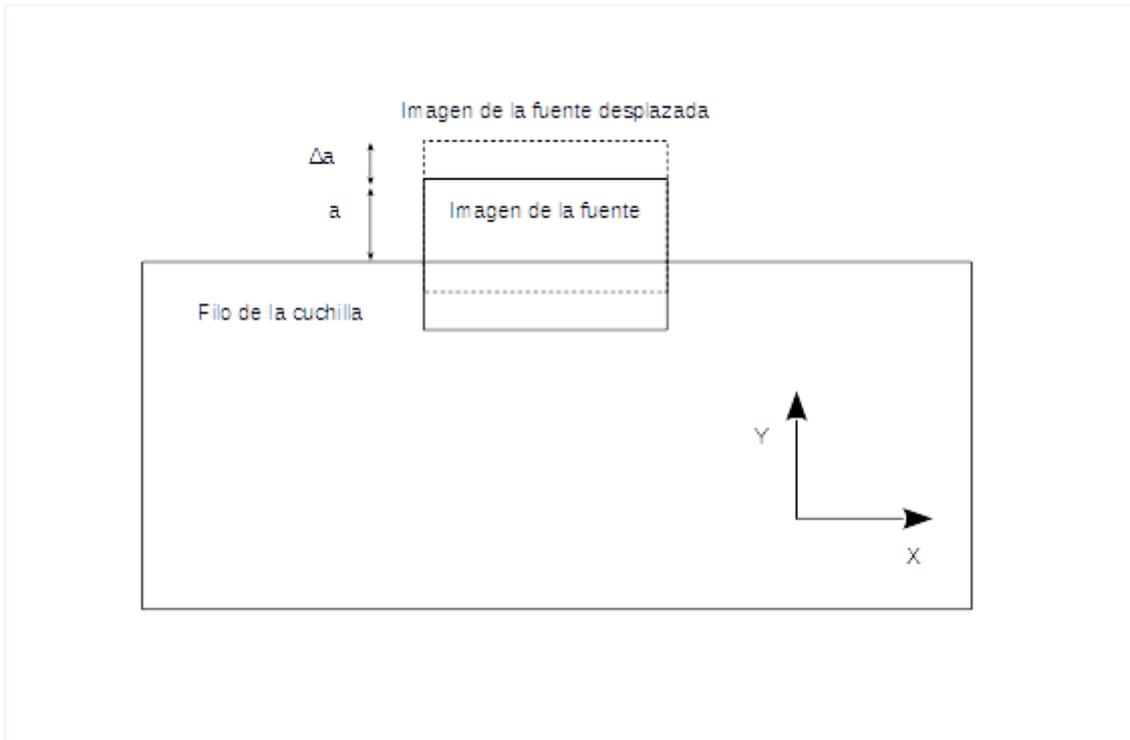


Figura 2.8 Posicionamiento de la luz desplazada respecto de la cuchilla (Adaptada de [11])

La altura de la parte no bloqueada se denomina “a”, si un rayo en la sección de prueba es desviado en el sentido positivo del eje Y por una distancia “ Δa ”, la cuchilla permitirá que pase más luz, haciendo que parte de la imagen sea más brillante. Por el contrario, si el rayo desviado es en dirección negativa del eje Y, menos luz pasa a través de la cuchilla, causando que parte de la imagen sea más oscura. Estos cambios de brillo ocurren en el plano de la imagen en una posición correspondiente a la posición en el plano de la prueba donde ocurre la deflexión de rayos.

Solo los cambios de posición perpendiculares a la cuchilla provocan una diferencia en la imagen obtenida. Asumiendo que el filo de la cuchilla está en posición horizontal, el sistema solo será sensible a las deflexiones con los componentes verticales. La componente horizontal ya no hace ninguna diferencia por la cuchilla.

La sensibilidad puede mejorarse aumentando la cantidad de luz cortada por el filo de la cuchilla. El sistema sólo es sensible a los gradientes de densidad de una dirección. Cuando se reduce el corte por la cuchilla, la imagen se hace más brillante pero la sensibilidad empeora. Cuando el corte se aumenta la imagen es más sensible, pero se ve más afectada por la luz doblada que por la luz inclinada.



Las perturbaciones como las vibraciones del suelo, el uso próximo de maquinaria pesada y el movimiento del personal en las proximidades del laboratorio influyen en la obtención de los resultados. Este sistema óptico es menos sensible a las perturbaciones que la interferometría, sin embargo, el filo de la cuchilla es posiblemente el punto donde más influyan las perturbaciones.

Los índices de refracción del medio determinan la intensidad de luz resultante en la pantalla de observación. La técnica Schlieren genera datos de proyección en la dirección de la propagación del haz de luz. El resultado es una concentración del promedio del campo de rayos en toda la longitud de la sección de prueba.

Se utiliza la ecuación de Lorentz-Lorenz que relaciona el índice de refracción de un medio con las propiedades del medio transparente, en este caso la densidad:

$$\frac{n^2-1}{\rho(n^2+1)} = \text{constante} \quad \text{Ecu 2.3}$$

Para los gases estudiados en este experimento se puede aproximar el índice de refracción a la unidad y la expresión anterior se puede reducir a la ecuación de Gladstone-Dale:

$$\frac{n-1}{\rho} = C \quad \text{Ecu 2.4}$$

La constante de C, llamada constante de Gladstone-Dale, es una función del gas en particular y varía poco con la longitud de onda. En el caso del aire esta constante tiene un valor de 0,23 cm³ / g en condiciones normales.

Un cambio en la densidad muy pequeño produce un cambio en el índice de refracción muy pequeño y por consiguiente para observar dichas variaciones es necesario un sistema óptico bastante sensible ante cambios.

En general la densidad de los fluidos solo dependerá de la presión y la temperatura. En muchas aplicaciones con gases la presión es sensiblemente constante y la densidad se relaciona directamente con la temperatura. Los líquidos son prácticamente incompresibles y su densidad varía solamente con la temperatura, incluso en ciertas ocasiones se puede relacionar la densidad con la temperatura linealmente. Por lo tanto, el índice de refracción se puede relacionar linealmente con la temperatura. Esto se puede determinar derivando la ecuación en la dirección normal al haz de luz:

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{C} \frac{\partial n}{\partial z}$$
$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} = \frac{1}{C} \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}$$

Si se asume que la presión es constante y que se acepta que el aire de estudio cumple con la ecuación de los gases ideales: $\rho = P/RgT$ Ecu 2.5

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{T}{C} \frac{1}{\rho} \frac{\partial n}{\partial z}$$

$$\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} = C \left[\frac{-\rho}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{2\rho}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} = C \left[\frac{-\rho}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad \text{Ecu 2.6}$$

Teniendo en cuenta que la presión se mantiene constante, estas ecuaciones muestran que se puede estudiar los campos de temperatura con esta técnica de visualización.

La formación de la imagen en un sistema Schlieren surge de la deflexión de la luz en el campo de estudio debido al índice de refracción variable. Para obtener la información cuantitativa a partir del sistema Schlieren se tiene que determinar el ángulo acumulado de refracción de la luz que emerge de la zona de ensayo.

El camino del haz de luz en un medio cuyo índice de refracción varía en la dirección vertical se puede analizar usando los principios de la óptica geométrica.

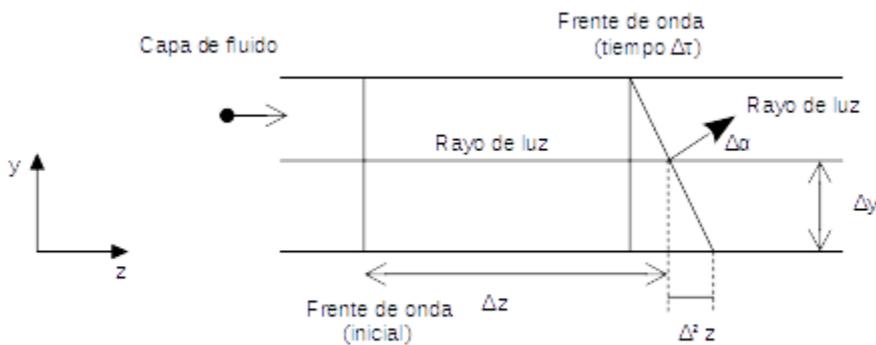


Figura 2.9 Desviación del rayo de luz en un frente de onda (Adaptada de [L1])

En la fig.2.9 se muestran dos frentes de onda en los tiempos “ζ” y + “Δ ζ+ ζ” separados un tiempo “Δζ”, se puede observar que en el instante inicial el rayo está en la posición z, después del intervalo la luz se ha desplazado una distancia “ζ” veces de la velocidad de la luz c. La variante “c” depende del índice de refracción que es función de y.

La velocidad de la luz local es c_0/n donde c_0 es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción del medio. Por lo tanto, la distancia Z a la que el haz de luz viaja durante el intervalo de tiempo “ ζ ” es:

$$\Delta Z = \Delta \zeta \frac{c_0}{n}$$

Donde:

$$\Delta^2 y = -c_0 \frac{\Delta \left(\frac{1}{n} \right)}{\Delta z} \Delta \zeta \Delta z$$

Luego la deflexión angular del rayo es:

$$\Delta \alpha \approx \frac{\Delta^2 y}{\Delta z} = -n \frac{\Delta \left(\frac{1}{n} \right)}{\Delta z}$$

Considerando que Δz y Δy muy pequeños se tiene:

$$d\alpha' = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} dy = \frac{\partial \ln n}{\partial z} dy$$
$$\alpha' = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} dy = \int \frac{\partial \ln n}{\partial z} dy$$

Si el ángulo α es el ángulo del haz de luz después de haber pasado por la región de prueba se cumple que $n_a \sin \alpha = n \sin \alpha'$. Para pequeños valores de α y α' se tiene:

$$\alpha = \frac{n}{n_a} \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} dy$$

Asumiendo que $1/n$ no varía mucho con la integral a través de la región de prueba, se llega a la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{1}{n_a} \int \frac{\partial n}{\partial z} dy$$

Como $n_a = 1$

$$\alpha = \int \frac{\partial n}{\partial z} dy \quad \text{Ecu 2.7}$$

Este método óptico es capaz de medir pequeñas desviaciones angulares (10^{-6} - 10^{-3} rad) en función de la posición en el plano normal a la luz. Cabe señalar que la luz se curva en la dirección en donde se incrementa la densidad.

Universidad de Valladolid

El gradiente del índice de refracción a lo largo de los resultados es en la misma dirección que el frente de onda. El ángulo $\Delta\alpha$ representa la flexión del haz de luz en la ubicación Z.

Un sistema Schlieren está pensado para medir el ángulo α que en la mayoría de las ocasiones es un ángulo pequeño del orden de radianes. Es razonable esperar que los gradientes de los índices de refracción conducen el haz de luz siendo desplazados por el filo de la cuchilla.

Para comprender mejor este concepto se plantea el sistema con dos lentes, una fuente de luz genera un haz de luz que se expande hasta el diámetro de la primera lente y este genera un haz de luz paralelo a través de la sección de prueba, este sistema se muestra en la fig.2.10. La línea puntuada muestra el camino del haz de luz en presencia de una perturbación en la región de prueba. La segunda lente cuyo enfoque es el filo de la navaja recoge el haz de luz y lo pasa sobre la pantalla.

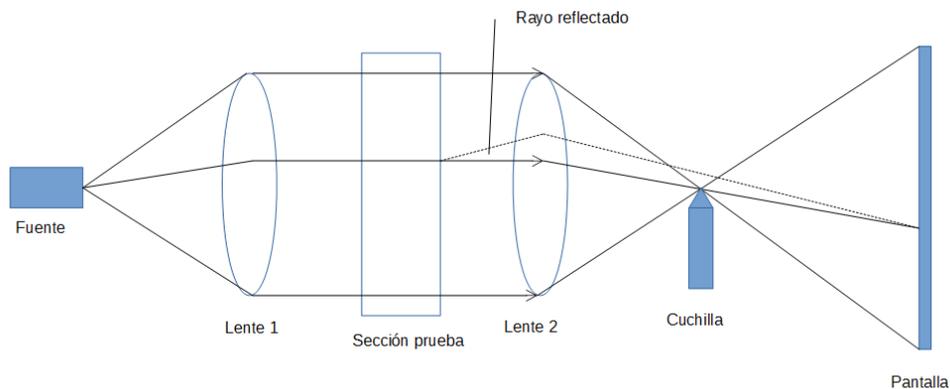


Figura 2.10. Esquema óptico frontal del sistema Schlieren

Para la visualización de imágenes ópticas por medio de Schlieren es necesario que el campo a estudiar este definido por un área cerrada y a la vez que sea visible para atravesar el haz de luz para el estudio. En nuestro estudio de medio gaseoso se utiliza unas ventanas circulares de 25.4 mm de espesor para evitar el contacto directo con el medio del laboratorio.

En un sistema convencional el filo de la cuchilla mejora el contraste del haz de luz incidente en la cámara óptica, pero sufre ciertos inconvenientes. Por ejemplo, los gradientes paralelos al borde de la cuchilla no contribuyen a la formación de la imagen. Cuando el haz de luz es desviado por debajo de la cuchilla la información del gradiente se pierde. También pueden surgir efectos de orden superior como la formación del foco más allá del filo de la cuchilla. La modulación de la intensidad



también puede ocurrir a partir de la difracción de la luz dando lugar a patrones de interferencia dispersos superpuestos en la imagen Schlieren. Estos inconvenientes pueden ser resueltos utilizando una escala graduada de grises como filtro, esté es una película fotográfica en la que se genera una escala de grises en el ordenador. El ancho del filtro puede coincidir con el de la cuchilla y la extensión vertical debe ajustarse a las deflexiones de la luz previstas en el plano del filtro. Los valores de la escala de grises de intensidad de luz pueden variar de 0 a 255 para una cámara de 8 bits de resolución. El ajuste inicial del filtro con respecto al punto ligero imperturbado es también ajustable, si el punto cae en el centro del filtro se pueden determinar las deflexiones positivas y negativas del haz de luz. La cuchilla se puede considerar como una construcción especial de un filtro de escala de grises con dos tonos de 0 y de 255 con un corte brusco.

En una configuración tipo Z la cámara puede estar enfocada en el punto del filo de la cuchilla, sin embargo, tal disposición puede conducir a la saturación de la cámara. Es preferible permitir la formación de imágenes en una pantalla y registrar la imagen en incidencia paralela. En una disposición de filtro graduada el propio filtro actúa como pantalla y la cámara graba la imagen directamente en ella. En este enfoque el filtro debe calibrarse para que la intensidad de la luz en función del desplazamiento coincida con el haz en la posición del filtro. Este paso se lleva a cabo cuando la zona de pruebas no sufre variaciones y el filtro montado en una travesía vertical se mueve en relación con el punto de luz. Bajo estas condiciones de prueba el cambio de intensidad en un punto se relaciona directamente con el desplazamiento del haz mediante calibración. Cuando se utiliza una fuente de luz blanca como una lámpara de xenón se puede utilizar una lente adicional para colimar la luz desde el punto formado en el plano del filtro y entregarlo a la cámara CCD. Las variaciones en la absorción de la película fotográfica o el material utilizado para el mismo fin pueden influir en la medición de la intensidad. Una alternativa es usar un filtro de color junto con la cámara CCD así el color medido en términos de tonalidad se dispersa con la intensidad y las imperfecciones materiales no dan lugar a errores adicionales.

En la configuración en Z como la fig.2.11, la imagen que se formará en la pantalla tendrá zonas de claridad y de oscuridad (contraste positivo y negativo respectivamente), las que se relacionan con el campo de temperaturas de la siguiente forma:

$$\text{Contraste} = \frac{\Delta I}{I_k} = \frac{I_d - I_k}{I_k} = \frac{\Delta a}{a_k} = \pm \frac{F_2 \alpha}{a_k}$$

Donde I_k es la iluminación cuando la cuchilla está en posición.

I_d es la iluminación en cualquier punto de la pantalla.

F_2 es la distancia focal del segundo espejo.

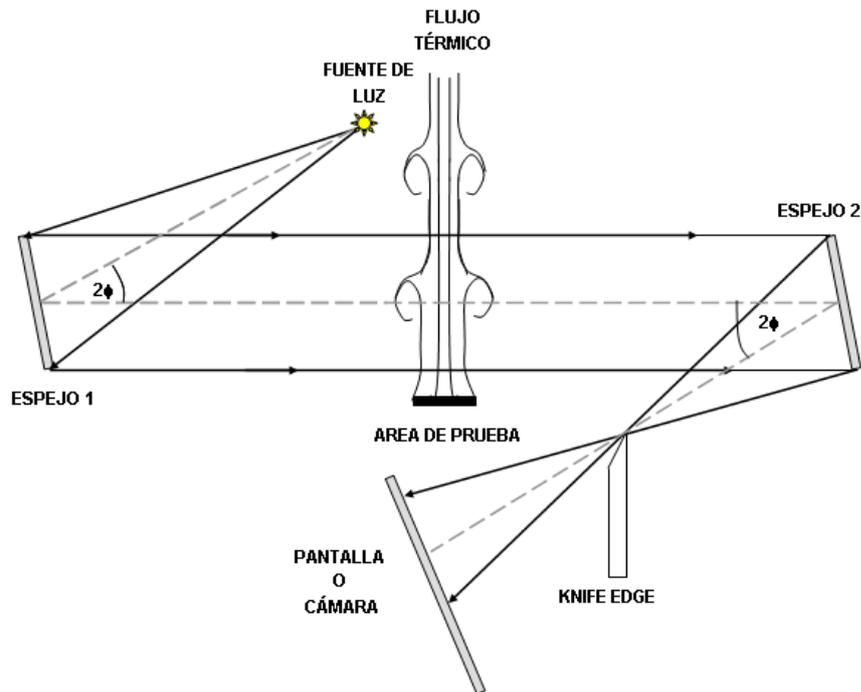


Figura 2.11 Esquema óptico del sistema Schlieren con respecto ángulo inclinación [P3]

Reemplazando las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\text{Contraste} = \pm \frac{F_2}{a_k} \int \frac{\partial n}{\partial z} dy = \pm \frac{F_2 \alpha}{a_k} \int -\frac{c \rho \partial T}{T \partial z} dy \quad \text{Ecu 2.8}$$

En consecuencia, la imagen en contraste es proporcional al efecto acumulativo de los gradientes de temperatura en la dirección normal al haz de luz.

La forma en montaje en Z del eje óptico evita que la fuente de luz y la imagen bloqueen la sección de prueba. Al mantener los ángulos fuera del eje pequeños e iguales la mayoría de las aberraciones ópticas se mantienen al mínimo.

Las tres limitaciones de los sistemas Schlieren con respecto al resto de métodos clásicos son:

- El campo de visión se limita al diámetro de la óptica.
- Cualquier estriación en todo el sistema es visible en la imagen, no solo en la sección de prueba.
- La fuente de luz necesita aproximarse a una fuente puntual.



2.5. MEJORAS EN LA RESOLUCIÓN

Como consecuencia del avance de las herramientas computacionales usadas en conjunción con los sistemas Schlieren, muchos investigadores han buscado modificaciones y algoritmos para extraer información cuantitativa de las imágenes Schlieren. Estos aumentos en el procesamiento, sin embargo, vienen a costa de la resolución espacial y el rango dinámico. En consecuencia, una buena parte de los trabajos recientes en imágenes Schlieren se han dedicado a mejorar la calidad de las imágenes y recuperar las pérdidas de resolución después del procesamiento.

2.5.1. RESOLUCIÓN ESPACIAL

La resolución espacial, o la claridad de líneas en imágenes, es una función imperativa que preserva la calidad de los objetos primarios en una imagen. Mantener la resolución espacial a través de sistemas de alta y baja sensibilidad es una preocupación importante para los estudios que involucran objetos grandes o pequeños, porque la sensibilidad de un sistema tiende a disminuir a medida que aumenta la resolución espacial. Desde un punto de vista de la implementación, la resolución espacial puede ser moderadamente mejorada simplemente eligiendo un LED más potente y de mayor tamaño como fuente de luz, proporcionando una coherencia espacial fija. Una técnica para lograr una resolución espacial más alta es usando un sistema de Schlieren de enfoque nítido o multi-fuente. Estos sistemas organizan tres fuentes de luz de punto separadas para enfocar la imagen en el mismo punto, proporcionando una codificación tridimensional del objeto. Las imágenes producidas se procesan en el análisis de Fourier para producir información sobre el objeto.

2.5.2. RANGO DINÁMICO

El rango dinámico, o diferencia en los valores de luminiscencia, de las imágenes de Schlieren es típicamente grande, ya que las diferencias entre partes estáticas y fluidas de un objeto son las que forman la imagen Schlieren. Los ajustes del rango dinámico del sistema se realizan simplemente modificando el corte antes de que se grabe la imagen. El corte típico es un filo de cuchilla o un filtro de color, ya que son fáciles de implementar y ajustar, pero estos filtros pueden demostrar que degradan demasiado la resolución para su uso con ciertas aplicaciones, como las técnicas microscópicas de Schlieren. Pueden utilizarse filtros de contraste de modulación de Hoffman para contrastar el problema, ya que no sólo proporcionan un rango dinámico adecuado para visualizar Schlieren, sino que también codifican información sobre el objeto de fase, permitiendo que se registre más información sobre el objeto en una imagen. Otro método para mejorar el rango dinámico en las imágenes esquemáticas consiste en superponer las fotos de una sonda de ultrasonido pulsado y medir las diferencias de la luz diferenciadas entre las dos imágenes.



2.5.3. EL RUIDO

El ruido de las imágenes es inevitable, especialmente desde los sensores de la cámara digital que funcionan con ajuste ISO altos. Para los objetos extremadamente finos, para los que se requiere una alta sensibilidad, el ruido puede desvirtuar la calidad de la imagen y su posterior análisis visual y cuantitativo.

2.6. COMPARACION DE INTERFEROMETRIA, SCHLIEREN Y SHADOWGRAFIA

La formación de imágenes en interferometría, Schlieren y Shadowgraph basadas en índices de refracción producen imágenes que son valores integrados de la temperatura y la concentración en la dirección de propagación del haz luminoso. Si la extensión espacial de la zona perturbada en el dominio es pequeña la información contenida en la imagen es pequeña.

La interferometría tiene un mayor número de elementos dado que se basa en la medición diferencial de fase y es sensible a la alineación. Schlieren tiene menos componentes ópticos y es menos sensible. Shadowgraph es la configuración más simple, la menos sensible a la alineación, las vibraciones y otros factores extraños.

El análisis de interferógrafos depende de la localización de mínimos de intensidad, pero no de la intensidad misma, pero se contamina fácilmente con errores de refracción. Los datos de Schlieren y Shadowgraph se basan en la medición de la intensidad luminosa y pueden verse afectados por la linealidad y la saturación de la cámara. La difracción en el filo de la cuchilla, los errores en la escala de grises y los filtros de color son también relevantes para la obtención de datos fiables. Si los efectos de orden superior son significativos el análisis de sombras puede volverse numéricamente intratable y las imágenes pueden solo tener utilidad cualitativa.

En experimentos con gradientes de baja densidad los interferogramas son claros y útiles pero el contraste de intensidad puede no ser lo suficientemente grande para proporcionar una imagen clara en los sistemas Schlieren y Shadowgraph. En experimentos de alto gradiente tanto Schlieren como Shadowgraph producirán imágenes claras e interpretables, sin embargo, los interferogramas serán corrompidos por los errores de refracción.

En campos de flujos inestables las técnicas de Schlieren y Shadowgraph controlarán los cambios temporales de temperatura y concentración en forma de variaciones de intensidad luminosa. Estas son menos evidentes en los interferogramas donde la información se localiza en las franjas.

El número de franjas formadas en líquidos tales como el agua y el aceite de silicona son bastante grandes ya que la sensibilidad del índice de refracción a la densidad es grande en estos medios de estudio. Los interferogramas registrados en tales



experimentos son afectados por los errores de la refracción, sin embargo, Schlieren y Shadowgraph tiene ventaja con respecto a la sensibilidad de los índices de refracción del medio.

En un campo de flujo dominado por los vórtices y otras longitudes y escalas de tiempo Schlieren y Shadowgraph ofrecen la ventaja de la claridad.

En general debido a la simplicidad del análisis, la facilidad de instrumentación y la amplia gama de aplicaciones el sistema Schlieren es la opción óptima.

2.7. ELEMENTOS

La técnica Schlieren requiere de unos elementos mínimos para su montaje:

- Espejos y lentes
- Cámara
- Cuchilla
- Luz colimada
- Zona de pruebas
- Soporte de todos los elementos

2.8. TIPOS DE MONTAJES

En realidad, no hay realmente una configuración definida de Schlieren sino más bien infinitas variaciones que utilizan técnicas muy diferentes para visualizar las variaciones del índice de refracción.

En el transcurso del tiempo la técnica Schlieren ha ido modificándose, pero sin cambiar la base óptica de su estudio. Algunos montajes son más propensos a sufrir variaciones de tipo cromáticas debido a su disposición.

Sistema montaje Hooke:

Se requiere al menos de una lente convexa o un espejo parabólico. Usando solamente una lente, la disposición de Robert Hooke es el método más simple que se puede considerar como configuración real de Schlieren. Como se muestra en la fig.2.12 se utilizan dos velas: la primera se coloca en el plano de imagen correspondiente a la posición del espectador, proporcionando el punto de iluminación de fondo de la lente, mientras que la segunda vela simplemente produce aire caliente visualizado.

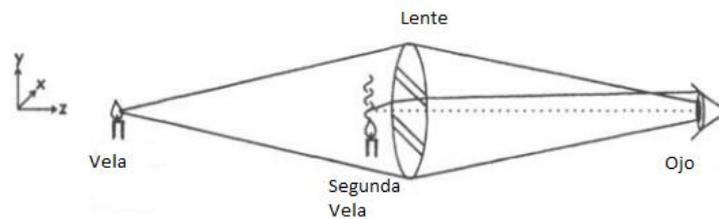


Figura 2.12 Configuración óptica de Hooke [P1]

De los sistemas que se pueden considerar como instalaciones estándar de Schlieren hay dos grupos principales: primero, los sistemas que usan lentes convexas para la óptica según lo expuesto hasta ahora. En segundo lugar, en lugar de usar lentes también se pueden aplicar espejos parabólicos para colimar y enfocar la luz. Aunque las dos configuraciones son ópticamente más o menos equivalentes, algunas características divergen sustancialmente.

2.8.1. MONTAJES CON LENTES

El núcleo de una configuración de lentes consta de solo de dos lentes: la primera colima la luz proveniente de la fuente y la segunda reenfoca en un punto. La alineación tiene que estar en un solo eje. Esta es también la ventaja de esta configuración, ya que todos los elementos tienen que estar orientados en una sola dirección y alineados sobre el mismo eje.

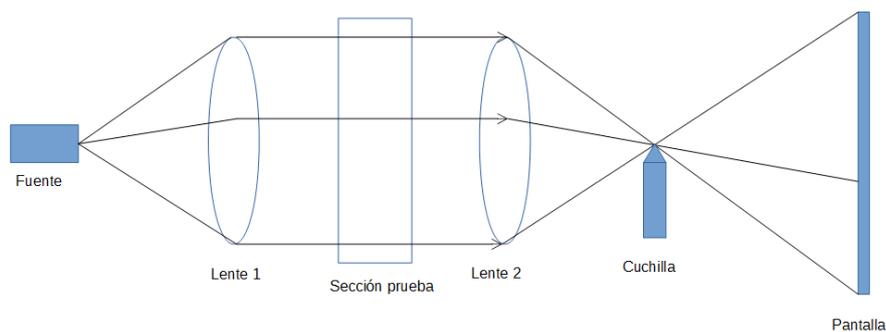


Figura 2.13 Configuración óptica con lentes

Como se representa en la fig.2.13 a veces se necesita ópticas adicionales para producir una fuente de luz puntual y para proyectar la imagen final sobre una pantalla, usualmente siendo simplemente una cámara. Una posible variación es usando una sola lente óptica, similar a la configuración de Hooke, pero con el ojo siendo remplazado por un filtro estándar y una cámara.

2.8.2. MONTAJE CON ESPEJOS

El sistema con espejos, obviamente, no se puede alinear en un eje ya que la luz se refleja y es necesario una configuración plegada. Esto puede ser una ventaja para ahorrar espacio, sin embargo, implica unas disposiciones que son más difíciles de configurar.

A diferencia de las lentes, los espejos tienen las mismas propiedades geométricas para toda la longitud de onda, por lo que no se producen aberraciones cromáticas. Pero, al igual que las lentes, la mayoría de los espejos están conformados en forma de una sección de esfera. Aunque la producción es más barata, sin embargo, la forma produce problemas de aberración esférica como las lentes esféricas. Estas aberraciones pueden ser visibles al filtrar la luz para la visualización Schlieren. La forma ideal sería un espejo parabólico donde toda la luz entrante paralela se enfoca en un punto. Sin embargo, como los espejos tienen que ser de eje para no proyectar la luz desde el origen, los espejos parabólicos no están alineados ópticamente.

Un inconveniente es que los espejos son propensos al coma y al astigmatismo. Esto puede minimizarse haciendo que los ángulos entre los rayos de luz incidentes y reflejados sean tan pequeños como se pueda, haciendo que los dos espejos sean idénticos.

Una solución elegante es combinar la función del filtro con el espejo. Otra posibilidad es posicionar la fuente de luz del eje de modo que la luz se enfoque lejos de la fuente. Para ello se necesitaría un espejo elíptico para suprimir las aberraciones.

Como solo se necesita una superficie pulida y no es necesario una calidad interna, el precio es notablemente más bajo que las lentes de las mismas características ópticas. En instalaciones más grandes el precio de la óptica se vuelve un aspecto importante, por lo tanto, las lentes apenas se usan para más de 100 mm de diámetro.

2.8.2.1. Sistema en montaje tipo-z:

Hoy en día es el montaje más utilizado disponiéndose de dos espejos esféricos enfrentados lo que proporciona un amplio campo de observación, sin embargo, este tipo de montaje se ve afectado en mayor medida por la aberración cromática, dicho sistema se observa en la fig.2.14.

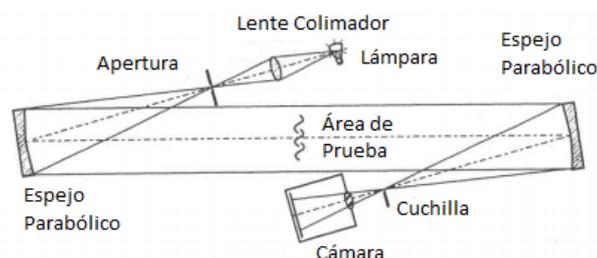


Figura 2.14 Configuración óptica montaje tipo Z [P1]

2.8.2.2. Sistema de único espejo coincidente:

En este montaje no es necesario una lente colimador ya que el espejo telescópico lo hace automáticamente. Solo es necesario un espejo y por lo tanto el campo de visión se reduce significativamente, la sección de pruebas se dispone en la parte frontal del espejo y por lo tanto no cuenta con la disposición de haces paralelos, como se observa en la fig.2.15. Este sistema es utilizado debido a la alta sensibilidad ante variaciones y por lo tanto es más detallado.

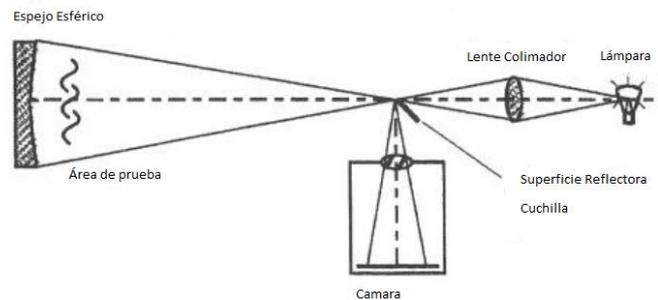


Figura 2.15 Configuración óptica montaje único espejo coincidente [P1]

2.8.2.3. Sistema de alineación fuera del eje:

Al igual que el sistema de único espejo coincidente solo es necesario un espejo, pero la fuente de luz y la cámara no se encuentran en el mismo eje del espejo. Dicho sistema se muestra en la fig.2.16.

El principal problema de este tipo de montaje es la posible aberración debida a la no alineación de los ejes.

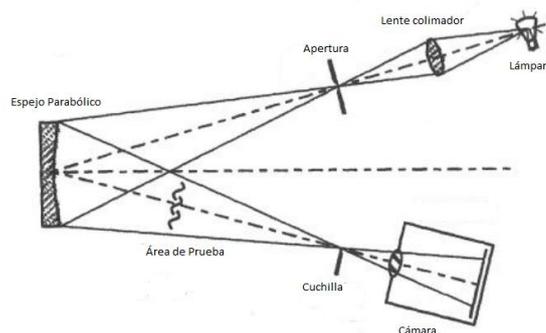


Figura 2.16 Configuración óptica alineación fuera del eje [P1]

2.8.2.4. Sistema multi-espejos

Esta configuración utiliza claramente varios espejos y así el sistema es más sensible ante cambios más pequeños, como las vibraciones y pequeñas corrientes de aire. Su utilización se centra en el estudio del plasma.



2.8.3. SEMEJANZAS EN LOS DIFERENTES SISTEMAS

Aparte de las diferencias hay una cosa que es exactamente la misma para la configuración de espejos y de lentes. Como la óptica es principalmente la misma, el filtrado funciona igualmente en ambos sistemas. El uso de una cuchilla de afeitar como un filtro está muy extendido. Normalmente orientado horizontalmente, el borde filtra cualquier haz de luz perpendicular difractado de la luz, ya que estos se centran en la cuchilla. Este filtrado es el proceso real que hace que la técnica Schlieren sea visible, produciendo las sombras en la pantalla. Sin embargo, cambiar la forma del filtro y la orientación es una alternativa útil al sistema estándar, ya que permita poner énfasis en grados específicos o direcciones de desviación. Un método común es utilizar un filtro de color gradual, de modo que la luz de ciertas regiones colorea de acuerdo con su deflexión.



CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirá la instalación de visualización de combustión premezclada mediante técnicas Schlieren que se encuentra en el laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid. En la fig.3.1 se puede observar una vista general de la instalación.



Se puede dividir en partes:

1. **Cámara de combustión premezclada:** se analizará una descripción funcional de la cámara de combustión para comprender el sistema. La cámara es reutilizada con otros fines de un proyecto anterior del departamento.
2. **Sensores de presión de la cámara de combustión:** se analizará los sensores de presión conectados a la cámara de combustión y sus conexiones.
3. **Línea de gases:** se describirá los diferentes recipientes para los gases, los conductos, reguladores, sensores, etc.
4. **Instrumentación óptica:** se describirá los diferentes elementos ópticos necesarios para la visualización del sistema Schlieren.

Para finalizar el capítulo se analiza la disposición de los diferentes elementos antes expuestos y las puestas a punto de la instalación para su correcto funcionamiento.

3.2. CÁMARA DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA

La cámara de combustión es el elemento principal de la instalación, está situada en el haz de luz paralelo entre los dos espejos para poder observar las variaciones de densidad que ocurren en el interior.

La cámara debe vaciarse y llenarse para cada nuevo proceso.

La cámara de combustión está unida al soporte por medio de cuatro tornillos de cabeza en T y dos soportes en ángulo junto con una lámina de acero a la viga central por donde pasa el haz de luz paralelo y principal.

3.2.1. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión es un cilindro de acero inoxidable con hueco pasante en la dirección del eje como se muestra en la fig.3.2. El resto de detalles se enumeran a continuación:

- Ocho taladros pasantes para introducir las resistencias.
- Ocho taladros roscados en la parte frontal de cada sección frontal para sujetar las partes exteriores de la cámara por medio de pernos.
- En la parte superior tiene un orificio para introducir el inyector de combustible, pero en este experimento no es utilizado.
- Tres orificios pasantes para introducir diferentes bujías, la distribución espacial se observa en la fig.3.20.
- Dos pequeños orificios opuestos entre sí, que comunican la cámara de combustión con el exterior. Por uno de ellos se introducen los gases de mezcla y por el otro se evacuan los productos de la combustión.

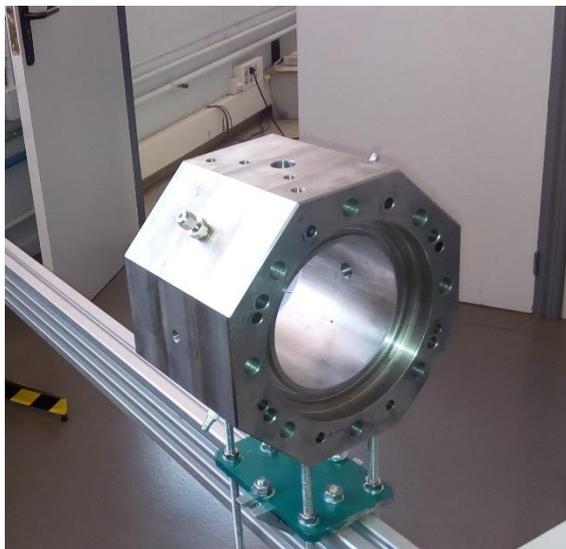


Figura 3.2 Cilindro de acero

3.2.2. VENTANAS DE SÍLICE FUNDIDO

Las ventanas circulares de cuarzo son utilizadas para visualizar el experimento dentro de la cámara de combustión resistiendo las altas temperaturas y presiones generadas dentro de la cámara. Las características de las ventanas son:

- Diámetro 152.4 mm
- Espesor 25.4 mm
- Angulo de la cuña de menos de 10 segundos de arco.

Para asegurar la estanqueidad y evitar el contacto directo de las ventanas con el cilindro y las partes exteriores se colocan juntas tóricas vitón para altas prestaciones como la de la fig.3.3.



Figura 3.3 Juntas elásticas

Para la colocación de las ventanas se utiliza la ayuda de una ventosa, fig.3.4, para evitar el contacto directo con las manos.



Figura 3.4 Ventosa

- Se utilizan dos partes exteriores para poder sujetar las ventanas de cuarzo por medio de los pernos como se muestra en la fig.3.5.

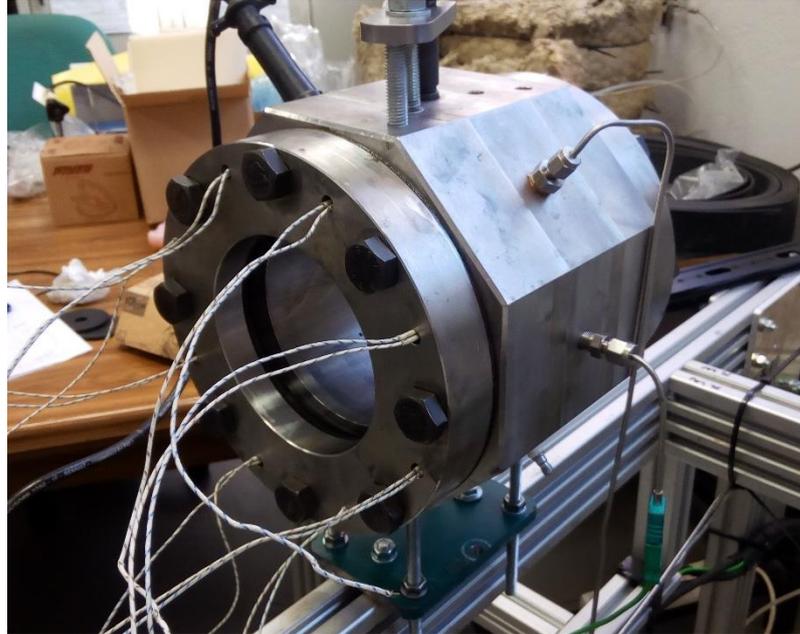


Figura 3.5 Cámara de combustión

- Para ajustar el apriete de las juntas toricas de vitón y el cristal se colocan juntas de 1 a 2 mm como las de la fig.3.6 comprobándose que a presiones bajas la estanqueidad de la cámara es la correcta.



Figura 3.6. Juntas cámara de combustión

Si las presiones son superiores a las de este experimento es necesario introducir más juntas para que el apriete entre las juntas toricas y el cristal sea más ajustado y sea capaz de resistir las altas presiones.

3.2.3. RESISTENCIAS

Para precalentar la cámara antes del proceso de combustión y así estar en condiciones óptimas de funcionamiento es necesario ocho calentadores o resistencias conectadas en serie, como se muestra en la fig.3.7.

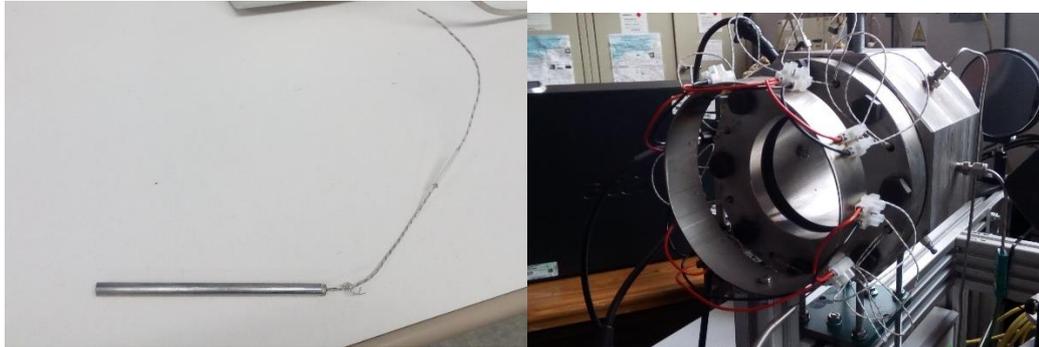


Figura 3.7 Calentador

El sistema de calentadores se alimenta eléctricamente por medio de regletas que están conectadas a la corriente eléctrica dentro del cuadro de dimensiones 24x20x10 adherido a la estructura.



Figura 3.8 Cuadro eléctrico para alimentación de calentadores

En la fig.3.8 podemos observar que el cuadro eléctrico está formado por un conjunto de regletas que distribuyen las diferentes fases y el neutro que proporcionan potencia al sistema de calentadores de la bomba.

En la fig.3.9 se observa la conexión de los convertidores analógico-digital con los respectivos captadores y el PC.

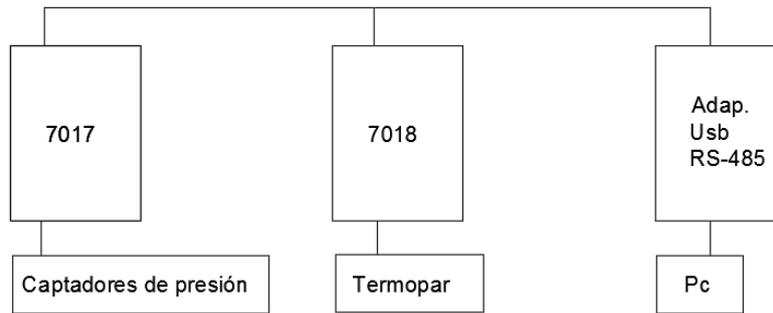


Figura 3.9 Conexión convertidores analógico-digital

3.2.4. BUJÍAS

Para producir la chispa eléctrica que inflama la mezcla en la cámara es necesario una bujía, como la de la fig.3.10. La distribución en la cámara de combustión se observa en la fig.3.11.



Figura 3.10 Bujía

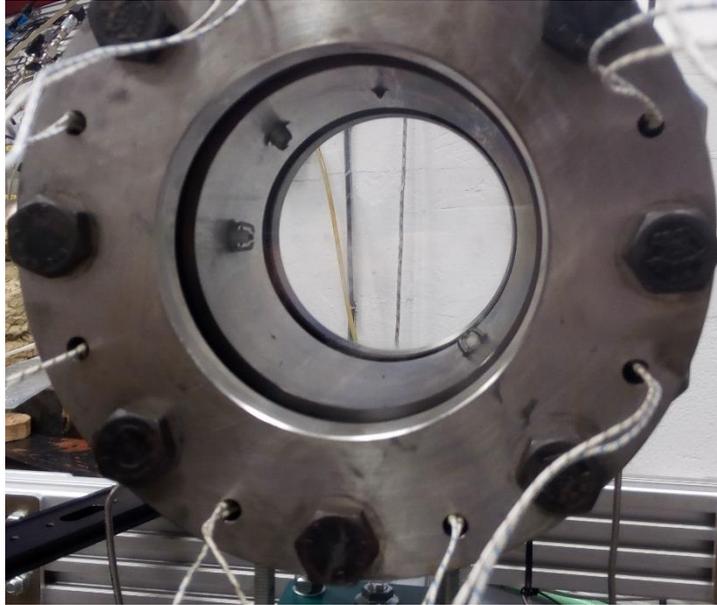


Figura 3.11 Posicionamiento bujías en la cámara de combustión

Para la producción de la chispa de la bujía es necesario una bobina de encendido, un sistema de encendido y un disparador.

La bobina de encendido es HOM 7700 732 263 de Siemens con funcionamiento de 12 V. En la fig.3.12 se puede ver que la bobina tiene conectada la toma a tierra a la propia estructura para evitar derivaciones indeseadas. El cable de salida se conecta directamente con la bujía de la bomba.

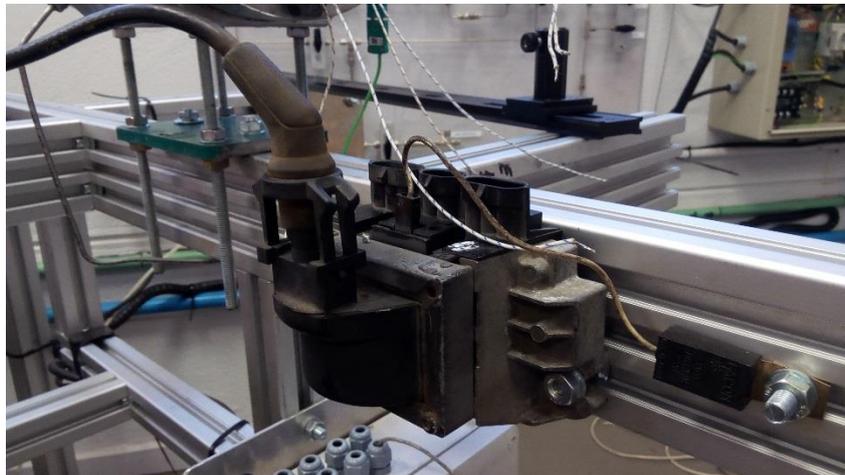


Figura 3.12 Bobina de encendido

En la fig.3.13 se observa un sistema de encendido para controlar el tiempo en milisegundos que se está cargando la bobina antes de generar la chispa. Las conexiones del sistema de encendido permiten proporcionar una extensión para realizar la ejecución del pulsador desde una distancia segura. En el interior del

sistema de encendido se encuentra una bobina, un condensador y una placa de circuitos. En el extremo del cable del pulsador está el disparador.



Figura 3.13 Sistema de encendido

3.3. SENSORES DE PRESIÓN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En la fig.3.14 se observan los captadores de presión de DRUCK PTX 1400 de 25, 10 y 4 bares manométricos y 1 bar absoluto.

El captador de presión está diseñado para soportar medios agresivos, el diafragma de silicio tiene como aislamiento acero inoxidable que proporciona excelentes medios de compatibilidad sin comprometer el rendimiento del propio captador.

La integración de dos hilos electrónicos proporciona un acondicionamiento de la señal del diafragma de silicio para generar una salida de 4-20 mA proporcional a la presión aplicada.



Figura 3.14 Captadores de presión y distribución

En la fig.3.14 derecha se puede observar que los captadores de presión están conectados al cuadro eléctrico por la parte superior. Los captadores de presión de 10, 4 y 1 bar están conectados por medio de una llave de paso para que en los experimentos donde la presión sea superior a la establecida por sus características no se produzca transmisión de presión entre la bomba y los captadores.

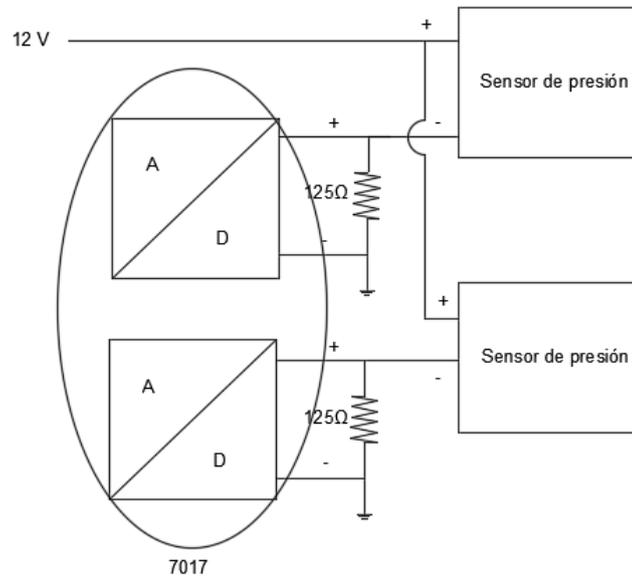


Figura 3.15 Conexión captadores de presión

En la fig.3.15 se observa la conexión de los captadores de presión con los convertidores analógico-digital. Debido a que el convertidor necesita tener como mínimo 9 V entre los extremos se introduce una resistencia de 125Ω .

El ordenador se encarga de calibrar las señales procedentes del convertidor y convertir la señal en bares para su posterior análisis.

En este caso experimental nunca se puede superar los 25 bares ya que el captador nos lo establece.

Los captadores de presión necesitan alimentación eléctrica esta distribución se lleva a cabo desde el cuadro de dimensiones 60x40x20 incrustado en la pared, como se muestra en la fig.3.16.

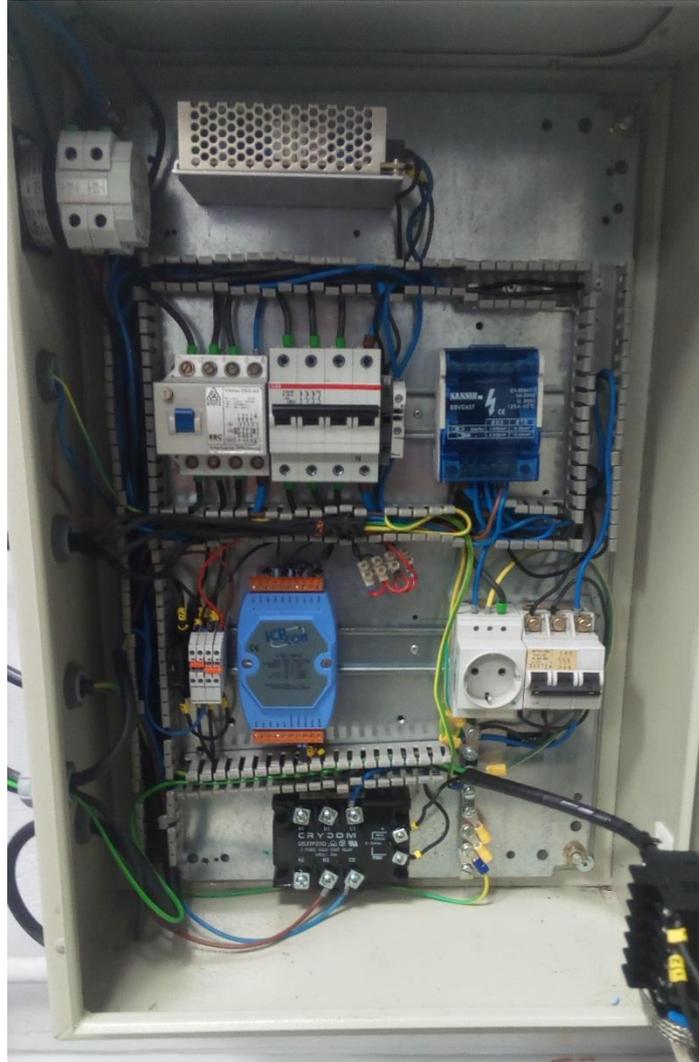


Figura 3.16 Cuadro eléctrico alimentación captadores de presión

Los diferentes componentes del cuadro eléctrico son:

- Una fuente de alimentación para transformar la corriente alterna en continua de 12 V.
- Un disyuntor diferencial que actúa como un dispositivo electromecánico que protege de contactos directos e indirectos provocados por partes activas de la instalación, se encarga de interrumpir o abrir el circuito eléctrico cuando la intensidad de corriente eléctrica que por él circula excede un determinado valor.
- Un magneto térmico que es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando sobrepasa ciertos valores, para evitar sobrecargas y cortocircuitos. Su funcionamiento se basa en los efectos magnético y térmico (Joule). El dispositivo consta de dos partes un electroimán destinada a la protección de cortocircuitos y una lámina

bimetálica encargada de la protección de sobre intensidades por medio de deformación térmica.

- Un repartidor de fase para distribuir el cableado del cuadro eléctrico.
- Una regleta que está compuesta por 4 piezas que distribuyen 12 V y neutro.
- Un módulo convertidor con 8 entradas analógicas diferenciales.
- Un segundo magneto térmico para la toma de corriente opcional.
- Un relé de estado sólido trifásico que es un dispositivo interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando una pequeña corriente es aplicada en sus terminales de control. Su función principal es el ajuste de la temperatura aplicada por los calentadores.

En la fig.3.17 se observa una fotografía lateral del cuadro eléctrico.

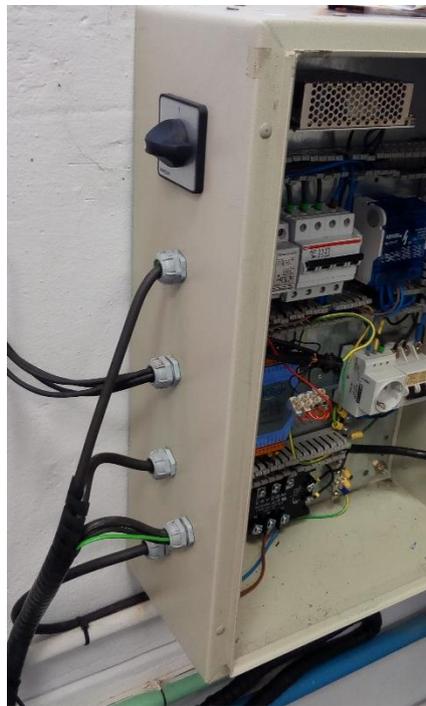


Figura 3.17 Alimentación cuadro eléctrico

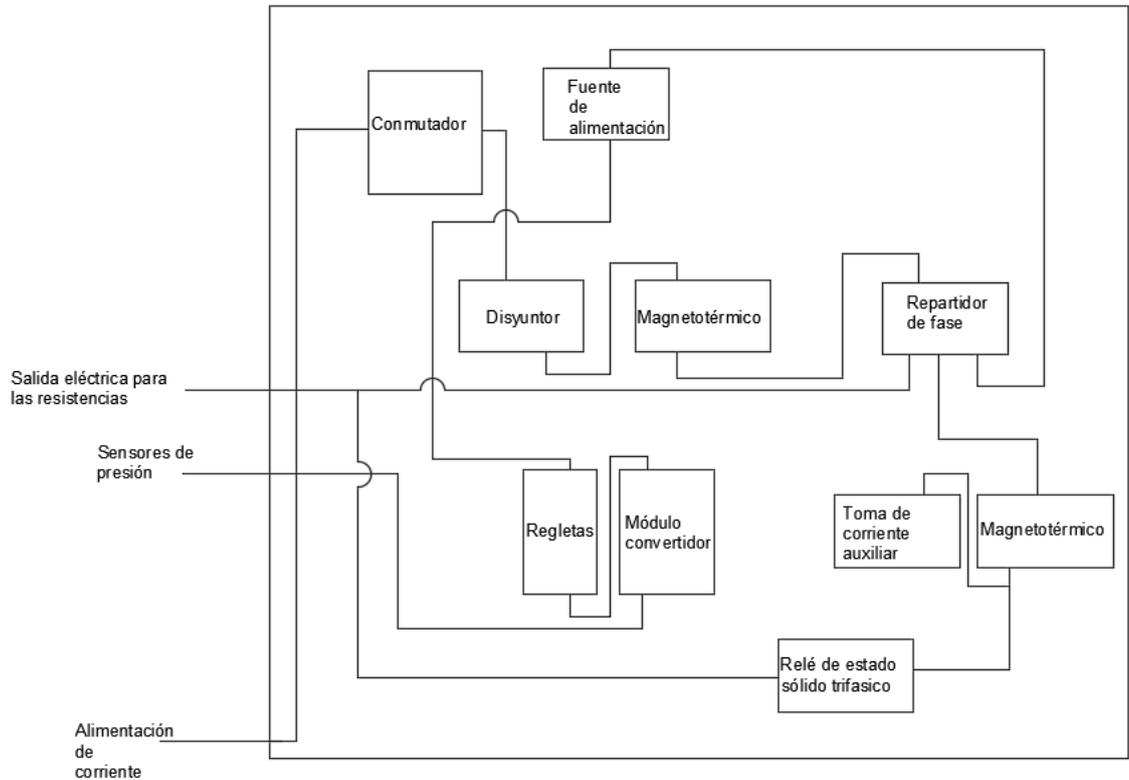


Figura 3.18 Esquema cuadro eléctrico

En la fig.3.18 se observa el esquema simplificado del interior del cuadro eléctrico.

3.4. LÍNEA DE GASES

La línea de gases es considerada como los distintos conductos, válvulas, reguladores, botellas, etc., que permiten manipular la mezcla de gases segura y correctamente hasta la cámara de combustión y su posterior expulsión de los productos de la combustión.

3.4.1. GASES

Los gases que se pueden introducir en la cámara de combustión son metano, hidrogeno, anhídrido carbónico, nitrógeno, monóxido de carbono y aire.

Mediante el método de presiones parciales se introducen los gases dentro de la cámara de combustión. El proceso de llenado se controla por medio de un programa informático, que indica al usuario la presión de la cámara.

El principal gas de este estudio es el metano, el cual está almacenado en una botella metálica de forma esbelta. La botella tiene la salida regulada por una llave conectada a un regulador de presión.

Universidad de Valladolid

La presión a la que está contenida el metano es de 200 bares, el volumen almacenado es de 12.43 Nm³ y la pureza del gas es de 99.50%.

El aire de la línea es aire húmedo. Su composición es 21% O₂ y 79% N₂. La presión máxima de aire que puede suministrar la línea es de 7 bar.

3.4.2. PANEL DE CONTROL DE GASES

El sistema de alimentación está compuesto de tuberías, llaves, válvulas anti retorno y elementos de seguridad.



Figura 3.19 Red de alimentación de aire y combustible

En la fig.3.19 se observa una fotografía del panel de control para los gases y en la fig.3.20 se puede ver un esquema del mismo junto con la bomba y el sistema de vacío.

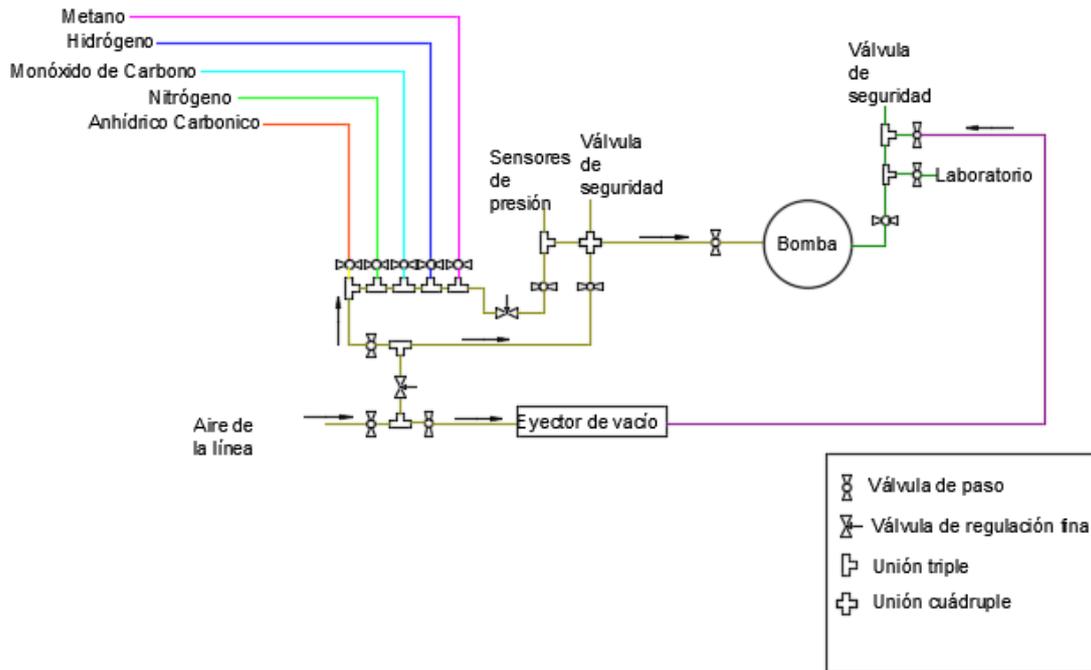


Figura 3.20 Esquema de alimentación de aire y combustible

3.4.3. ENTRADA-SALIDA DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

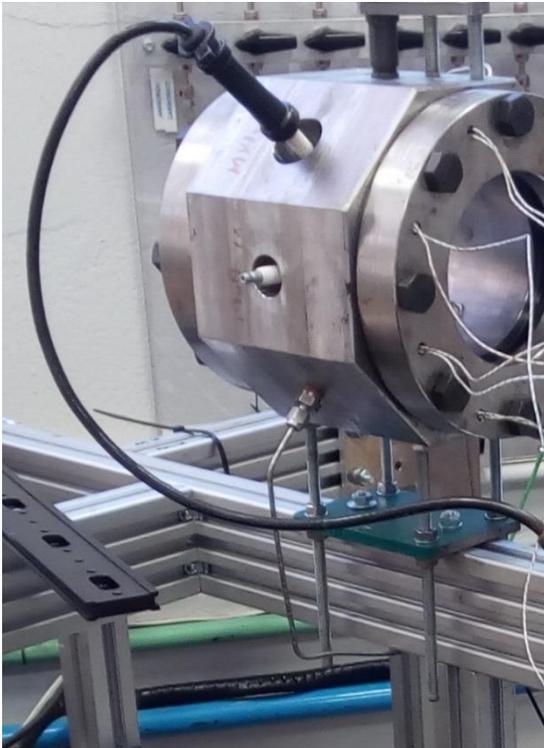


Figura 3.21 Sistema de admisión de la cámara

Para introducir gases a la cámara de combustión del sistema de alimentación exterior se utiliza un conducto de Sandvik de características ASTM A632 y con unas dimensiones de 1/8 x 0,028 pulgadas, este conducto es necesario para soportar las diferentes presiones y temperaturas del experimento, dicha distribución se observa en la fig.3.21.

Los conductos se conectan a la cámara de combustión por medio de racores para evitar fugas y accidentes.

3.4.4. BOMBA DE VACÍO

Para producir el vacío en la bomba se utiliza un eyector de vacío en línea de fase única, fig.3.22, que al introducir aire de la línea por el extremo de suministro este proporciona una succión por el otro extremo conectada a la salida de la bomba. Las características del eyector de vacío son:

- Diámetro de la boquilla: 0.7 mm.
- Máxima presión de vacío: -85 KPa
- Máxima presión de entrada: 0.45 Mpa.
- Máximo flujo de succión: 12 l/min.

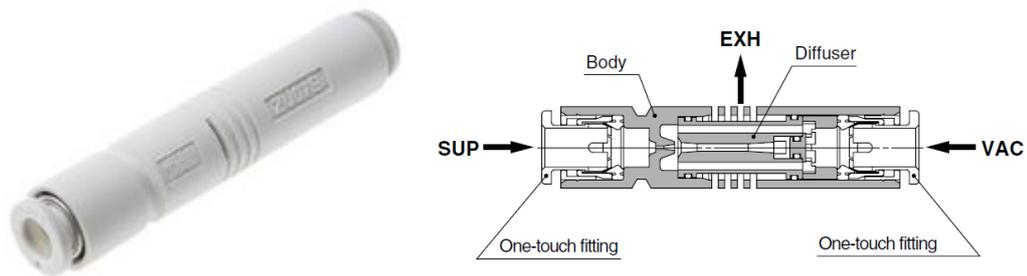


Figura 3.22 Eyector de vacío

Para poder observar el vacío en la bomba es necesario mantener el contacto de los captadores de presión con la bomba.

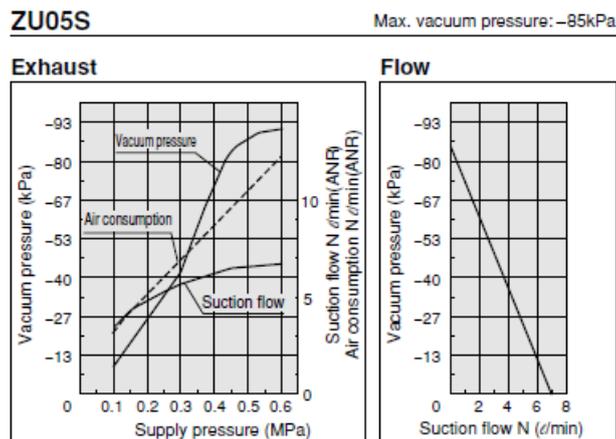


Figura 3.23 Gráficas del eyector de vacío

En la fig 3.23 se observa los diferentes valores de la presión de vacío en el escape en función de la presión de suministro y la presión de vacío en el escape en función del flujo de aire suministrado.

3.4.5. VISUALIZACIÓN PRESIÓN CÁMARA COMBUSTIÓN

Para visualizar los valores obtenidos de los captadores de presión se hace uso de un programa de LabView llamado *Visualización reducido*.

En la fig.3.24 se observa la interfaz de la visualización. El pulsador de “STOP” detiene el programa. El pulsador de “Ajustar nivel” ajusta la presión del captador de 1 bar con los otros tres captadores, esto es necesario porque los captadores de 4, 10 y 25 bares son manométricos y por lo tanto cuando la presión es de 1 bar o menor sus valores son negativos, es decir, cuando la presión es menor que 1 bar las intensidades emitidas por los captadores manométricos son de menos de 4 mA. Cuando el circuito de gases está conectado directamente a la atmosfera se pulsa “Ajustar nivel” para que así los captadores manométricos tengan como referencia mínima la presión atmosférica.

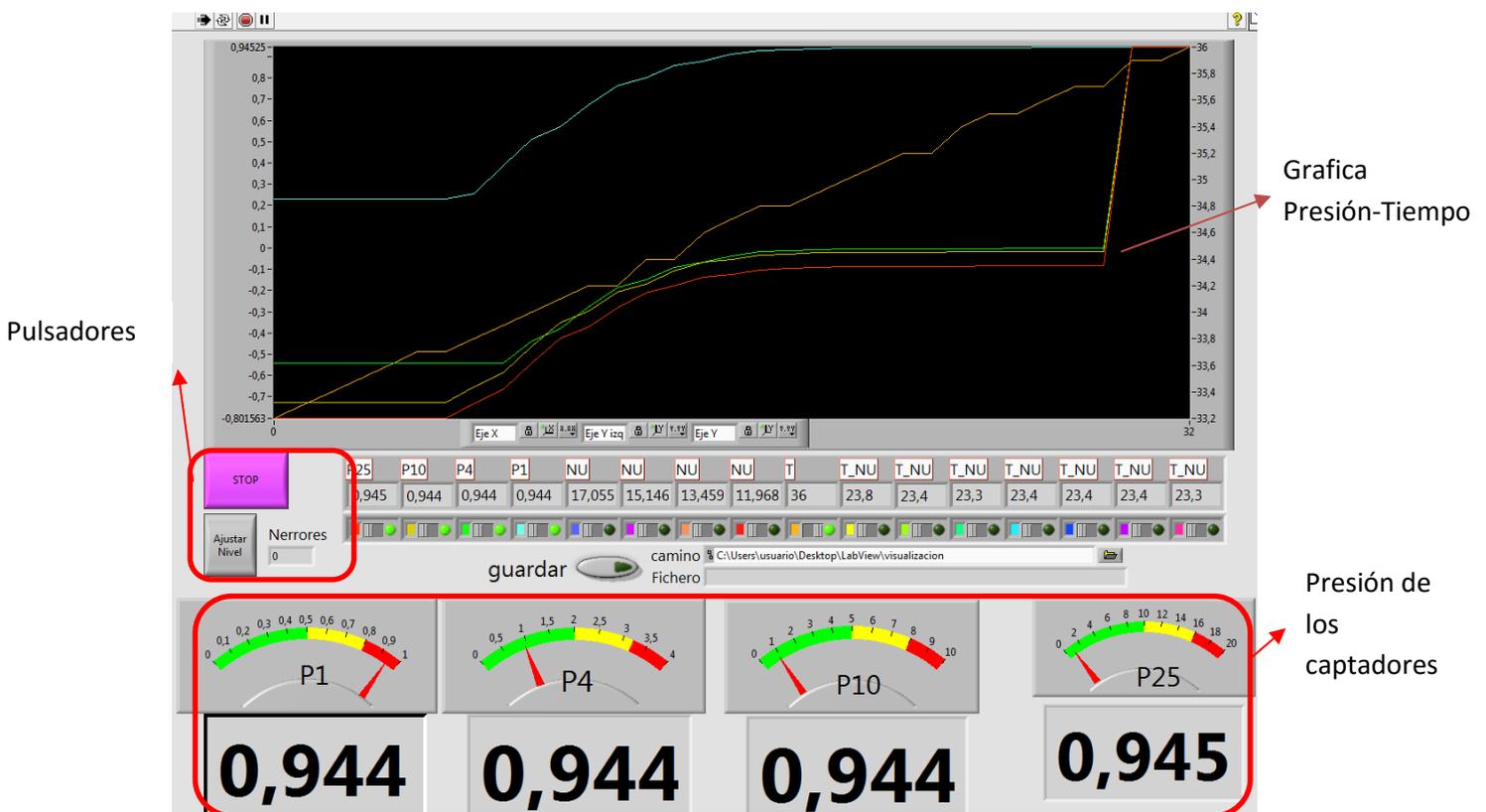


Figura 3.24 Interfaz Visualización

3.5. INSTRUMENTACIÓN ÓPTICA

3.5.1. SOPORTE DE LA ESTRUCTURA

Para poder realizar el experimento es necesario una estructura que proporcione rigidez y estabilidad a las diferentes partes del montaje. El soporte está formado por perfiles de aluminio. La forma tridimensional del soporte se puede ver en la figura 3.25.

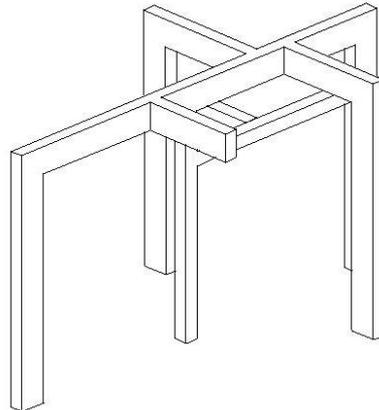


Figura 3.25 Soporte de la estructura

Las diferentes secciones se tienen que modificar por medio de una sierra para obtener las longitudes adecuadas para el experimento y su posterior acondicionamiento de la superficie cortada para obtener una unión más rígida. Como se puede observar en la fig.3.25 se incorpora una extensión en la viga central para poder apoyar el carril guía y así obtener una distancia mayor que la proporcionada por si solo por el carril guía.

También se puede ver en la fig.3.25 un soporte a una altura diferente para la fuente de luz, está formada por secciones cuadradas de 40x40 mm debido a que no se necesita gran rigidez, sus dimensiones están adecuadas para el acondicionamiento de la fuente de luz. En la fig.3.26 se puede observar las dimensiones de la superficie superior de la estructura y la altura de los soportes.

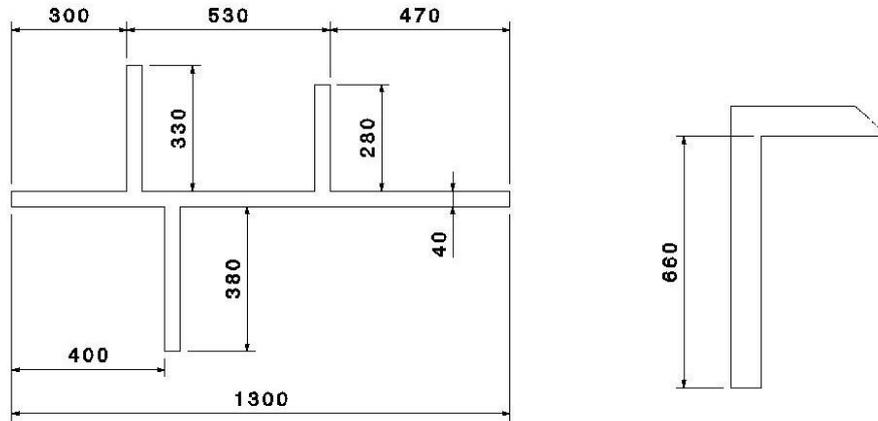


Figura 3.26 Dimensiones del soporte de la estructura en mm

Para unir las diferentes secciones se utiliza una variedad de conexiones en ángulo recto llamados conexiones del soporte de brida, figura 3.27. Esta flexibilidad permite al usuario ser imaginativo y construir unas estructuras bastante precisas y extremadamente resistentes.



Figura 3.27. Conexiones del soporte de brida

Para reforzar la estructura se fabrican ocho placas en forma de escuadras, dos por cada pilar, como el de la fig.3.28. Para la unión de las placas con la estructura se utilizan tornillos de cabeza en T para un mejor ajuste en los raíles de las secciones a unir.

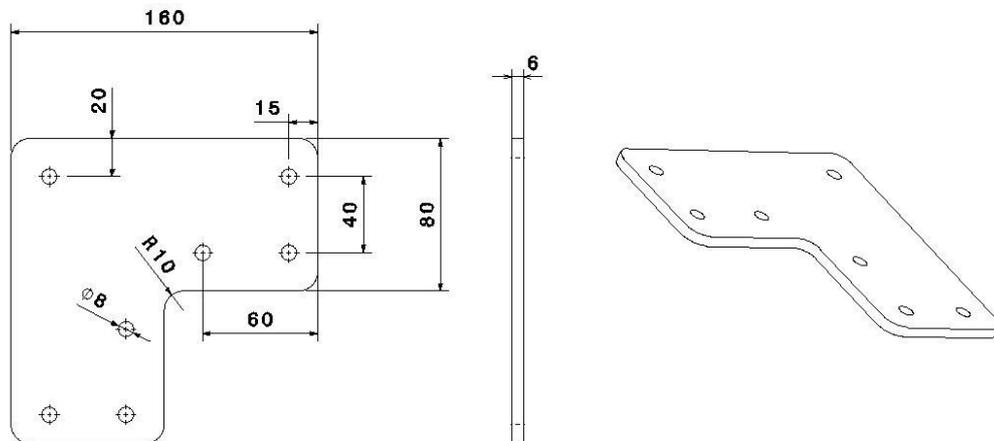


Figura 3.28 Escuadras en mm

Para evitar vibraciones producidas por el laboratorio y evitar desplazamientos indeseados la estructura tiene cinco pies de máquinas como las de la fig.3.29. Los pies de nivelación están formados por una poliamida antideslizante y está unida a la sección de 40x40 mm por medio de un tornillo con una rótula que proporciona tres grados de libertad.



Figura 3.29 Pie de nivelación

Para poder unir las secciones rectangulares de 40x80 mm con la pieza para adhesión de pies de máquina de 40x40 es necesario fabricar una pieza como la de la fig.3.30.

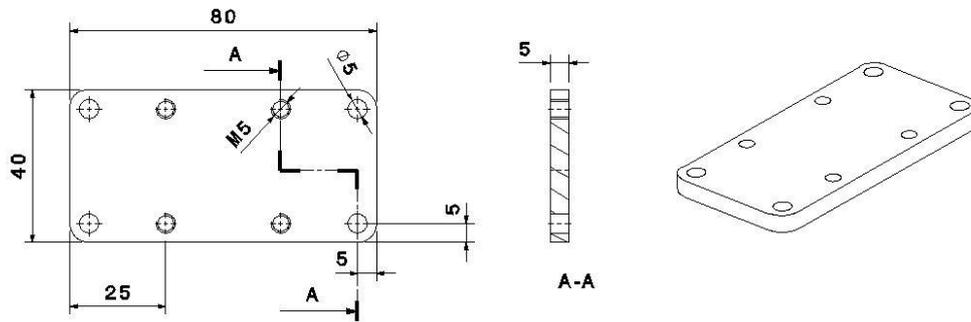


Figura 3.30 Pieza pie de nivelación en mm

3.5.2. RAIL ÓPTICO

El carril óptico es el componente estructural principal del sistema. Los catálogos de perfiles proporcionan dos carriles de acero de 670 mm de longitud como se muestra en la fig.3.31. Este perfil garantiza que los diferentes elementos ópticos pueden obtener un agarre fuerte sobre el carril, siendo lo suficientemente plana y ancha para ser estable. Los filetes proporcionan un deslizamiento longitudinal de los soportes y una fijación rígida ante vibraciones.

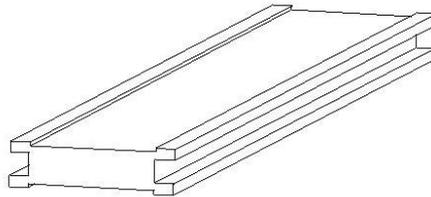


Figura 3.31 Rail óptico

Debido a que los railes no proporcionan la longitud suficiente para soportar el espejo reflector, la cuchilla y la cámara, con su respectivo soporte, la solución es soportar por el rail la cuchilla y la cámara alineando con respecto al espejo dicho rail. Esta opción proporciona una longitud bastante más larga que por el propio carril pero es necesario un alineamiento por medio de paralelismos ante cualquier cambio. En la fig.3.32 se observa la distribución espacial de los carriles con respecto al soporte de la estructura.

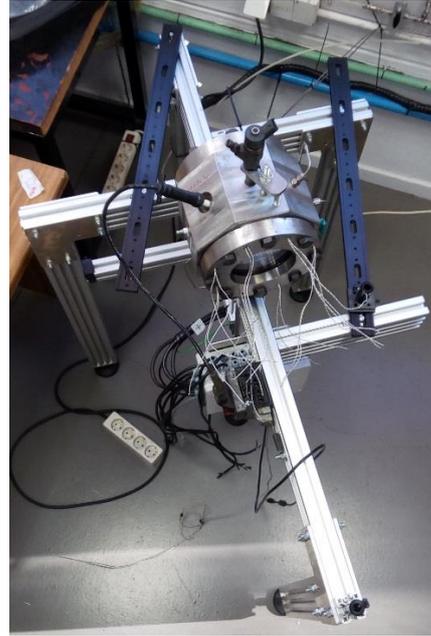
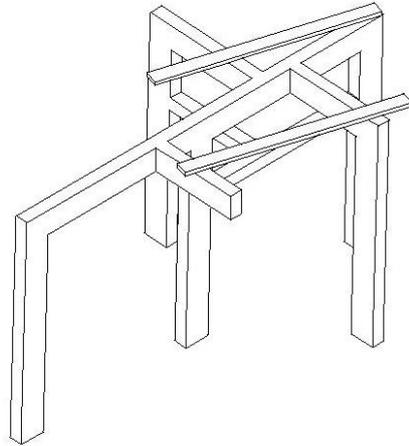


Figura 3.32 Posicionamiento rail óptico

3.5.3. BASE DE MONTANTES DESLIZANTE PARA RAIL ÓPTICO

Para montar los componentes en el carril se utilizan las bases montantes deslizantes del rail óptico. La base desliza a través del carril óptico de forma longitudinal. La base se tiene que sujetar al carril firmemente y poder ser aflojado por medio de un tornillo. El conjunto de la base montante deslizante consta de dos partes, la base y el tornillo de mariposa.

El tornillo de mariposa se utiliza para sujetarla al carril por medio de presión en la superficie. En la figura 3.33 se puede observar las dimensiones de la base.

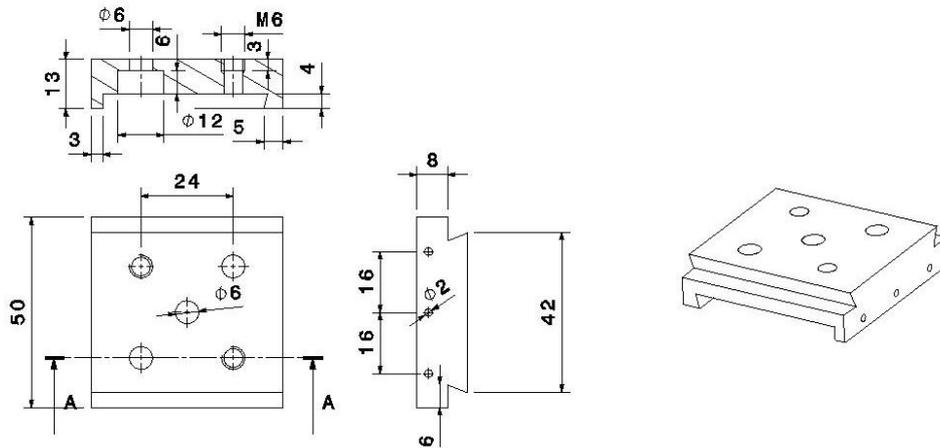


Figura 3.33 Base montante deslizante rail óptico en mm

Para unir la base montante óptico a los elementos del montaje que se sitúan sobre el rail es necesario el soporte para poste de montaje y el poste de montaje común a todos los elementos, excepto a el emisor de luz LED que tiene una varilla más larga. Las dimensiones del soporte para poste de montaje son de 50 mm de altura por 25 mm de diámetro.



Figura 3.34 Poste de montaje

En la fig.3.34 se observa el poste de montaje con unas dimensiones de 50 mm de altura por 12 mm de diámetro.

En la fig.3.35 se observa la base de montante deslizante con su respectivo tornillo de mariposa, el soporte para poste de montaje y el poste de montaje, unido al carril óptico.

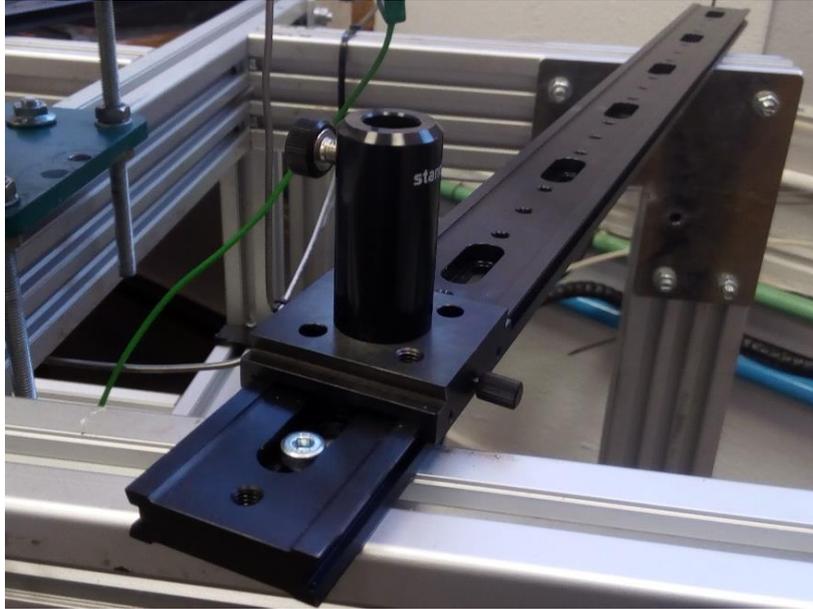


Figura 3.35 Conjunto sobre rail óptico

3.5.4. SECCIÓN SOPORTE PARA EL ESPEJO

Para poder solucionar la falta de longitud del carril óptico es necesario la fabricación de un soporte para el segundo espejo que le proporcione la alineación y la altura adecuada para el correcto funcionamiento.

Como se puede ver en la fig.3.36 el soporte del espejo se une a la estructura por medio de la sección de 40x40 mm con una altura de 20mm. Esta sección está unida a la estructura por medio una conexión de soporte de brida como las del resto de la estructura, para ello es necesario roscar dentro de la pieza para introducir el casquillo.



Figura 3.36 Sección de soporte para el espejo

3.5.5. ESPEJOS PARABÓLICOS

Es la parte más importante del experimento debido a su función óptica. Un espejo emite el haz de luz con rayos paralelos provenientes del LED de la fuente de alimentación.

El otro espejo concentra el haz de luz proveniente del otro espejo en el foco.

Los parámetros más importantes para seleccionar los espejos se definen por el espacio disponible para la visualización, este parámetro se define como el radio de curvatura del espejo y no está relacionado con el diámetro del propio espejo.

Las características de los espejos son:

- Diámetro de 152.4 mm.
- Distancia focal (f) 609.6 mm.
- Espesor
- Recubrimiento de aluminio 250-700 nm.
- Más del 85% de dieléctrico.

En la fig.3.37 se muestra la parte frontal del espejo introducido en el soporte del espejo y sobre la sección del soporte del espejo.

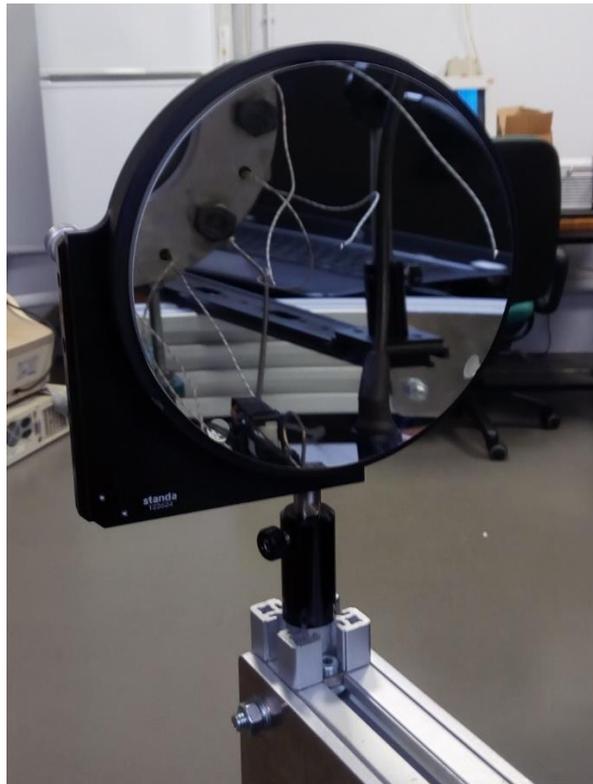


Figura 3.37 Espejo parabólico

Hay que tener un especial cuidado para el manejo y la conservación de los espejos por lo tanto se deben seguir ciertas pautas:

- No se debe tocar con las manos la parte pulida del espejo. Para el transporte y la colocación adecuada de los espejos se ha utilizado una ventosa por la parte anterior para evitar el contacto con la superficie pulida como la de la figura 3.4.
- La parte pulida del espejo debe limpiarse con acetona o agua destilada y una gasa presionando suavemente sobre la superficie para no producir imperfecciones.
- Se debe pasar un algodón suavemente para retirar los restos sólidos y si quedan restos de algodón limpiarlos con una inyección de aire.

3.5.6. MONTURA DE GRAN APERTURA

En la fig.3.38. se observan la montura de gran apertura para los espejos que tienen la función de posicionar y tener un cierto grado de libertad. En la montura se posiciona los espejos y se aprisiona a la montura por medio de un tornillo sin cabeza con hendidura Allen, situado en un lateral del mismo. Los grados de libertad son vertical y horizontal con respecto al eje del espejo y se pueden modificar ligera y fácilmente por medio de reguladores en la montura.

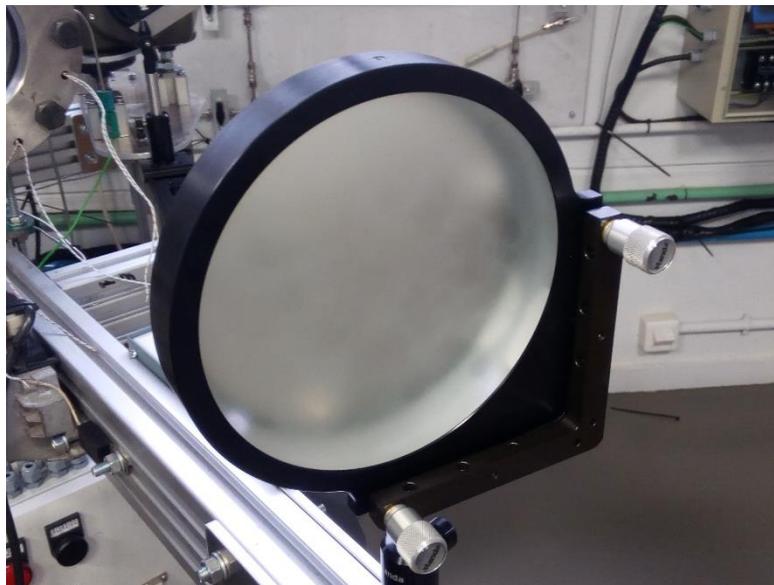


Figura 3.38 Montura de gran apertura

3.5.7. FUENTE DE LUZ

La fuente de luz como la de la fig.3.39. debe proporcionar un haz de luz uniforme en condiciones de alineamiento óptimo. La fuente de luz es una XENON X-300-M que proporciona una potencia de 300 W y además tiene un regulador para ajustar la intensidad de luz suministrada.



Figura 3.39 Fuente de luz

Debido a la falta de una pieza llamada adaptador Storz se tiene que fabricar una pieza similar como la de la fig.3.40.

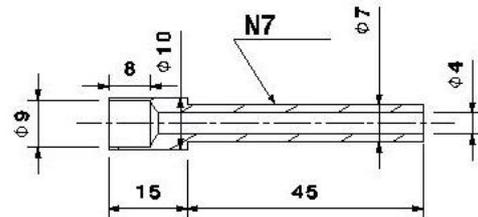


Figura 3.40 Adaptador Storz en mm

La forma del cilindro inferior del adaptador Storz proporciona que al introducirlo por el orificio de la fuente de luz este modifique la posición de una ranura para evitar la entrada de suciedad en ausencia de dicha pieza. En la parte superior del adaptador Storz se introduce el extremo del cable de fibra óptica de la figura 3.41



Figura 3.41 Fibra óptica

3.5.8. FIBRA ÓPTICA Y ADAPTADOR

La fibra óptica tiene una longitud de 1.2m y un grosor de 3 mm de diámetro, los extremos se observan en la fig.3.41.

El adaptador de la fibra óptica consta de tres piezas unidas por medio de imanes para su manipulación, un adaptador de fibra óptica, una placa trasera y un diafragma a la salida de la fibra que permite modificar el haz de luz emitente.

En la fig.3.42 se puede observar el conjunto del soporte de la fibra óptica y el despiece de sus respectivas piezas.



Figura 3.42 Adaptador de fibra óptica

Para proporcionar una altura suficiente al soporte de la fibra óptica es necesario fabricar un poste de montaje especial como el de la fig.3.42, que es de idénticas dimensiones que la varilla del montante del rail óptico, pero con una dimensión longitudinal de 120mm.

3.5.9. CÁMARA

El sistema de recepción de imágenes consta de una cámara conectada a un ordenador con la aplicación que permite la perfecta visualización de las imágenes, como la de la fig.3.43.

El sistema de captura de imágenes es una PHANTOM V210 con las siguientes características:

- 1 Megapíxel en más de 2000 fps.
- Pantalla panorámica de 1280 x 800 de resolución.
- Máxima velocidad de 300000 fps.
- Mínima velocidad de captura de 2 μ s.



Figura 3.43 Cámara

3.5.10.OBJETIVO

El objetivo es un AF Nikkor 50 mm f/1.8D de Nikon, fig.3.44, con las siguientes características:

- Distancia focal: 50 mm
- Diámetro x longitud: 63.5 x 39 mm
- Peso: 155 gr.
- Apertura máxima: f/1.8.
- Apertura mínima: f/22.



Figura 3.44 Objetivo

3.5.11. DISPARO CÁMARA

El conjunto de captura de imágenes incluye un dispositivo para vincular el momento de captura de imágenes con una acción exterior, figura 3.45, en este caso con el pulsador de la chispa de la bujía.



Figura 3.45 Disparo cámara

3.5.12. SOPORTE DE LA CÁMARA

Es necesario fabricar un soporte personalizado para la cámara para que el objetivo de esta tenga la misma altura que los haces de luz del experimento, fig.3.47.

El soporte está fabricado a partir de dos placas de aluminio previamente diseñadas y fabricadas posteriormente por una empresa exterior, fig.3.48, la unión de las dos placas se realiza por medio de pies de nivelación junto con una sección de 40x40 de una longitud de 33mm como se puede observar en la fig.3.46.

La parte inferior del soporte tiene adherido por medio de tornillos las bases de montaje deslizante para poder tener libertad de deslizamiento con respecto a la guía. La parte superior tiene realizados tres orificios roscados de métrica 3/8 -16 especial para poder soportar la cámara y evitar deslizamientos.



Figura 3.46 Soporte cámara



Figura 3.47. Soporte cámara con cámara

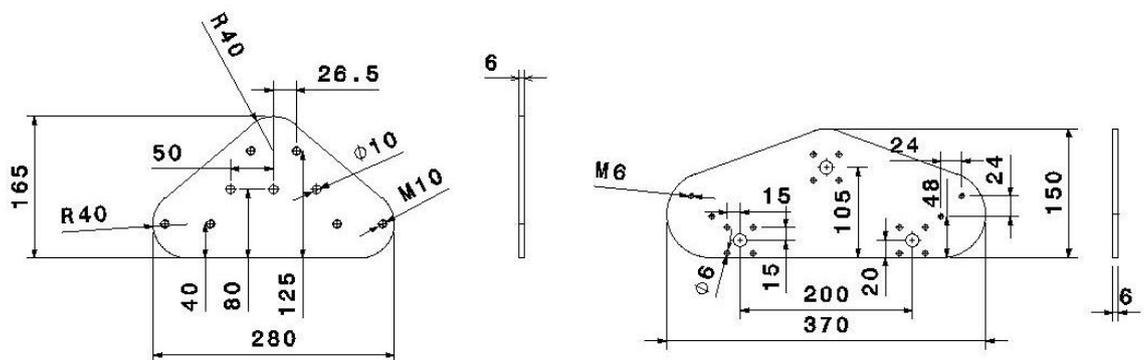


Figura 3.48 Dimensiones soporte cámara en mm

3.5.13. CUCHILLA

La cuchilla tiene la función de producir la difracción sobre el objetivo de la cámara, solo es necesario que sea un objeto con bordes afilado, pero en este caso se utiliza una cuchilla corriente de afeitar, fig.3.49.

Su colocación es importante en este caso es vertical con respecto al eje del soporte.



Figura 3.49 Cuchilla

3.5.14. SISTEMA DE ADQUISIÓN DE IMAGENES

Para la obtención, la recopilación y la visualización de los datos obtenidos del experimento se utiliza el programa “Camera Control Software(PPC)” de Phantom, fig 3.50.

Los parámetros de la cámara para esta visualización son:

- Resolución: 640x480
- Frecuencia de muestreo: 4000 pps
- Tiempo de exposición: 30 μ s

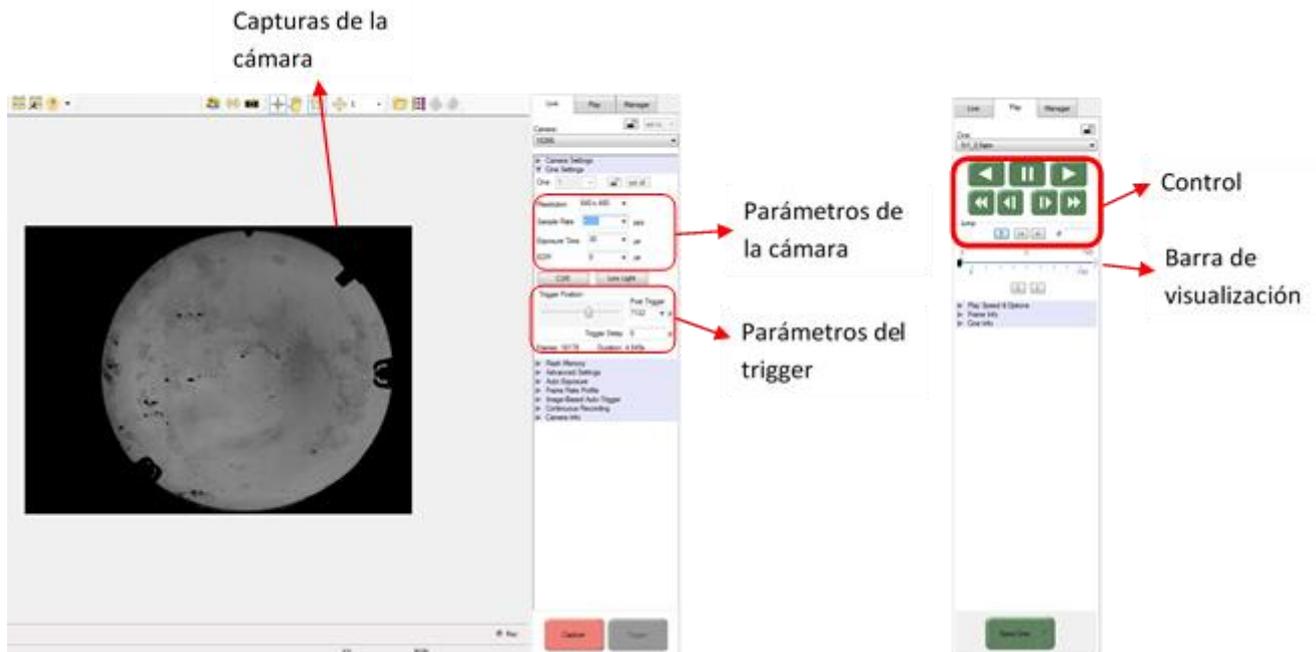


Figura 3.50 Interfaz Camera Control Software

3.6. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS

Para la obtención de datos experimentales óptimos es necesario un ajuste de los diferentes elementos ópticos del sistema.

En la fig.3.51 se observa la disposición de los diferentes elementos expuestos anteriormente.



Figura 3.51 Disposición elementos

Una vez posicionado todo el equipo necesario para realizar los experimentos es necesario un ajuste de óptica para comprobar la alineación óptima del sistema.

Se empieza asegurándose de que el foco de luz puntual proveniente de la fuente de luz está a una distancia igual que la distancia focal del primer espejo, sobre el mismo rail y a la misma altura.

Universidad de Valladolid

Para continuar es necesario fabricar dos piezas de secciones 40x40 mm como las de la figura 3.52. El elemento emisor está compuesta por una sección de longitud 80 mm unido a una placa de 200x40x5 mm con un orificio de 5 mm de diámetro a una distancia de 15 mm de la parte superior.

El elemento receptor está compuesto por una sección de longitud 170 mm unido a una placa de 80 x40 x 5 mm proporcionando una altura total de 200 mm.



Figura 3.52 Piezas alineamiento optimo

Para comprobar la linealidad del haz de luz proveniente del primer espejo se utiliza las dos piezas explicadas anteriormente. Primero se coloca el elemento emisor a una distancia cercana del primer espejo, luego se posiciona el elemento receptor lo más lejos posible, pero en la misma guía central de la estructura. Si el sistema está mal alineado el orificio será proyectado con un diámetro diferente al original y/o a una distancia no coincidente con el sistema emisor.

Si el orificio no es del mismo diámetro el emisor de luz Xenón no está exactamente en la dirección focal del segundo espejo.

Si el orificio no está a una distancia coincidente con el sistema emisor el problema está en la orientación del primer espejo.

Hay que asegurarse que el rail de la cámara está alineado con el eje central de la estructura, al igual, asegurarse que los dos railes son paralelos, es decir tienen el mismo ángulo.

Se posiciona la cuchilla a una distancia igual a la distancia focal del segundo espejo, y a continuación, se coloca la cámara para la obtención de datos.

Una técnica adecuada para posicionar la cuchilla en la distancia focal es ir moviéndola longitudinalmente por el rail hasta que el punto del haz de luz tenga una forma perfectamente circular.

3.7. SINCRONIZACIÓN

La necesidad de sincronizar el sistema de disparo de la bujía con el sistema de captación de imágenes se puede solucionar por dos vías, usar una conexión TTL o cerrar el circuito de la cámara. Para usar una conexión TTL es necesario tener una corriente de 5 V y sistema de encendido solo proporciona corrientes de 12 V.

Se opta por adaptar la señal del sistema de encendido de la bujía para que cuando el circuito se cierre produzca una corriente de 20 mA en la entrada del optoaclopador emitiendo una luz LED, y este cierre el circuito de la cámara como se muestra en la fig. 3.53. Además, esta disposición permite tener separados los sistemas eléctricamente.

Las características del diodo del optoaclopador es una caída de tensión de 1.2 V con una corriente de 20 mA por lo que se introduce una resistencia de 500 Ω adaptando la señal de salida del sistema de encendido.

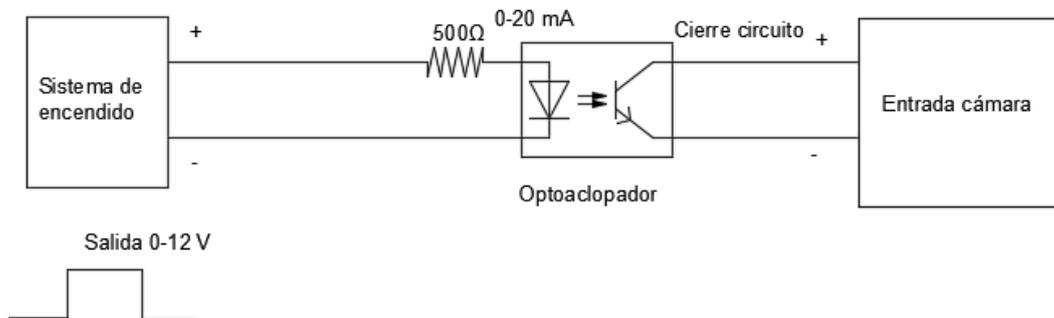


Figura 3.53 Circuito sincronización.

3.8. PUESTAS A PUNTO

Entre los principales problemas que han surgido para la correcta puesta a punto del sistema:

- Una vez llenado la bomba se producen fugas por medio de las juntas, cuanto más presión superior a la atmosférica más propensos son los gases de la instalación a fugarse al exterior. Para detectar en qué lugar de la instalación se producen las fugas es necesario agua jabonada con un pincel, en el lugar donde se produzcan fugas se producirán burbujas de aire salientes.

Para evitar fugas se utiliza teflón, politetrafluoroetileno, para que las juntas roscadas no produzcan fugas.

- La formación de la una imagen con un contraste distinto en función del posicionamiento de la cuchilla nos lleva a la modificación del objeto utilizado con tal fin. En la fig. 3.54 se observa el componente utilizado como cuchilla, está formado por una placa rómbica de 1 mm de espesor con un orificio en el centro de la pieza avellanado para producir el efecto de cuchilla deseado.

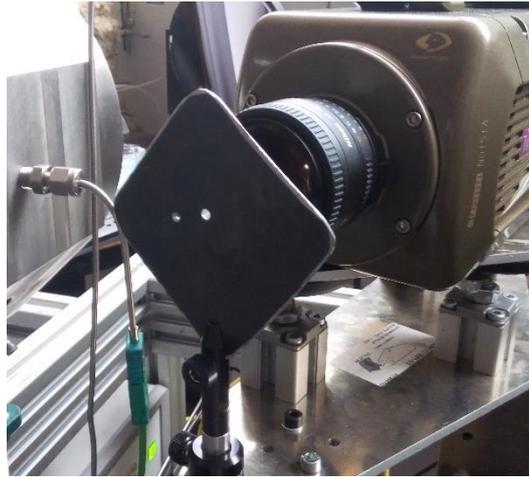


Figura 3.54 Adaptación cuchilla.



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



4. RESULTADOS

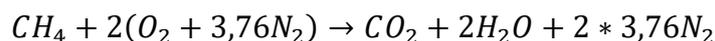
En la experimentación la presión inicial se mantiene por debajo de la atmosférica para que la combustión no genere presiones muy elevadas y por lo tanto inseguras.

Para poder generar una presión menor que la atmosférica primero se vacía la bomba de combustión por medio del eyector de vacío, se introduce aire de la línea por un extremo y por el otro se produce vacío por medio de una tobera.

El vacío se conecta a la salida de la bomba y el resto de salidas se cierran para mantener el vacío. La entrada de la bomba se conecta solamente con los sensores de presión para tener control sobre las presiones de la cámara de combustión.

Una vez establecida la presión de vacío se introduce aire o metano en las proporciones adecuadas para la combustión en estado estequiométrico.

Para el caso del metano, que es el combustible utilizado mayoritariamente en el experimento, la combustión estequiométrica en aire es:



El aire en condiciones normales contiene una relación porcentual volumétrica nitrógeno/ oxígeno 79/21 (3,76).

Por lo tanto, es necesario una unidad de mol de metano por cada 9,52 moles de aire para una relación estequiométrica. En nuestro caso introducimos las siguientes presiones:

Dosado relativo	Presión aire (Bar)	Presión CH4 (Bar)	Presión Total (Bar)	Dosado relativo real
1	0,462	0,047	0,509	0,968484848
0,9	0,455	0,044	0,499	0,920615385
0,8	0,467	0,039	0,506	0,79503212

Tabla 4.1 Proporciones aire-combustible.

Una vez alcanzada la mezcla se cierran las válvulas de paso y por lo tanto los captadores de presión no tienen información de la cámara de combustión. Esta última acción es por precaución para evitar que los captadores de presión reciban la subida de presión generada por la combustión.

Para garantizar que no hay variaciones de temperatura

Se precalienta la cámara de combustión a una temperatura de 40°C para garantizar que no hay variaciones de temperatura en función de la temperatura ambiente.

Para evitar accidentes vinculados con la combustión se utiliza el disparador cuyo pulsador está situado en la habitación contigua, dicho disparador está vinculado al momento de captura de la cámara.

4.1. EXPERIMENTO

En el experimento se realiza una combustión con metano estequiométrico en la cámara de combustión.

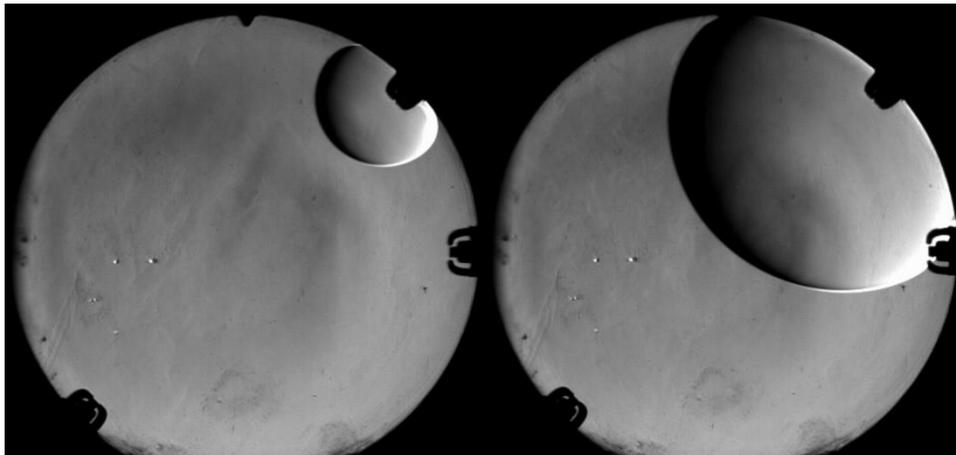


Figura 4.1 Experimento Etapa 1 y 2.

En la etapa 1 se puede apreciar la formación del frente de llama producido en la bujía que separa la zona fresca de la zona quemada. La combustión es por avance del frente de llama, es decir, la zona quemada transmite calor al frente de llama, entonces la mezcla que integra el frente de llama se inflama, pasando a engrosar la zona quemada, provocando que avance el frente de manera controlada y comprimiendo la zona fresca.

En nuestro caso la combustión es laminar debido a que no hay movimiento de aire en la cámara de combustión.

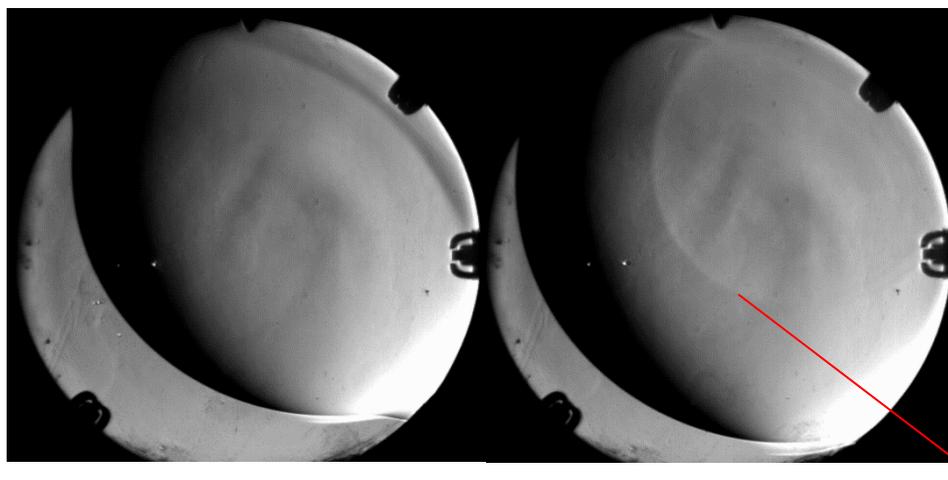


Figura 4.2 Experimento Etapa 3 y 4.

Choque del frente de llama con el cristal

Universidad de Valladolid

En la etapa 3 y 4 se observa que la combustión se hace más lenta debido a que la velocidad de expansión disminuye debido a que la zona fresca es cada vez más pequeña.

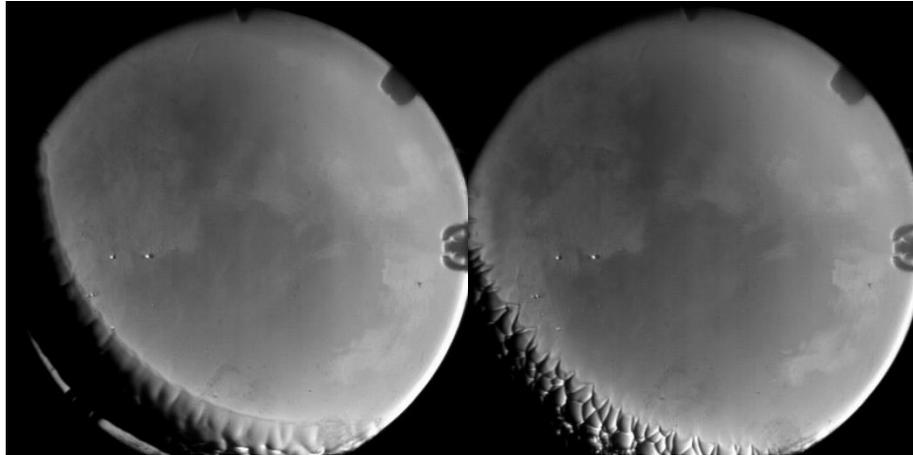


Figura 4.3 Experimento 1 Etapa 5 y 6

En las etapas 5 y 6 se observa que la mezcla se enfría y aparece humedad en la superficie de las ventanas de sílice como productos de la combustión.

Cuando está finalizando la combustión se observa que la llama de combustión se convierte en celular.

4.2. COMPARACIÓN CON DIFERENTES DOSADOS

En la tabla 4.2 se observa diferentes fotogramas para diferentes dosados relativos de los cuales se observa las siguientes conclusiones:

- Según disminuye el dosado relativo la velocidad de combustión disminuye y por lo tanto el frente de llama tarda más tiempo en recorrer la cámara de combustión.
- En todos los dosados relativos se observa que la velocidad del frente de llama disminuye al final del proceso posiblemente debido al enfriamiento del frente al acercarse a la pared.

Dosado relativo Milisegundos	0,8	0,9	1
12,5			
50			
75			
100			
125			

Tabla 4.2 Tabla comparativa de diferentes dosados relativos



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

En este apartado se presenta una lista de los objetivos alcanzados que se perseguían con la elaboración de este TFG.

- Se ha conseguido identificar las características y parámetros básicos para la visualización del método Schlieren.
- Se ha calculado el equipo óptico y la estructura para su posicionamiento necesario para la visualización del sistema Schlieren,
- Se ha instalado el equipo de visualización de una cámara de combustión por medio del método Schlieren.
- Se ha puesto a punto la instalación y se han identificado algunos problemas particulares que no se replantearon inicialmente.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se plantean las diferentes posibilidades para dar continuidad a este TFG.

Queda pendiente seguir realizando pruebas de combustiones con combustible diferentes al metano. Superar la limitación de la presión máxima de mezcla de combustible debida a la seguridad del propio proyecto.

Al aumentar la presión máxima los principales riesgos son:

- Las pérdidas por fugas no visibles en las presiones actuales del experimento.
- En el proceso de combustión si entre el cristal y la cámara de combustión no hay suficiente ajuste para evitar fugas de altas presiones, el frente de llama podría llegar a tener contacto con las juntas de viton y desgastarlas provocando el deterioro de la instalación.

En el proceso de combustión se produce agua dentro de la cámara, en este experimento no afecta simbólicamente, pero en el caso de aumentar las presiones máximas esto podría ser un problema.

Otra alternativa es usar un filtro de color junto con la cámara CCD así el color medido en términos de tonalidad se dispersa con la intensidad y las imperfecciones materiales no dan lugar a errores adicionales.

Completar este TFG supondría la posibilidad de ampliar los conocimientos de forma visual y numérica de las diferentes combustiones para diferentes variantes del proyecto.



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



CAPÍTULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



6. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

[L1] Pradipta Kumar Panigrahi (2012). Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer. Springer.

[L2] Pradipta Kumar Panigrahi (2013). Imaging Heat and Mass Transfer Processes: Visualization and Analysis. Springer.

[L3] Eugene Hecht (2007). Óptica. Pearson.

[L4] F. Payri y J.M. Desantes (2011). Motores de Combustión Interna Alternativos. Reverté.

MANUALES

[M1] Jose Rafael Lajara Vizcaíno. Jose Peregrí Sebastián (2007). Lab View: Entorno Gráfico de programación. Alfaomega.

INFORMES

[I1] John Stuart Goulding (2006). A Study of Large-Scale Focusing Schlieren Systems

PROYECTOS DE FIN DE GRADO O CARRERA

[P1] González Sastoque Andrés Enrique. Hastamorir González Ghylver Alexander (2015). Diseño y Construcción del Sistema de Visualización Schlieren para el túnel aerodinámico de la Institución Universitaria Los Libertadores.

[P2] Álvaro Lafuente Lafuente (2003). Metodología para el diagnóstico de la velocidad de combustión laminar de mezclas de gases combustibles a partir de la medida de presión instantánea en una bomba de combustión a volumen constante.

[P3] Jorge Luis Yoma Vásquez (2007). Visualización de flujos no isotérmicos con un dispositivo óptico Schlieren.



APUNTES

[A1] Dirk Möller. Prof. Jürg Dual. (2012). An Overview on Schlieren Optics and its Applications.

[A2] Amrita Mazumdar (2013). Principles and Techniques of Schlieren Imaging Systems.



CAPÍTULO 7: ANEXOS



Universidad de Valladolid

**INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE COMBUSTIÓN PREMEZCLADA
MEDIANTE TÉCNICAS SCHLIEREN**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

7. ANEXOS

7.1. INVENTARIO

7.1.1. INVENTARIO DE PIEZAS DE TORNILLERÍA

DENOMINACION	UNIDADES
Conexión de soporte de brida 40 mm	12
Conexión de soporte de brida 80 mm	4
Pie de nivelación	8
Tornillo cabeza T	47
Casquillo	20

Tabla 7.1 Inventario piezas de tornillería



Figura 7.1 Conexión de soporte de brida 40mm



Figura 7.2 Conexión de soporte de brida 80mm



Figura 7.3 Pie de nivelación



Figura 7.4 Tornillo cabeza T



Figura 7.5 Casquillo



7.1.2. INVENTARIO DE SECCIONES

Tipo de sección	Longitud	Unidades
Secciones de 80x40	130mm	1
	38mm	1
	34mm	1
	28mm	1
	66mm	4
Secciones de 40x40	66mm	1
	20mm	1
	36mm	1
	30mm	1

Tabla 7.2 Inventario secciones