

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA SCHLIEREN PARA LA
VISUALIZACIÓN DE GASES**

JULIO DE 2018

D. Barbón García, Víctor

Tutor: D. Briz del Blanco, Fernando

AGRADECIMIENTOS:

Agradecer la colaboración del Centro de Investigación y Desarrollo de ArcelorMittal (Avilés), tanto por aportar los medios como la experiencia necesaria para abordar y desarrollar dicho proyecto.



RESUMEN:

En este proyecto se abordará la técnica Schlieren, la cual consiste en un sistema óptico para la visualización de gradientes de densidad de un medio a partir de la refracción de la luz producida por una fuente puntual de luz. Con el estudio de esta técnica se pretende diseñar una herramienta capaz de visualizar la fluidodinámica de los flujos producidos en muchos procesos industriales, para poder tener una primera referencia cualitativa del desarrollo del mismo flujo, y así poder disminuir el número de simulaciones computacionales, lo que conlleva a un gran ahorro económico y temporal.

Dicha técnica no pretende desbancar a las simulaciones CFD, sino más bien ser un primer paso para obtener una idea inicial del desarrollo del flujo y acelerar el proceso de búsqueda y testeado de diferentes configuraciones en distintos procesos industriales, para, finalmente, hallada una configuración a priori óptima contrastar dicha visualización con una simulación por computador.

Este proyecto se centrará en el diseño y testeado de un Sistema Schlieren en la planta piloto de galvanizado del Centro de I+D de ArcelorMittal, en la cual se pretende visualizar el flujo de los colectores de soplado, también llamados cuchillas, sobre una banda metálica que discurre entre ambas cuchillas en un circuito cerrado de rodillos.

Finalmente, una vez testeada la técnica, tanto sus capacidades como sus limitaciones, se propondrán distintos procesos industriales o proyectos en los cuales se pueda incorporar.

PALABRAS CLAVE:

Schlieren, Flujo, Gradientes de densidad, Refracción, Colectores de soplado.

Índice General:

1. Objetivos y Alcance:	1
1.1 Introducción:	1
1.2 Objetivos Generales:	1
1.3 Objetivos Específicos:	1
2. Estado de la Técnica:	2
2.1 Antecedentes Históricos:	3
2.2 Antecedentes Físicos:	5
2.2.1 Óptica Geométrica:	5
2.2.2 Reflexión:	6
2.2.3 Refracción:	7
2.2.4 Difracción:	8
2.2.5 Lentes:	9
2.2.6 Espejos:	10
2.2.7 Aberraciones Ópticas:	11
2.3 Definición del Sistema Schlieren:	12
2.3.1 Propagación de la luz en un medio no homogéneo:	13
2.3.2 Diferencia entre los Métodos Schlieren y Shadowgraph:	17
2.4 Elementos de los Sistemas Schlieren:	18
2.5 Montajes Schlieren con Lentes y Espejos:	18
2.5.1 Montajes con Lentes:	19
2.5.2 Montajes con Espejos:	20
2.6 Montajes Schlieren Especiales:	22
3. Diseño Conceptual:	23
3.1 Objetivos y Requisitos del Sistema:	23
3.2 Colectores de Soplado:	24
3.3 Montajes Schlieren:	25
3.3.1 Montajes con lentes o espejos:	25
3.3.2 Montaje Tipo Z:	26
3.3.3 Montaje con un único espejo y alineación coincidente en el eje:	26
3.3.4 Selección del Montaje Schlieren óptimo:	28
4. Diseño Detallado:	29
4.1 Montaje Schlieren Tipo Z:	29
4.1.1 Distribución:	29

4.1.2 Elementos:.....	32
4.2 Estructura Base y Pórtico:.....	36
5. Calibración y Puesta a Punto:.....	40
6. Primeras conclusiones y mejoras:.....	42
6.1 Conclusiones:.....	42
6.2 Mejoras:	44
7. Soplane y Línea de Alimentación:	45
7.1 Soplane:	45
7.2 Línea de Alimentación:.....	47
7.3 Sistema Calefactor:	49
8. Análisis del soplado de las Cuchillas:	52
8.1 Montaje y procedimiento:	53
8.2 Procesamiento de los datos:	55
8.2.1 Cargar_datos.m:	56
8.2.2 Filtrado_Analisis_Fisico.m:	57
8.2.3 Plotear_Ensayos.m:	58
8.2.4 Analisis_Temporal.m:	59
8.2.5 Muestra de Resultados:	60
9. Incorporación de la planta Piloto de Galvanizado:.....	63
9.1 Montaje del Sistema Schlieren con la Planta Piloto:	63
9.2 Procedimiento de los ensayos:	66
9.3 Resultados de los ensayos:.....	67
10. Conclusiones Generales:	68
10.1 Resultados:.....	68
10.2 Futuras Líneas de Investigación:	68
11. Presupuesto:.....	69
12. Bibliografía:.....	73
13. Anexos:.....	74
13.1 Programación tratamiento de datos de la manta de presiones:	74

Índice de Figuras:

Figura 1: Configuración óptica de Hooke.	3
Figura 2: Ejemplo de defecto sobre la superficie de un espejo.	3
Figura 3: Diseño Schlieren original de Toepler.	4
Figura 4: Conceptos de Óptica Geométrica	5
Figura 5: Reflexión especular y difusa.	6
Figura 6: Reflexión de la luz.	6
Figura 7: Refracción de la luz.	7
Figura 8: Difracción de una onda tras pasar por una abertura reducidas dimensiones.	8
Figura 9: Patrones de la difracción de un haz de luz al pasar distintas aberturas.	8
Figura 10: Tipos de lentes.	9
Figura 11: Convergencia y Divergencia de los rayos tras el paso la lente.	9
Figura 12: Reflexión de los rayos al incidir sobre un espejo plano y un espejo parabólico.	10
Figura 13: Aberración de Coma y aberración de Astigmatismo.	11
Figura 14: Visualización de la llama y gases de un encendedor con la técnica Schlieren.	12
Figura 15: Diagrama de la refracción de la luz producido por un índice de refracción dn/dy	14
Figura 16: Configuración óptica con lentes.	15
Figura 17: Variación de las imágenes con el posicionamiento de la cuchilla.	16
Figura 18: Configuración óptica con lentes y fuente de luz no puntual.	16
Figura 19: Diagrama del método Shadowgraph directo.	17
Figura 20: Coste vs Diámetro de Lentes acromáticas (triángulos) y Espejos parabólicos(cuadrados).	18
Figura 21: Montaje Schlieren con dos lentes.	19
Figura 22: Montaje tipo Z.	20
Figura 23: Montaje con un único espejo esférico y alineación coincidente en el eje.	21
Figura 24: Montaje con un único espejo parabólico y coincidente en el eje.	21
Figura 25: Imagen Schlieren de una vela encendida con cuchilla y con un filtro de color.	22
Figura 26: Configuración y ejemplo de imagen BOS.	22
Figura 27: Colectores de soplado de la Planta Piloto de Galvanizado.	24
Figura 28: Configuración tipo Z.	26
Figura 29: Configuración con un único espejo y alineación en el eje.	27
Figura 30: Configuración con un único espejo y alineación fuera del eje.	27
Figura 31: Vista en planta de la distribución del montaje tipo Z.	29
Figura 32: Espejo parabólico empleado.	31
Figura 33: Vista en Planta de la distribución del montaje Tipo Z diseñado.	31
Figura 34: Soporte o Montura de gran Apertura para los espejos.	32
Figura 35: Fuentes de luz y Diafragma.	32
Figura 36: Montaje de la Cuchilla y del filtro gradual.	33
Figura 37: Soporte con agarre variable y Base de traslación.	33
Figura 38: Cámara de captación y Objetivo.	34
Figura 39: Soporte y Postes de Montaje.	35
Figura 40: Carril óptico y Base deslizante.	35
Figura 41: Perfil, rótula y escuadra empleados en el montaje.	36
Figura 42: Diseño de la Estructura Base.	36
Figura 43: Diseño e incorporación del pórtico y la sujeción de los colectores a la Estructura base.	37
Figura 44: Montaje de la Estructura Base.	37
Figura 45: Estructura Base y Pórtico.	38

Figura 46: Vista Completa del Sistema Schlieren.....	38
Figura 47: Colectores de Soplado y vista detalle de la placa y el baffle.	38
Figura 48: Vista desde la Línea de Alimentación de aire del Sistema.	39
Figura 49: Vista detalle de la Fuente de Luz y del Sistema de Captación de imágenes.....	39
Figura 50: Vista del Sistema desde la posición de los espejos.....	39
Figura 51: Calibración del posicionamiento de la cuchilla.	41
Figura 52: Calibración del alineamiento de los espejos.	41
Figura 53: Imagen de los colectores e Imagen Schlieren del flujo del aire.....	42
Figura 54: Imágenes Schlieren de los colectores sin y con flujo de aire.....	43
Figura 55: Filtros graduales diseñados.....	43
Figura 56: Imágenes Schlieren captadas implementando los filtros graduales.	43
Figura 57: Imágenes Schlieren de flujo de aire a temperatura ambiente y calentado.	44
Figura 58: Imagen del Soplante.	45
Figura 59: Curvas características del Soplante.....	45
Figura 60: Tramos de la Línea de Alimentación.....	47
Figura 61: Sensor de Presión Manométrica.	48
Figura 62: Medidor de caudal másico.	48
Figura 63: Resistencia eléctrica conformada circular.	49
Figura 64: Incorporación de las resistencias a las cuchillas.	51
Figura 65: Manta de presiones de Xsensor Technology.	52
Figura 66: Cuchilla y manta de presiones para la verificación del soplado.	53
Figura 67: Huella total obtenida mediante el software de la manta.	54
Figura 68: Análisis manual por secciones de la huella.	54
Figura 69: Diagrama General del programa de tratamiento de datos.....	55
Figura 70: Diagrama del script Cargar_datos.m.	56
Figura 71: Diagrama del script Filtrado_Analisis_Fisico.m.	57
Figura 72: Diagrama del script Plotear_Ensayos.m.	58
Figura 73: Diagrama del script Analisis_Temporal.m.	59
Figura 74: Gráfica del área de la huella producida por cada cuchilla.	60
Figura 75: Gráfica de la presión de la huella producida por cada cuchilla.	60
Figura 76: Gráfica de la fuerza de la huella producida por cada cuchilla.	61
Figura 77: Media y Desviación típica, ensayo con la Cuchilla A.	61
Figura 78: Media y Desviación típica, ensayo con la Cuchilla B.	62
Figura 79: Diferencia entre las Medias de los ensayos de las Cuchillas.	62
Figura 80: Vistas de la Planta Piloto de Galvanizado con el Sistema Schlieren.	63
Figura 81: Detalle de las Cuchillas en el Sistema.	64
Figura 82: Rodillos guía y rodillo tensor para la banda.	64
Figura 83: Relación de la velocidad de la banda con la frecuencia del motor.	65
Figura 84: Laser de la compañía Proton InteliSENS SLR.	65
Figura 85: Imágenes Schlieren del desarrollo del soplado de las cuchillas	67
Figura 86: Desempeño porcentual de cada Módulo sobre el Coste Total del Sistema.	72

Índice de Tablas:

Tabla 1: Constantes de Gladstone-Dale para el aire en condiciones normales.	13
Tabla 2: Matriz de Requisitos del Sistema.	23
Tabla 3: Dimensiones generales del Colector de Soplado.	24
Tabla 4: Ventajas y Desventajas de los Montajes con Lentes.	25
Tabla 5: Ventajas y Desventajas de los Montajes con Espejos.	25
Tabla 6: Ventajas y Desventajas del Montaje Tipo Z.	26
Tabla 7: Ventajas y Desventajas del Montaje con un único espejo y coincidente en el eje.	27
Tabla 8: Ventajas y Desventajas del Montaje con un único espejo y alineación fuera del eje.	27
Tabla 9: Ponderación de los Requisitos del Montaje Schlieren.	28
Tabla 10: Dimensiones del Soplante.	46
Tabla 11: Datos de servicio de funcionamiento.	46
Tabla 12: Atributos del sensor de presión.	48
Tabla 13: Atributos del medidor de caudal.	49
Tabla 14: Cálculo del caudal calentado según la potencia calorífica.	50
Tabla 15: Atributos de las resistencias eléctricas.	51
Tabla 16: Características de la manta de presiones.	52
Tabla 17: Parámetros de los ensayos.	66
Tabla 18: Presupuesto de la Estructura Base y del Pórtico.	69
Tabla 19: Presupuesto de los Elementos Ópticos.	70
Tabla 20: Presupuesto de las Placas de Sujeción.	71
Tabla 21: Presupuesto de las resistencias eléctricas.	71
Tabla 22: Presupuesto Total del Sistema.	72

1. OBJETIVOS Y ALCANCE:

1.1 Introducción:

El objetivo que persigue el presente proyecto es el diseño y montaje de un Sistema Schlieren para la visualización de gases, con el fin de emplear dicho Sistema como herramienta para llevar a cabo distintos tipos de pruebas, y a su vez, la búsqueda de posibles futuras aplicaciones industriales.

La técnica Schlieren es una técnica óptica de visualización de un flujo ante cambios de densidad, de los cuales se obtiene información de las variables de dicho flujo, como pueden ser las diferentes densidades a lo largo de una sección seleccionada.

En este estudio se abordará el estado de la técnica de los Sistemas Schlieren, conceptos teóricos, elementos, tipos de montajes...; una vez analizado todas las alternativas se llevará a cabo el diseño de un montaje Schlieren; posteriormente se diseñará una estructura base para el Sistema, la cual debe ser ajustable para adaptarse a los diferentes experimentos que se vayan hacer en futuras pruebas; una vez montado todo el Sistema se procederá a la calibración y la experimentación con el Sistema Schlieren, y finalmente, una vez se conozcan los puntos críticos de la técnica, se llevarán a cabo diferentes tipos de pruebas con los colectores de soplado de la Planta Piloto de Cuchillas de Galvanizado.

1.2 Objetivos Generales:

- Estudio de la técnica Schlieren y de sus diferentes variantes, diseño y montaje de dicho Sistema para la realización de experimentos y pruebas con distintas Plantas Piloto.

1.3 Objetivos Específicos:

- Estudio del estado de la técnica de los Sistemas Schlieren.
- Diseño y montaje de un Sistema Schlieren.
- Diseño y montaje de una estructura base ajustable para los experimentos.
- Calibración y puesta a punto del Sistema y experimentación con la técnica Schlieren.
- Realización de pruebas con los colectores de soplado de la Planta Piloto de Galvanizado.
- Análisis de los Resultados.
- Mejoras y conclusiones.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA:

En este capítulo se expondrá un resumen de la etapa de documentación del proyecto, en el cual se recoge los conocimientos necesarios para el futuro diseño y modelaje del Sistema Schlieren, a la vez de para su óptima comprensión.

Dicho apartado se dividirá en los siguientes puntos:

1. Antecedentes Históricos:

2. Antecedentes Físicos:
 - Óptica Geométrica.
 - Reflexión.
 - Refracción.
 - Difracción.
 - Lentes.
 - Espejos.
 - Aberraciones ópticas.

3. Definición del Sistema Schlieren:
 - Propagación de la luz en un medio no homogéneo.
 - Diferencia entre los métodos Schlieren y Shadowgraph.

4. Elementos de los Sistemas Schlieren:

5. Montajes Schlieren con Lentes y Espejos:
 - Montajes con Lentes.
 - Montajes con Espejos.

6. Montajes Schlieren especiales:

2.1 Antecedentes Históricos:

El término Schlieren proviene de la palabra alemana “schliere” que significa no homogéneo, que en este caso son partículas de polvo en un líquido transparente, o cambios de densidad en algún flujo de fluido transparente. 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 mostrado en la Figura 1, el cual está formado por una vela que funciona como fuente de luz, una segunda vela para producir las diferentes densidades del aire circundante debido al flujo de calor proveniente de la llama, una lente convergente o convexa y el uso del iris del propio sujeto como filtro. Desafortunadamente, su método no era lo suficientemente preciso para obtener resultados óptimos.

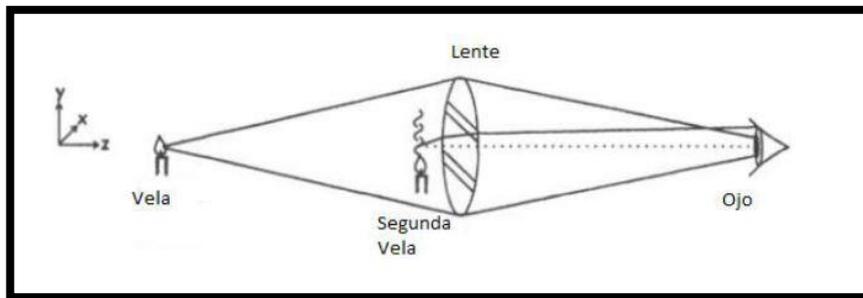


Figura 1: Configuración óptica de Hooke.

Una década después del trabajo de Hooke, el astrónomo holandés Christiaan Huygens (1629-1695) diseñó un sistema Schlieren para la detección de irregularidades en las lentes, el cual consistía en una fuente de luz distante que se enfoca en la lente a estudiar dando como resultado una imagen de luminosidad variable, la cual indica las irregularidades originadas en la lente, como se puede apreciar en las Figuras 2.a y 2.b, en la primera el espejo tiene una superficie sin defectos lo que produce una luminosidad constante en la imagen, mientras que en la Figura 2.b se produce un patrón esférico debido a un defecto en la superficie central del espejo.

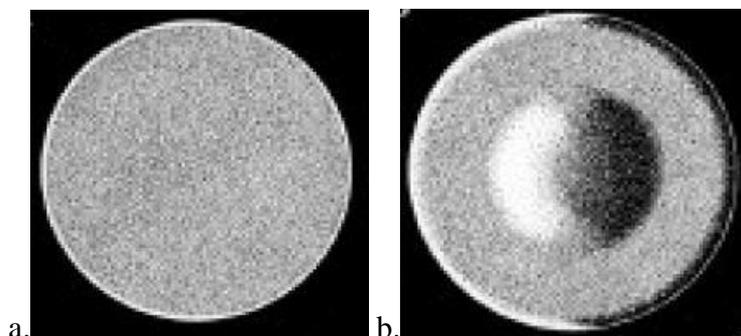


Figura 2: Ejemplo de defecto sobre la superficie de un espejo.

A mediados del siglo XIX, el físico francés Jean Bernard León Foucault (1819-1868) mejoró la prueba proporcionando un método excepcionalmente preciso para bloquear porcentualmente el haz de luz mediante un filo de cuchilla situada en el punto focal de la lente o del espejo. 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) diseñó el primer sistema Schlieren avanzado para la visualización de flujos, desarrollado a partir de la configuración de la cuchilla de Foucault, dicho sistema significó una mejora en la calidad, contraste y en la sensibilidad de las imágenes Schlieren comparadas con las imágenes obtenidas con las disposiciones anteriores. Como se puede observar en la Figura 3, dicho sistema era el primer montaje ajustable, portátil y de “fácil” calibración diseñado, el cual consta de una cuchilla como filtro, un sistema de dos lentes para crear el área de test para las pruebas, una linterna como fuente de luz y un telescopio para ver directamente las imágenes.

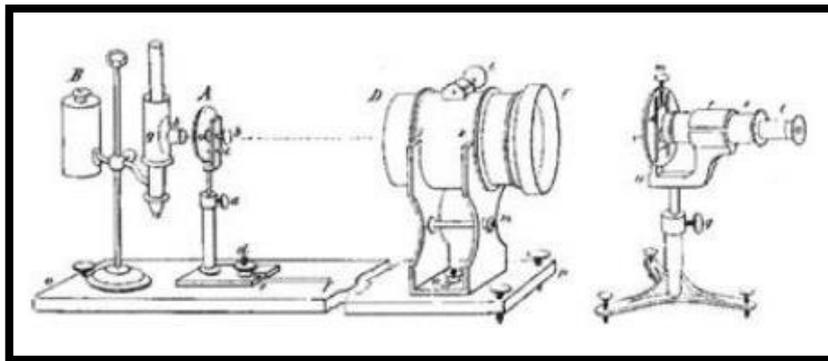


Figura 3: Diseño Schlieren original de Toepler.

A finales del siglo XIX, la técnica Schlieren vio una propagación rápida en el campo de la aerodinámica, debido a su utilidad como instrumento para la visualización de fluidos, un ejemplo son los estudios y experimentos realizados en la investigación de la dinámica de fluidos de Ernst Mach (1838-1916) y Ludwig Prandtl (1874-1953).

En la primera mitad del siglo XX, Schlieren se convirtió finalmente en una herramienta crucial en el campo de la aerodinámica, donde Alemania, con investigadores como Hubert Schardin (1902-1965) realizaron significantes descubrimientos en balística, ondas de choque y en las técnicas de medición de alta velocidad.

No cambiando su esencia durante todo el siglo XX hasta la actualidad, la importancia de la técnica Schlieren se está viendo superada lentamente por las recientes simulaciones por ordenador.

- Referencias: [1], [7], [11], [13].

2.2 Antecedentes Físicos:

En este apartado se explicará conceptos físicos básicos para la óptima comprensión de la técnica Schlieren y de su funcionamiento.

2.2.1 Óptica Geométrica:

La longitud de onda de la luz suele ser muy pequeña en comparación con el tamaño de los obstáculos o aberturas que se encuentra a su paso, esto permite, en general, obviar los efectos de interferencia y difracción asociados al carácter ondulatorio de la luz. Sobre dicha hipótesis se asume la propagación rectilínea de los rayos de luz, dando lugar a la disciplina conocida como Óptica Geométrica, la cual se encarga, principalmente, del estudio de la formación de imágenes por espejos y lentes, base de la construcción de instrumentos ópticos.

Los axiomas sobre los que se construye la óptica geométrica son (Figura 4):

- Las trayectorias de los rayos de luz en los medios homogéneos e isotrópicos son rectilíneas.
- El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.
- Se cumple la ley de la reflexión y de la refracción.
- Las trayectorias de la luz a través de distintos medios son reversibles.
- No existe interacción entre los diferentes rayos.

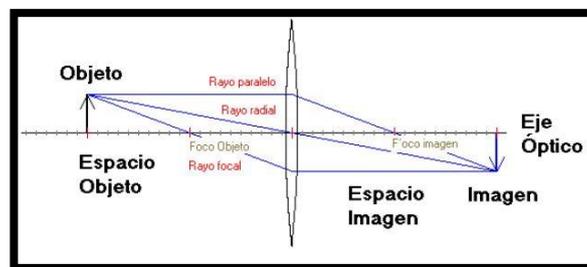


Figura 4: Conceptos de Óptica Geométrica

- Eje Óptico: eje de abscisas perpendicular al plano refractor.
- Espacio Objeto: espacio entre el Objeto y la lente.
- Espacio Imagen: espacio entre la lente y la Imagen.
- Imagen Real: imagen formada por dos rayos refractados convergentes.
- Imagen Virtual: imagen formada por dos rayos refractados divergentes.
- Foco Objeto: punto del eje óptico cuya imagen se encuentra en el infinito del espacio imagen.
- Foco Imagen: punto del eje óptico cuya imagen se encuentra en el infinito del espacio objeto.

2.2.2 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:

- Reflexión especular: se forma cuando los rayos de luz inciden sobre una superficie uniforme, en dicho caso todos los rayos son reflejados con el mismo ángulo y dirección.
- Reflexión difusa: se forma cuando los rayos de luz inciden sobre una superficie rugosa, lo que provoca que los rayos se dispersen en direcciones y ángulos distintos, imposibilitando la formación de una imagen nítida.

En la Figura 5 se muestran dichas formas de reflexión.

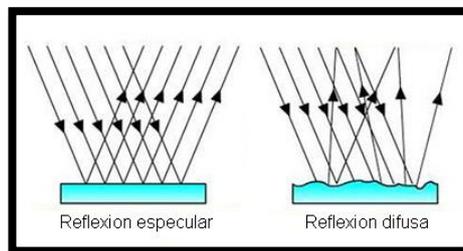


Figura 5: Reflexión especular y difusa.

Cabe destacar que la reflexión se rige por dos leyes (Figura 6):

- 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 ende son complementarios.

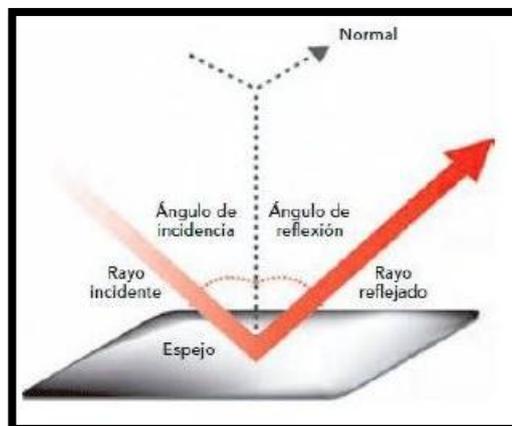


Figura 6: Reflexión de la luz.

2.2.3 Refracción:

Cuando un rayo de luz que se propaga a través de un medio transparente incide oblicuamente sobre un segundo medio parte del rayo es reflejado, pero otra parte es transmitida a través del segundo medio, lo cual implica que los haces reflejados y refractados tengan menos intensidad lumínica que el rayo incidente. Dicho reparto de intensidad se produce en una proporción que depende de las características de los medios en contacto, y del ángulo de incidencia respecto de la superficie límite.

El rayo que entra en el segundo medio experimenta un cambio de dirección debido a la variación de la velocidad que se produce ante el cambio de medio, este efecto se denomina refracción.

Para la obtención del ángulo del rayo refractado se utiliza la ley de Snell (Ecuación 1 y Fig. 7):

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde n es el índice de refracción del medio correspondiente, el cual se define como la relación de la velocidad de la luz en el vacío (c_0) y la velocidad de la luz en el medio de estudio (c) (Ecuación 2).

$$n = \frac{c_0}{c} \quad \text{Ecuación (2)}$$

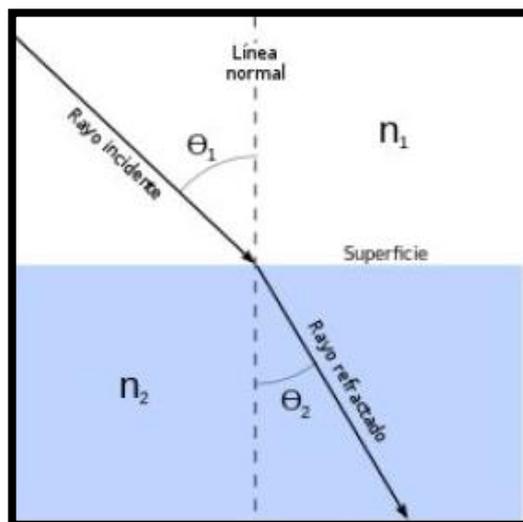


Figura 7: Refracción de la luz.

2.2.4 Difracción:

La difracción es el fenómeno basado en la desviación de las ondas al encontrar un obstáculo, pasar a través de un cuerpo opaco o por una abertura inferior o igual a su longitud de onda, por lo tanto, la difracción hace que la luz no se concentre en un punto preciso, sino que se va a dispersar (Figura 8) formando patrones que dependerán de la forma y tamaño de la apertura (Figura 9).

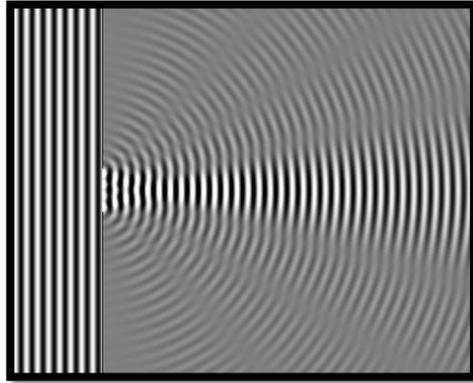


Figura 8: Difracción de una onda tras pasar por una abertura reducidas dimensiones.

- Figura 9.a: Difracción en la luz provocado por una abertura circular, conocido como Disco de Airy, el cual marca la resolución máxima que puede producir un sistema óptico.
- Figura 9.b: Láser difractado por una abertura cuadrada.
- Figura 9.c: Láser difractado por una abertura hexagonal.

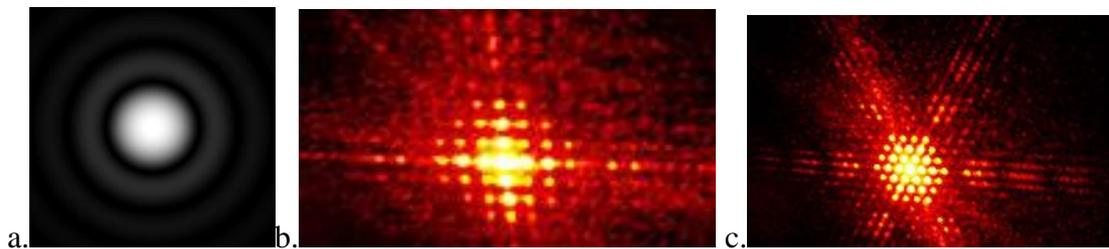


Figura 9: Patrones de la difracción de un haz de luz al pasar distintas aberturas.

Se debe tener especial cuidado con la difracción en la captación de imágenes, ya que, por ejemplo, al reducir en gran cantidad la abertura del diafragma limitamos la cantidad de luz sin distorsionar que pasa al sensor de la cámara, por lo que la luz que llega al sensor es luz distorsionada por los bordes del propio diafragma, produciendo una pérdida de nitidez en las imágenes.

2.2.5 Lentes:

Se define como lente a una pieza óptica fabricada de vidrio, cristal o plástico que por medio de la luz permite la formación de una imagen. Estas están divididas en dos categorías (Figura 10):

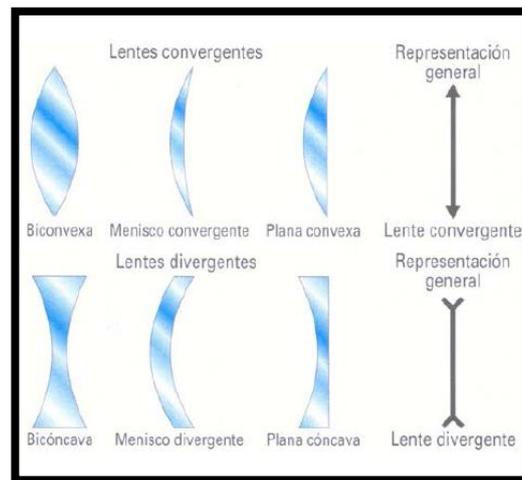


Figura 10: Tipos de lentes.

- Lentes convergentes: son aquellas cuyo espesor va disminuyendo del centro hacia los bordes, en este tipo de lentes todos los rayos que incidan paralelamente al eje óptico se juntarán en el foco formando una imagen real del objeto (Figura 11).
- Lentes divergentes: son las lentes cuyo espesor va disminuyendo de los bordes hasta el centro, en ellas todos los rayos paralelos al eje óptico divergen siendo sus prolongaciones las que se unen en el foco negativo, formando una imagen virtual (Figura 11).

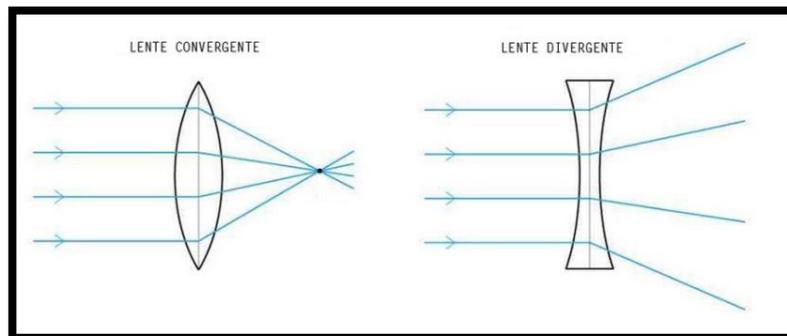


Figura 11: Convergencia y Divergencia de los rayos tras el paso la lente.

2.2.6 Espejos:

- **Espejos Planos:**

La formación de imágenes es debido a la reflexión de los rayos de luz sobre la superficie del espejo, lo que provoca la impresión de que la imagen proviniese desde detrás del espejo, cuando en realidad esta proviene del objeto y que debido a la superficie lisa y uniforme se genera una reflexión especular que direcciona todos los rayos en una sola dirección.

La imagen formada en el espejo plano consta de las siguientes características (Figura 12.a):

- La imagen obtenida es virtual y es simétrica del objeto con respecto al espejo.
- La imagen está derecha, es decir, está en el mismo sentido que el objeto, aunque presenta una inversión lateral.
- El tamaño del objeto y su imagen son iguales.

- **Espejos Parabólicos:**

Los espejos parabólicos se comportan como una lente cóncava, pero en este caso el haz de luz no atraviesa el cuerpo óptico, sino que se refleja en el cuerpo. Dichos espejos tienen la característica que todos los rayos que lleguen paralelos al eje óptico se reflejan y se unen en el foco, de la misma manera, todos los rayos provenientes del foco se reflejan en el espejo saliendo paralelos al eje, a estos rayos se los conoce como colimados (Figura 12.b).

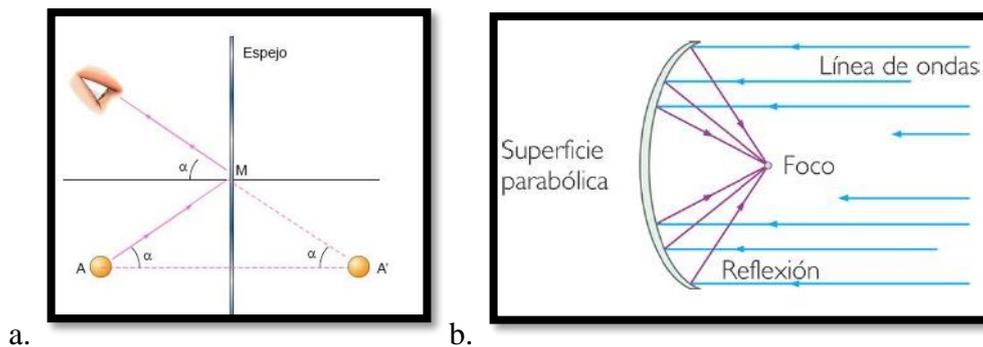


Figura 12: Reflexión de los rayos al incidir sobre un espejo plano y un espejo parabólico.

2.2.7 Aberraciones Ópticas:

En un sistema óptico ideal, todos los rayos de luz desde un punto en el plano objeto convergerían en el mismo punto en el plano imagen, formando una imagen nítida. Las influencias que causan que los rayos converjan en diferentes puntos se denominan aberraciones.

Las principales aberraciones que influyen en los sistemas Schlieren son:

- **Coma:**

Dicha aberración es producida por los rayos oblicuos (no paralelos al eje óptico) que no intersecan con el eje oblicuo en el mismo punto de la imagen, este efecto produce una imagen con forma de cometa en lugar de un punto circular (Figura 13.a). Su pronunciación aumenta en los puntos más alejados al eje óptico.

- **Astigmatismo:**

Esta aberración también es debida a los rayos oblicuos (Figura 13.b), en este caso, los rayos que llegan oblicuos en un plano vertical (tangencial) forman foco en el plano focal sagital (en rojo) mientras que los rayos oblicuos que a un plano horizontal (sagital) enfocan en el plano focal tangencial (en amarillo). Esto da lugar a que se formen dos líneas focales, con un círculo de mínima confusión (en negro) entre ambas.

Ambos defectos suelen estar causados por inclinación y/o descentramiento entre los elementos ópticos del sistema, aunque también pueden estar debidos a que en los espejos algún radio de curvatura en el eje horizontal sea distinto al vertical.

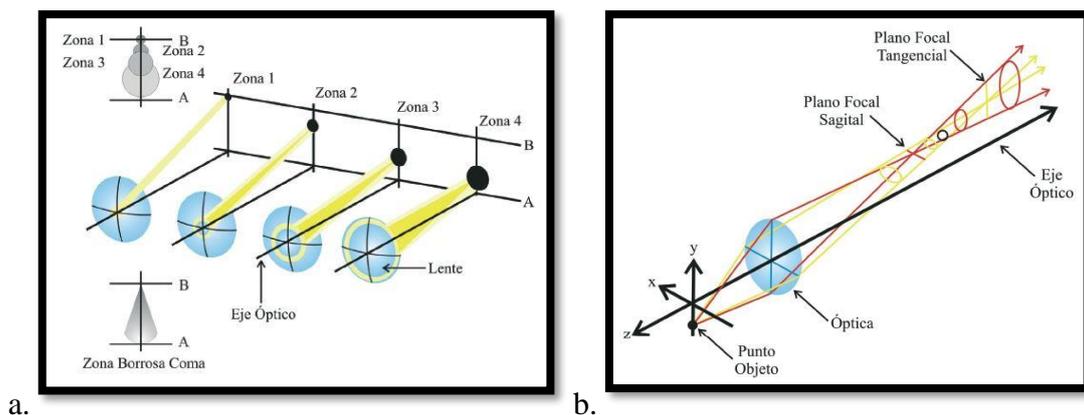


Figura 13: Aberración de Coma y aberración de Astigmatismo.

- Referencias: [3], [4], [5], [6].

2.3 Definición del Sistema Schlieren:

En los posteriores capítulos se explicará los fundamentos, elementos y tipos de montajes de la técnica Schlieren.

El sistema óptico o fotografía Schlieren es una técnica óptica en la que se observa la variación del gradiente de densidad de un medio transparente y no homogéneo. Dicha técnica 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 de temperatura, la exposición a flujos a altas velocidades y/o a la presencia de partículas o elementos que no pertenecen al material a estudiar.

Esta técnica es muy sensible a las desviaciones del haz de luz incidente, por lo que permite la visualización de los cambios de densidad o índice de refracción, como se puede observar en la Figura 14, en la que se muestra una imagen Schlieren de la llama y gases de un mechero.

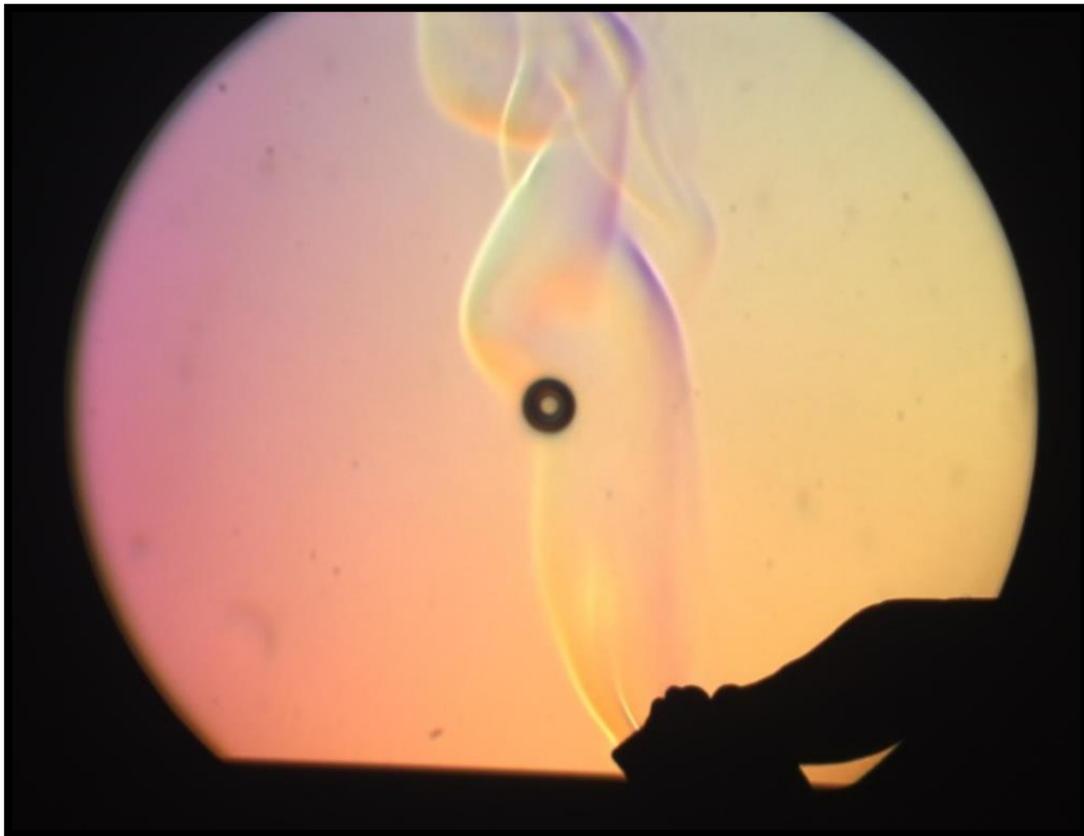


Figura 14: Visualización de la llama y gases de un encendedor con la técnica Schlieren.

2.3.1 Propagación de la luz en un medio no homogéneo:

Como ya se ha mencionado, la técnica Schlieren se emplea para determinar los gradientes de densidad de flujos en fluidos empleando la refracción que sufre la luz al cruzar por dichos gradientes, por lo que resulta necesario generar una relación entre el índice de refracción del medio con la densidad del mismo, Ecuación (3):

$$n - 1 = k \cdot \rho \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde n y ρ son el índice de refracción y la densidad del medio respectivamente, y k es la Constante de Gladstone-Dale que es una función del gas en particular y de la longitud de onda de la luz utilizada en el sistema óptico.

En la Tabla 1 se recogen varios valores de k para el aire a determinadas longitudes de onda de la luz. Como regla general, se asumirá una $k = 0,23 \text{ cm}^3/\text{g}$ para el aire en condiciones normales e iluminación visible.

$k [\text{cm}^3/\text{g}]$	Longitud de onda [μm]
0,2239	0,9125
0,2250	0,7034
0,2259	0,6074
0,2274	0,5097
0,2304	0,4079
0,2330	0,3562

Tabla 1: Constantes de Gladstone-Dale para el aire en condiciones normales.

La refractividad ($n - 1$) de un gas depende de la composición del mismo, la temperatura, la densidad y la longitud de onda de la luz de iluminación; en muchos casos estas condiciones no se alejan de las condiciones atmosféricas normales, por lo que es posible aplicar la ecuación de los gases ideales (Ecuación 4), con lo que también se puede relacionar el índice de refracción con la temperatura.

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T \quad \text{Ecuación (4)}$$

A continuación, y con ayuda de la Figura15 se deducirá la deflexión angular de un haz de luz al traspasar un gradiente de densidad:

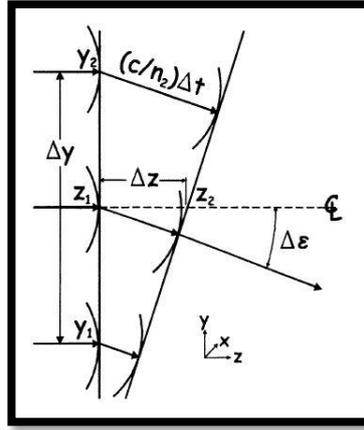


Figura 15: Diagrama de la refracción de la luz producido por un índice de refracción dn/dy .

Partiendo de la Ley de Refracción en dos medios (Ecuación 2) se puede relacionar la velocidad de la onda en cada medio con el ángulo de refracción (Ecuación 5):

$$\Delta \varepsilon = \frac{\left(\frac{c_0}{n_2} - \frac{c_0}{n_1}\right)}{\Delta y} \cdot \Delta t \quad \text{Ecuación (5)}$$

donde el diferencial del tiempo Δt se puede expresar como:

$$\Delta t = \Delta z \cdot \frac{n}{c_0} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene:

$$\Delta \varepsilon = \frac{n}{c_0} \cdot \frac{\left(\frac{c_0}{n_2} - \frac{c_0}{n_1}\right)}{\Delta y} \cdot \Delta z \quad \text{Ecuación (7)}$$

y simplificando términos:

$$\Delta \varepsilon = \frac{n}{n_1 \cdot n_2} \cdot \frac{(n_1 - n_2)}{\Delta y} \cdot \Delta z \quad \text{Ecuación (8)}$$

El término $\frac{n}{n_1 \cdot n_2}$ se puede simplificar a $\frac{1}{n}$ en el límite cuando Δy tiende a 0, resultando la Ecuación 9 (en ambas direcciones):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial y}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Para un ángulo ε muy pequeño se puede aproximar este a $\frac{\partial n}{\partial z}$, por lo que aplicando dicha relación se obtiene la curvatura del haz de luz:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Integrando el componente de la deflexión angular de la luz se obtiene:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} \cdot \partial z, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} \cdot \partial z \quad \text{Ecuación (11)}$$

Finalmente se incluye la longitud del eje óptico L , donde n_0 es el índice de refracción del medio:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Dicha ecuación es la base de la técnica Schlieren ya que relaciona la curvatura del haz de luz ε con el índice de refracción.

Para una mejor comprensión de dicho desarrollo y de la técnica se plantea el sistema de la Figura 16, el cual está formado por una fuente de luz puntual situada en el foco de la Lente biconvexa 1, se sitúa en el foco para colimar la luz, es decir, que los rayos que salgan de la lente sean paralelos al eje óptico; posteriormente se coloca una segunda e idéntica lente biconvexa (Lente 2) para centrar los rayos de luz sobre una cuchilla situada en la distancia focal de la segunda lente. Finalmente, tras la cuchilla se posiciona la pantalla sobre la que se mostrarán las imágenes, o en su defecto, la cámara de captación.

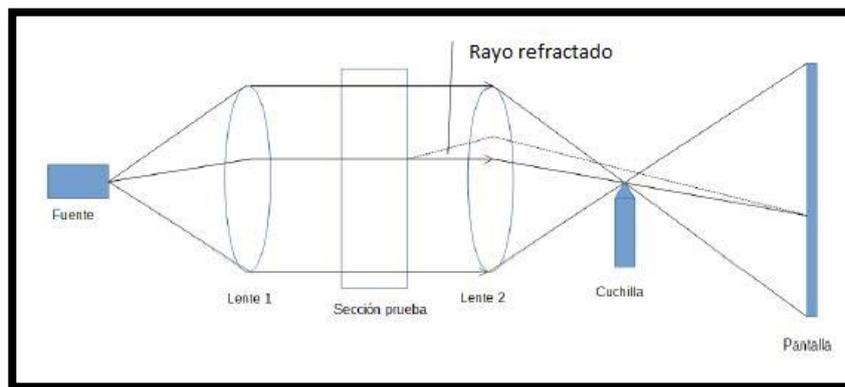


Figura 16: Configuración óptica con lentes.

El objetivo de la cuchilla es el bloqueo parcial de los rayos de luz, con lo que se consigue una mejora del contraste del haz de luz incidente en la cámara, mejorando la percepción de gradientes menores. En la práctica, la cuchilla se posiciona de tal forma que el filo de esta sea perpendicular a la dirección de los gradientes de densidad del flujo, es decir, si los gradientes de densidad son en la dirección vertical el filo tiene que estar en posición horizontal, y si los gradientes son en la dirección horizontal el filo debe estar en posición vertical.

En las Figuras 17.b y .c se muestra las imágenes formadas por el posicionamiento de la cuchilla de forma vertical y horizontal respectivamente, mientras que en la Figura 17.a se muestra una modificación del filtro, sustituyendo el borde de la cuchilla por un orificio, este tipo de filtro puede producir problemas de difracción, de deformación de la imagen y de saturación del sensor de la cámara.

En la práctica, el empleo de una cuchilla como filtro resulta muy efectivo, ya que se controla la sensibilidad de las imágenes al aumentar la cantidad de luz bloqueada.

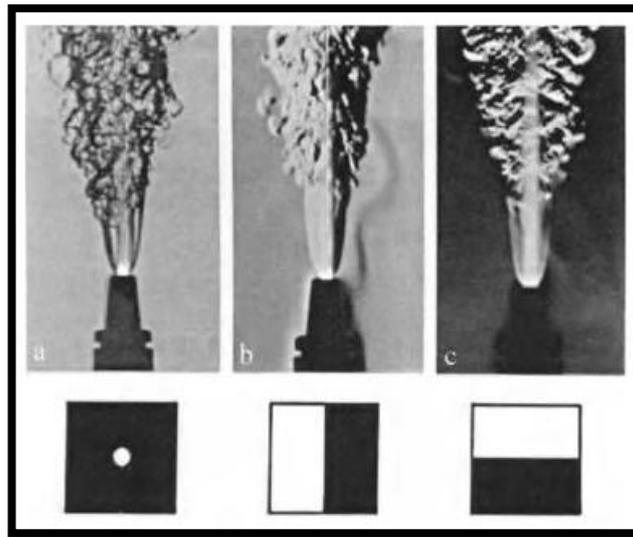


Figura 17: Variación de las imágenes con el posicionamiento de la cuchilla.

Anteriormente se ha mencionado la necesidad de que la fuente de luz sea puntual, o de menor tamaño posible, esto es debido a los problemas de la colimación de los haces de luz reflejados, ya sea en lentes o espejos, ya que como se puede ver en la Figura 18, se forman rayos no paralelos al eje óptico en los extremos de la lente, disminuyendo el área del test para las pruebas, reduciendo la profundidad de campo del sistema y produciendo el aumento del desenfoque según se aleja del eje óptico.

La Lente 3 situada posteriormente de la cuchilla se emplea para corregir dicho desenfoque en los bordes de la imagen, se puede usar una lente biconvexa o la propia lente de enfoque de la cámara.

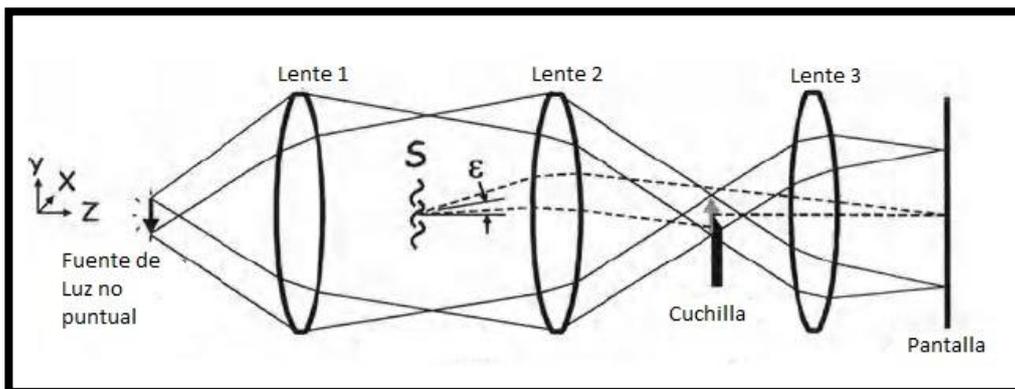


Figura 18: Configuración óptica con lentes y fuente de luz no puntual.

2.3.2 Diferencia entre los Métodos Schlieren y Shadowgraph:

Schlieren y Shadowgraph son métodos de visualización muy parecidos, pero con importantes distinciones:

Primero, el Shadowgraph no es un método que visualice imágenes ópticas enfocadas, sino meramente sombras. La imagen Schlieren, sin embargo, es una imagen óptica formada por lentes o espejos, por lo que tiene una relación óptica directa con la imagen Objeto.

Segundo, los métodos Schlieren requieren de un filtro o cuchilla para la luz refractada, mientras que en Shadowgraph solo se precisa de una pantalla sobre la cual visualizar las sombras.

Finalmente, el nivel de iluminosidad en una imagen Schlieren responde a la primera derivada del índice de refracción, por ejemplo $\frac{\partial n}{\partial x}$, mientras que el Shadowgraph corresponde con la segunda derivada, $\frac{\partial^2 x}{\partial n^2}$. Equivalentemente, la imagen Schlieren visualiza el desplazamiento del ángulo de refracción ϵ , mientras el Shadowgraph visualiza el rayo desplazado resultante de la refracción.

Una ventaja del Shadowgraph es la facilidad para visualizar imágenes, ya que solo precisa de una fuente puntual de luz y una pantalla de proyección (Figura 19), con lo que se puede realizar pruebas de mayor tamaño. En cambio, el método Schlieren consta de una muy superior sensibilidad, por lo que, siendo conscientes de los sistemas ópticos a emplear y su compleja calibración, dicho método destaca sobre el Shadowgraph en cualquier experimento que se precise de cierta precisión o nitidez.

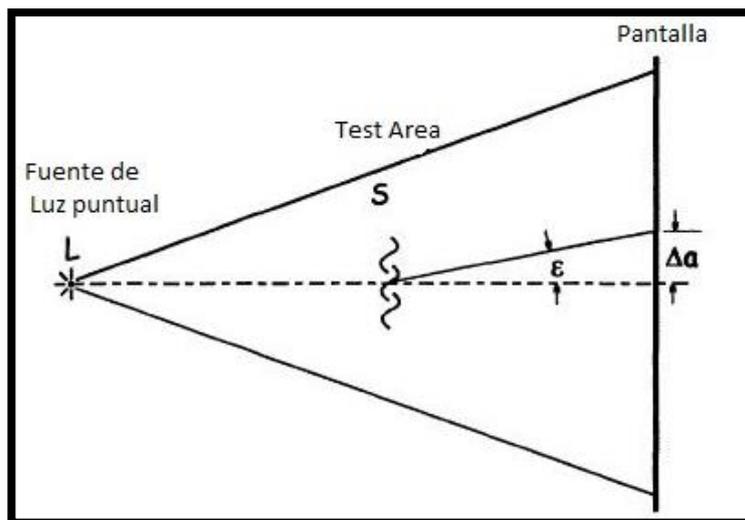


Figura 19: Diagrama del método Shadowgraph directo.

- Referencias: [1], [2], [9], [10].

2.4 Elementos de los Sistemas Schlieren:

En la actualidad no hay una configuración definida de Schlieren, sino más bien diversas modificaciones o adaptaciones del sistema para lograr una óptima visualización de las variaciones del índice de refracción, dependiendo de la aplicaciones o pruebas a estudiar. No obstante, todos los sistemas precisan de la misma base o elementos ópticos para su montaje:

- Fuente de luz.
- Lentes y espejos.
- Colimar la luz.
- Filtro o cuchilla.
- Pantalla de visualización o cámara de captación.

2.5 Montajes Schlieren con Lentes y Espejos:

Aunque originalmente Toepler usara las lentes del objetivo de telescopios refractarios como elementos ópticos para sus montajes, los sistemas basados en espejos fueron progresivamente cogiendo fuerza debido a la incorporación de la cuchilla de Foucault. No obstante, cabe mencionar varias distinciones notorias entre ambos tipos de montajes:

Mientras que los montajes con lentes suelen ser sistemas en serie o en línea, lo que hace un montaje relativamente sencillo, los sistemas con espejos precisan de una distribución no rectilínea, ya que la luz se refleja en ellos y no es refractada como en las lentes; lo que conlleva, inicialmente, un proceso de calibración y alineamiento más dificultoso. En contraparte, las lentes precisan de una alta calidad interna y estrictos rangos de calidad superficial para asegurar un resultado óptimo, mientras que los espejos solo precisan de un buen acabado superficial y una mínima calidad interior.

Estos factores conllevan al uso de espejos en relación tamaño-calidad superficial/coste, siendo normal el uso de estos cuando el diámetro del elemento óptico supera los 10 cm, como se recoge en la Figura 20.

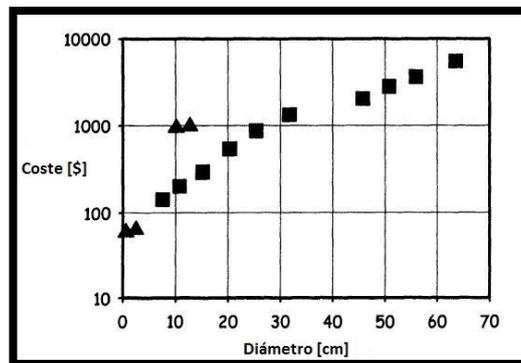


Figura 20: Coste vs Diámetro de Lentes acromáticas (triángulos) y Espejos parabólicos(cuadrados).

2.5.1 Montajes con Lentes:

Una fina lente de gran calidad siempre favorece la imagen Schlieren, ya que las situaciones a estudiar normalmente constan de déviles gradientes de densidad, por lo que las imperfecciones en las lentes pueden fácilmente enmascararlos. Para conseguir una gran sensibilidad se precisa de lentes con una calidad superficial óptima, como por ejemplo $\lambda/2^*$, y con corrección de aberraciones cromática y esférica, para evitar todo tipo de defecto en la imagen.

La composición estandar con el empleo de lentes se muestra en la Figura 21, en la cual podemos ver un sistema en linea formado por:

- Una fuente de luz y una lente condensadora para concentrar el haz de luz sobre una hendidura situada a la distancia focal de dicha lente.
- Una hendidura de reducido tamaño para, por medio de la difracción, hacer de fuente de luz puntual.
- Dos lentes biconvexas y acromáticas para colimar la luz y formar es espacio de las pruebas.
- Una cuchilla situada en la distancia focal de la Lente 2 para mejorar la sensibilidad de las imágenes.
- Una cámara para captar las imágenes.

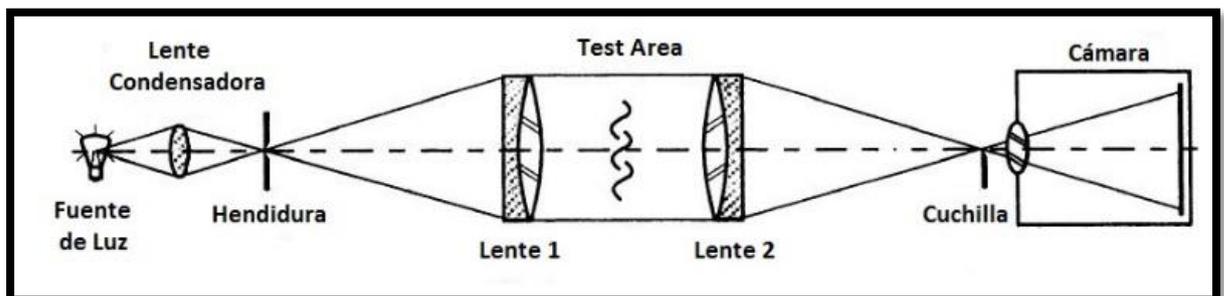


Figura 21: Montaje Schlieren con dos lentes.

*Nota: la desviación en la planitud en superficies de lentes y espejos se mide en valores de onda (λ) que son múltiplos de la longitud de onda de la fuente de luz de prueba. Varios valores de referencia de la planitud superficial son:

- 1λ : nivelación estándar o típica.
- $\lambda/4$: nivelación o grado de precisión.
- $\lambda/20$: nivelación o grado de alta precisión.

2.5.2 Montajes con Espejos:

Como se ha mencionado anteriormente, los sistemas con espejos conllevan un calibrado más dificultoso que los montajes con lentes, debido a que en los espejos la luz se refleja en vez de refractarse, siendo necesario realizar una distribución de los elementos no lineal. No obstante, los espejos, a diferencia de las lentes, tienen las mismas propiedades geométricas para toda la longitud de onda debido a que la luz no sufre un cambio de medio, por lo que no se producen aberraciones cromáticas.

Finalmente, la facilidad de adquirir grandes espejos parabólicos de telescopios de alta calidad ($\lambda/4 \div \lambda/10$ sería suficiente) y coste reducido hace que estos montajes sean preferidos para la mayoría de las aplicaciones y pruebas.

- **Montaje tipo Z:**

Este tipo de montajes emplean dos espejos parabólicos en línea para colimar la luz (procedente de una fuente de luz puntual) y para crear el espacio de prueba del experimento. La fuente de luz, situada en la distancia focal del primer espejo, proyecta la luz sobre toda la superficie del espejo, este la refleja y colima dirección al segundo espejo, el cual a su vez la concentra sobre la cuchilla, situada a la distancia focal del segundo espejo. Finalmente se sitúa la cámara posteriormente de la cuchilla.

Este sistema es actualmente el más empleado debido al gran espacio creado para realizar las pruebas y a los óptimos resultados que se alcanzan. No obstante, requiere de una precisa calibración y su diseño debe minimizar las aberraciones ópticas surgidas (coma y astigmatismo) por el no alineamiento de todos sus elementos.

En capítulos posteriores se desarrollará el diseño y las características de este montaje.

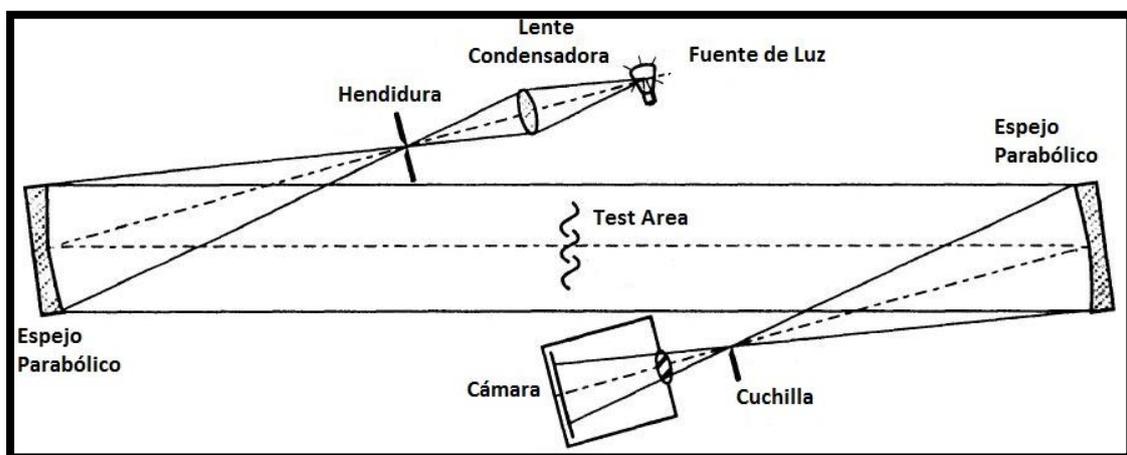


Figura 22: Montaje tipo Z.

- **Montaje con un único espejo y alineación coincidente en el eje:**

Este tipo de montaje, normalmente llamado “autocolimador” por el parecido con el sistema de autocolimación de los telescopios, consta de un único espejo (esférico o parabólico) en línea con la fuente de luz y con la cuchilla o elemento de refracción empleado para reflejar el haz de luz hacia la cámara.

La fuente de luz se sitúa a una distancia igual al radio de curvatura del espejo esférico ($R = 2 \cdot F$) para asegurar que el haz cubra toda su superficie, se refleje y vuelva al mismo punto de origen, en el cual, un divisor de haz o una cuchilla refleja un porcentaje de este hacia la cámara de captación.

El área de prueba se forma justo en frente del espejo, por lo que pueden surgir problemas con las sombras y las oclusiones del haz producidos por los propios objetos de prueba. En contraparte, estos montajes son los sistemas con mayor sensibilidad, ya que el haz de luz pasa dos veces por el área de pruebas; otra ventaja es que al constar de un solo espejo y estar el montaje en serie se eliminan todos los problemas con la coma y el astigmatismo.

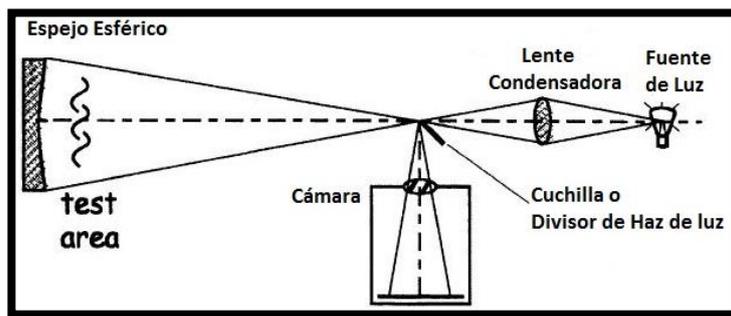


Figura 23: Montaje con un único espejo esférico y alineación coincidente en el eje.

Debido a la facilidad de adquisición de un espejo parabólico se puede sustituir el espejo esférico por este (Figura 24), incluyendo en el montaje y a continuación de la fuente de luz puntual una lente correctora, la cual compensa los efectos de la reflexión del haz sobre la superficie parabólica del espejo “transformándolos” en una reflexión sobre una superficie esférica.

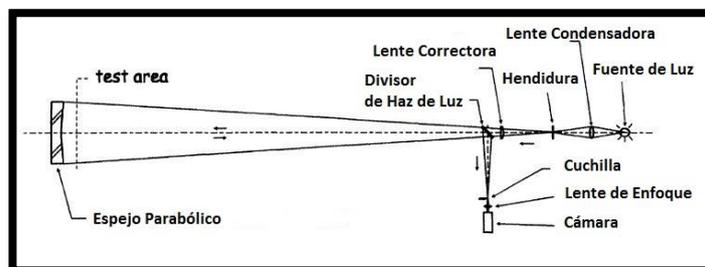


Figura 24: Montaje con un único espejo parabólico y coincidente en el eje

- Referencias: [1], [7], [8], [11], [13],[14],[15],[18].

2.6 Montajes Schlieren Especiales:

- **Rainbow Schlieren o Schlieren de Color:**

Este montaje es simplemente la sustitución de la cuchilla por un filtro gradual de colores, por lo que antes de ver la imagen en la escala de grises empleando la cuchilla (Figura 25.a) se visualizará los colores por los que pase la luz refractada. El filtro debe ser diseñado de tal manera que, según el ángulo refractado de la luz, esta atraviese el filtro por un color u otro, visualizando así los diferentes gradientes de densidades con distintos colores.

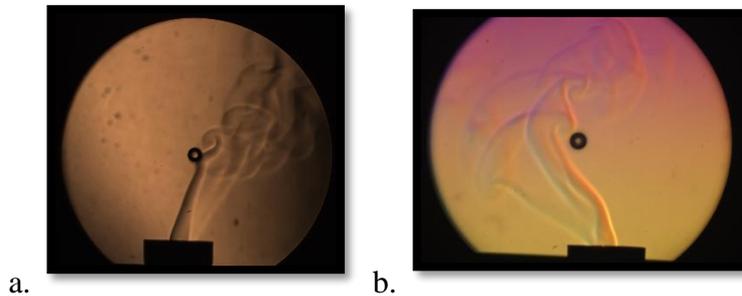


Figura 25: Imagen Schlieren de una vela encendida con cuchilla y con un filtro de color.

La introducción del color facilita el posterior procesado cuantitativo de la imagen, la ayuda en el reconocimiento de los diferentes gradientes e incluso en fines didácticos al explicar dicha técnica.

No obstante, cabe destacar la pérdida de sensibilidad en la imagen al sustituir la cuchilla por cualquier filtro, los gradientes de densidad capaces de detectar con un filtro gradual no son tan pequeños como los que se puede llegar a visualizar empleando la cuchilla.

- **Background Oriented Schlieren (BOS):**

Esta técnica se basa en la introducción de un fondo granulado (o patrón) entre el objeto a estudiar y el sistema de captación de imágenes. Como en el caso anterior, la sensibilidad es menor que cuando se emplea la cuchilla, no obstante, esta técnica no necesita de espejos o lentes, por lo que el espacio de prueba no queda restringido por el tamaño de los elementos ópticos.

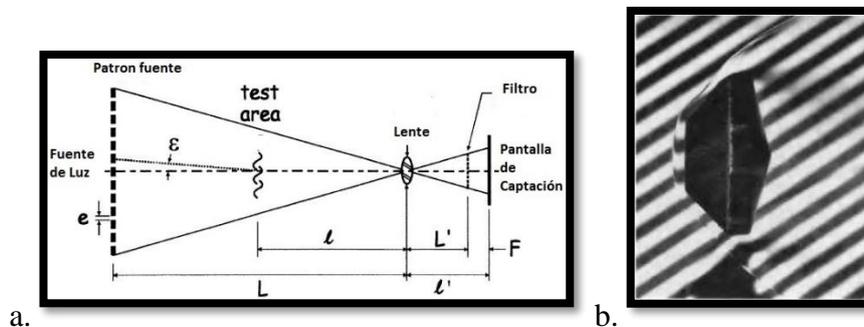


Figura 26: Configuración y ejemplo de imagen BOS.

- Referencias: [1], [2], [12], [16], [17].

3. DISEÑO CONCEPTUAL:

En este apartado se analizarán los objetivos y requisitos del Sistema a diseñar y el montaje Schlieren óptimo para dichas circunstancias.

3.1 Objetivos y Requisitos del Sistema:

La Tabla 2 recoge los objetivos del Sistema

junto a su Relevancia o valor referencial, siendo un 50% un objetivo poco relevante y un 100% un objetivo crítico.

N.º	OBJETIVOS Y REQUISITOS	RELEVANCIA	RESPUESTA	RESPUESTA
	GR&D ArcelorMittal	GR&D ArcelorMittal	Ingeniero	GR&D ArcelorMittal
1	Diseño de un Sistema Schlieren para la visualización de gases.	100%	De acuerdo.	Visto Bueno.
2	Diseño de una estructura base para el Sistema Schlieren.	100%	De acuerdo.	Visto Bueno.
3	El Sistema debe ser adaptable y reconfigurable para adaptarse a las diferentes pruebas que se vayan a realizar.	90%	De acuerdo.	Visto Bueno.
4	El Sistema debe ser compacto y fácilmente transportable.	60%	De acuerdo.	Visto Bueno.
5	Se debe adquirir todos los componentes del Sistema y generar el correspondiente presupuesto.	80%	De acuerdo.	Visto Bueno.
6	Se debe realizar el montaje y la calibración del Sistema Schlieren y de la estructura base.	100%	De acuerdo.	Visto Bueno.
7	Se debe poder incorporar los colectores de soplado de la Planta Piloto de Galvanizado para la realización de pruebas.	100%	De acuerdo.	Visto Bueno.

Tabla 2: Matriz de Requisitos del Sistema.

3.2 Colectores de Soplado:

El experimento principal que se realizará, inicialmente, con el Sistema Schlieren será la visualización de los flujos de aire proyectados de los colectores de soplado de la Planta Piloto de Galvanizado (Figura 27 a, b). Se debe analizar la interacción de los flujos de ambos colectores entre sí, respecto a la placa de pruebas, y las variaciones producidas por la introducción de diferentes baffles o deflectores en paralelo a la placa de pruebas.

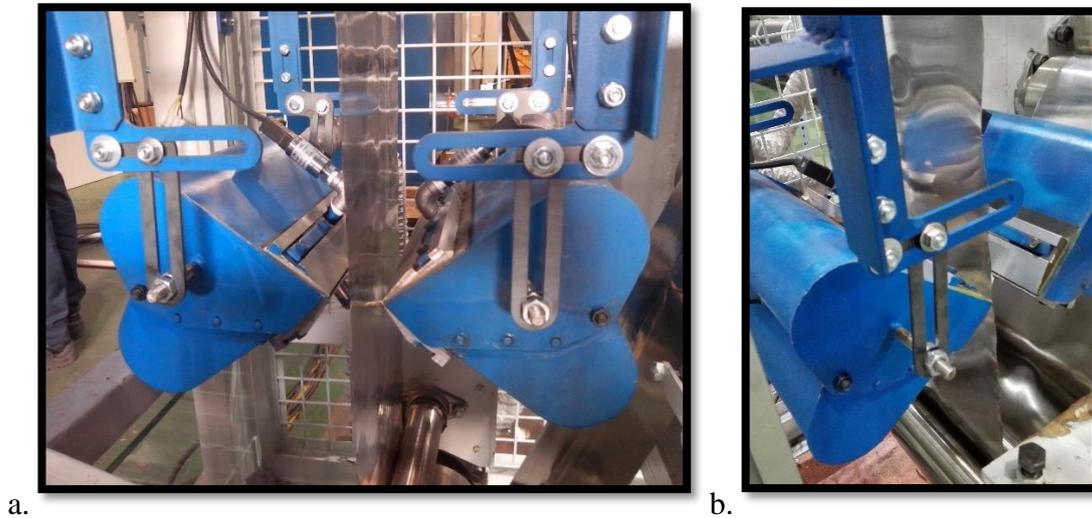


Figura 27: Colectores de soplado de la Planta Piloto de Galvanizado.

En la Tabla 3 se recogen las dimensiones y características generales de los colectores, ya que el Sistema a diseñar deber permitir:

- El montaje de ambos colectores y su funcionamiento.
- Acercar o alejar los colectores de la placa de pruebas para visualizar los flujos a distintas distancias.
- Visualizar total o parcialmente la salida de los flujos de los colectores, permitiendo el movimiento transversal de estos respecto al sistema de visión.

Elemento	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Peso (kg)	Material
Colector de Soplado	450	250	200	6-8	Acero Aleado

Tabla 3: Dimensiones generales del Colector de Soplado.

3.3 Montajes Schlieren:

A continuación, se analizarán las ventajas y desventajas de los diferentes montajes Schlieren, explicados en el apartado del Estado de la Técnica, con respecto a los objetivos y requisitos del Sistema a diseñar.

3.3.1 Montajes con lentes o espejos:

El primer criterio para decidir qué tipo de montaje Schlieren se va a diseñar es el uso de lentes o espejos, ya que el empleo de uno u otro es la principal diferencia entre los dos grandes tipos de montajes.

Como ya se ha mencionado, la principal ventaja del uso de lentes es que los montajes tienen una distribución de los elementos en serie, por lo que están libres de coma y astigmatismo, además de reducir la dificultad de calibración y puesta a punto; en contraparte, los espejos parabólicos de alta calidad y dimensiones son de fácil adquisición y reducido coste, aunque estos montajes tienden a tener una calibración más dificultosa inicialmente.

En las Tablas 4 y 5 se recogen las ventajas y desventajas del empleo de lentes o espejos respectivamente:

Ventajas	Desventajas
Sistemas con los elementos en serie	Necesidad de lentes de alta calidad superficial e interna
Sencilla calibración y puesta a punto	Elevado coste de las lentes respecto a sus dimensiones
Sistemas libres de coma y astigmatismo	Sistemas con aberraciones cromáticas

Tabla 4: Ventajas y Desventajas de los Montajes con Lentes.

Ventajas	Desventajas
Sencilla adquisición de espejos de alta calidad.	Difícil calibración y puesta a punto
Coste reducido respecto a sus dimensiones y características.	Sufren de coma y astigmatismo
Sistemas libres de aberraciones cromáticas	-

Tabla 5: Ventajas y Desventajas de los Montajes con Espejos.

Finalmente, se escoge el uso de espejos parabólicos para el diseño del Montaje Schlieren, principalmente debido al reducido coste de estos en relación con sus dimensiones y calidad superficial.

3.3.2 Montaje Tipo Z:

Como se ha mencionado anteriormente, este sistema es actualmente el más empleado debido al gran espacio creado para realizar las pruebas y a la óptima sensibilidad que se logra. No obstante, la dificultad de su calibración y puesta a punto es elevada inicialmente y el diseño del sistema debe ir enfocado en minimizar las aberraciones de coma y astigmatismo.

Este sistema proporcionaría un espacio de prueba suficientemente amplio para poder posicionar los colectores de soplado, la placa de pruebas y su correspondiente estructura de soporte, evitando oclusiones del haz de luz o sombras.

En la Tabla 6 se recogen las ventajas y las desventajas del montaje:

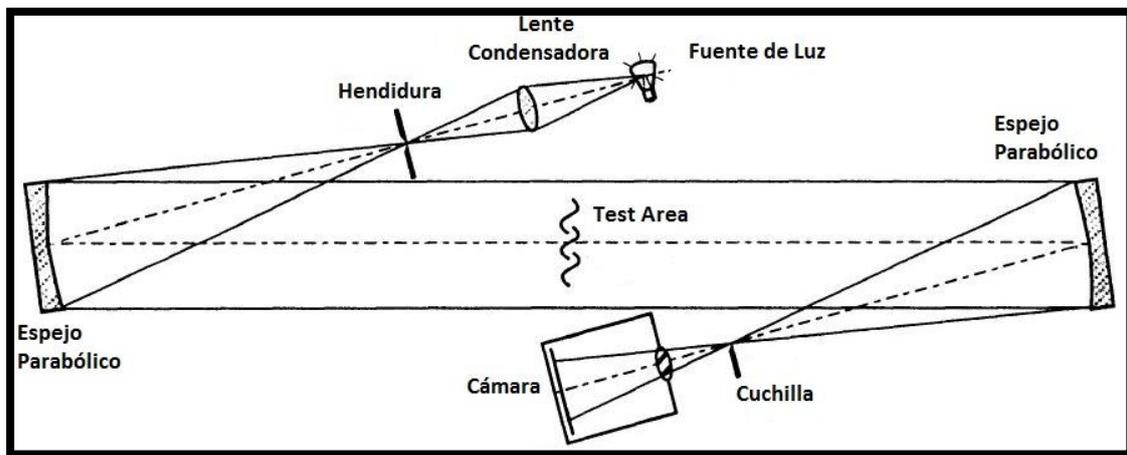


Figura 28: Configuración tipo Z.

Ventajas	Desventajas
Gran espacio de pruebas	Difícil calibración y puesta a punto
Libre de coma	Sufre de astigmatismo
Sistema robusto y óptima sensibilidad	Se precisa de dos espejos parabólicos

Tabla 6: Ventajas y Desventajas del Montaje Tipo Z.

3.3.3 Montaje con un único espejo y alineación coincidente en el eje:

Este tipo de configuración es el montaje que mayor sensibilidad aporta, ya que el haz de luz pasa dos veces por el área de pruebas, no obstante, dicho área se ve restringido por el tamaño del espejo y se sitúa justo en frente de este, lo que provoca un espacio reducido para incorporar los colectores, además que estos pueden producir oclusiones y sombras a los rayos reflejados impidiendo la formación de la imagen Schlieren.

En la Tabla 7 se recogen las ventajas y desventajas de este montaje:

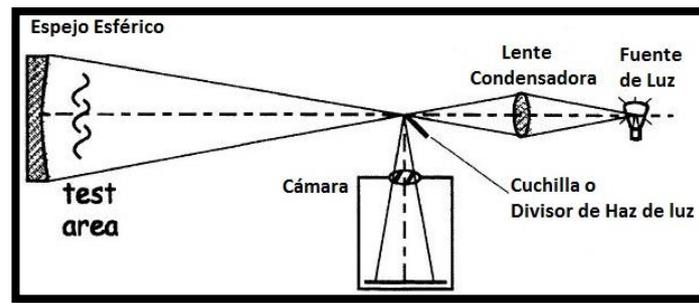


Figura 29: Configuración con un único espejo y alineación en el eje.

Ventajas	Desventajas
Sistema con la mayor sensibilidad	Espacio de pruebas reducido
Sistema con los elementos en serie, por lo que tiene una fácil calibración y puesta a punto	Posibles interferencias y oclusiones al haz de luz por parte de los objetos de las pruebas
Libre de coma y astigmatismo	Difícil adquisición del espejo esférico

Tabla 7: Ventajas y Desventajas del Montaje con un único espejo y coincidente en el eje.

Otra opción barajada fue la configuración con un único espejo y alineación fuera del eje (Figura 30), la cual es una variación del sistema alineado en el eje y aporta un mayor espacio de pruebas, aunque insuficiente para los colectores ya que estos bloquearían el haz antes de llegar al espejo parabólico, además que este sistema sufre de coma y astigmatismo debido ángulo de incidencia sobre el espejo.

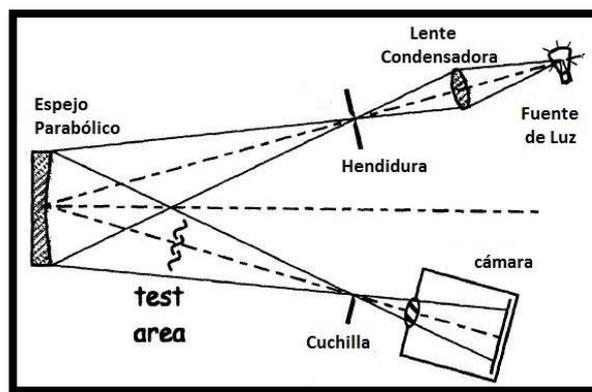


Figura 30: Configuración con un único espejo y alineación fuera del eje.

Ventajas	Desventajas
Alta sensibilidad	Sufre de coma y astigmatismo
Uso de un solo espejo parabólico	Espacio de pruebas reducido
Fácil calibración y puesta a punto	-

Tabla 8: Ventajas y Desventajas del Montaje con un único espejo y alineación fuera del eje.

3.3.4 Selección del Montaje Schlieren óptimo:

Una vez analizada cada opción de montaje se debe ponderar y calificar cada uno de ellos respecto a los requisitos que debe cumplir el montaje Schlieren a diseñar, dicho proceso se recoge en la Tabla 9.

La escala para la calificación de los requisitos es de 1 a 5 donde:

1 = Insuficiente; 2 = Deficiente; 3 = Regular; 4 = Bueno; 5 = Excelente.

Y los pesos de ponderación tienen el rango de 1 a 2 donde:

1 = Importancia reducida; 1,2 = Importancia Baja; 1,4 = Importancia relativa;
1,6 = Importancia Alta; 1,8 = Requisito Prioritario; 2 = Requisito Prioritario Crítico.

N.º	Requisitos del Montaje Schlieren	PESO	MONTAJES		
			Tipo Z	Único espejo alineación coincidente	Único espejo alineación no coincidente
1	Espacio de pruebas suficiente para los colectores de soplado	2	5	2	3
2	Alta sensibilidad	1,8	4	5	4
3	Minimización de aberraciones	1,8	4	5	3
4	Calibración y Puesta a Punto	1,6	3	4	4
5	Adaptable y reconfigurable	1,4	5	2	3
6	Minimización de costes	1,2	3	4	4
Total, Puntos			39,8	36	34
Porcentaje alcanzado			81,2%	73,5%	69,4%

Tabla 9: Ponderación de los Requisitos del Montaje Schlieren.

Como se puede observar, el montaje que mejor cumple todos los requisitos es el Tipo Z con un 81,2% porcentaje alcanzado, dicho resultado es lógico ya que este montaje aporta un espacio de pruebas considerablemente grande para poder situar los colectores de soplado y sus soportes, además de tener una buena sensibilidad y métodos de minimizar las aberraciones ópticas. Finalmente, y debido también al gran espacio de pruebas este sistema es adaptable y reconfigurable para la experimentación con distintas pruebas.

Con lo que se concluye, que el montaje Schlieren óptimo para el Sistema es el **Tipo Z**.

4. DISEÑO DETALLADO:

En este apartado se abordará el diseño de detalle del montaje Schlieren seleccionado, componentes, características, distribución..., también se explicará la estructura base diseñada y el pórtico de sujeción de los colectores de soplado.

4.1 Montaje Schlieren Tipo Z:

4.1.1 Distribución:

La distribución de los elementos para el montaje Tipo Z debe ser enfocado en la minimización de las aberraciones ópticas de coma y astigmatismo y para formar espacio de pruebas suficiente para el posicionamiento de los colectores. Mediante la Figura 31 se procederá a explicar dichos criterios de distribución:

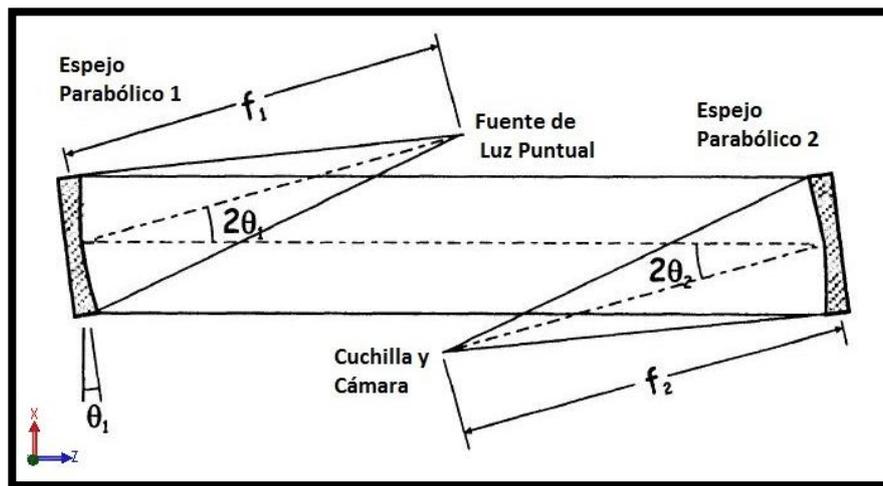


Figura 31: Vista en planta de la distribución del montaje tipo Z.

1. La fuente de luz puntual debe estar situada en la distancia focal (f_1) del Espejo Parabólico 1, para colimar el haz de luz; y con un ángulo de incidencia sobre este igual al doble del ángulo de compensación (θ_1) del Espejo 1. El ángulo de compensación es el ángulo de giro del espejo en el Eje XZ respecto a la vertical, o Eje Y.

$$\text{Ángulo de compensación} = \theta_1 = \theta_2 = \theta; \quad \text{Ángulo de incidencia} = 2\theta_1 = 2\theta_2 = 2\theta;$$

Es preciso recordar que los dos espejos parabólicos empleados deben ser iguales, por lo que:

$$\text{Distancia focal del Espejo 1 } (f_1) = \text{Distancia focal del Espejo 2 } (f_2) = f;$$

2. El haz de luz es reflejado y colimado por el Espejo 1 hacia el Espejo 2, el cual se debe situar alineado en el eje óptico y a una distancia mínima del doble de la focal $2f$, para poder aportar espacio de pruebas suficiente.
3. El Espejo 2, el cual tiene un ángulo de compensación igual al del Espejo 1 pero en sentido contrario, refleja el haz hacia la cuchilla, la cual se sitúa a una distancia igual a la focal, f .
4. Finalmente, se posiciona la cámara posteriormente de la cuchilla a una distancia dependiente del juego de lentes que está emplee, intentando no superar los 10 cm de distancia entre la cuchilla y el sensor de la cámara.

En el punto 1. se mencionó que los ángulos de compensación de ambos espejos deben ser iguales y de sentido contrario, esto se realiza para eliminar la aberración de coma, ya que el efecto de la coma debido al desalineamiento entre la fuente de luz puntual y el Espejo 1 se compensa al girar con el mismo ángulo, pero en sentido contrario el Espejo 2. Esta es una de las principales razones del uso del montaje tipo Z, que con una calibración precisa se elimina la coma.

No obstante, el efecto del astigmatismo no se puede eliminar, pero si minimizar. Para ello se emplea la distancia entre el Plano Focal Sagital y el Plano Focal Tangencial (Figura 13.b) como una relación de la severidad del astigmatismo, Ecuación (13). De dicha ecuación se deduce que si se reduce el ángulo de compensación (θ) al mínimo posible se minimiza el efecto del astigmatismo en la formación de la imagen Schlieren.

$$\Delta f = f \cdot \frac{\sin(\theta)^2}{\cos(\theta)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

En conclusión, para minimizar el astigmatismo se recomienda el empleo de ángulos de compensación inferiores a 8° . Además, para asegurar la ausencia de aberraciones y la formación de imágenes óptimas es recomendable el uso de espejos parabólicos con ratio focal comprendido entre 6 y 12. El ratio focal (ecuación 14) es la relación entre la distancia focal y el diámetro del espejo.

$$\text{Ratio focal} = n = \frac{f}{d} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Inicialmente, se debe seleccionar el espejo, ya que como se ha visto la distribución del montaje se restringe por la distancia focal de este. Para este estudio se adquirió dos espejos parabólicos primarios de telescopio (Figura 32) con las siguientes características:

- Diámetro, $d = 6'' \approx 153\text{mm}$;
- Distancia focal, $f = 900\text{mm}$;
- Ratio focal, $n = 6$;
- Material = BK7; Espesor = 20,7mm; Peso = 0,898 kg; Reflectividad = 94%.

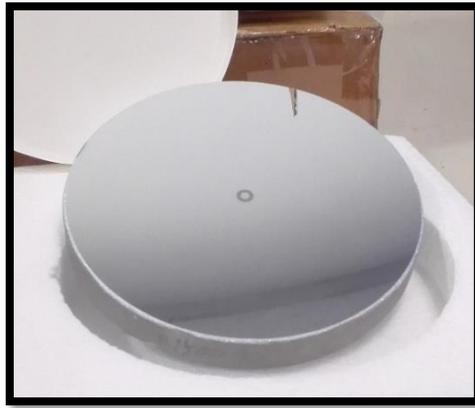


Figura 32: Espejo parabólico empleado.

A continuación, se fija un ángulo inicial de compensación (en este caso de 5°) el cual se irá reduciendo una vez montado el Sistema, hasta conseguir el mínimo ángulo posible sin ocasionar oclusiones en el haz de luz colimada. Paralelamente se debe modificar el ángulo de incidencia sobre los espejos, ya que este es el doble del ángulo de compensación (en este caso 10°).

Con el ángulo de compensación fijado se puede observar que la severidad del astigmatismo no es elevada, por lo que se conseguirán imágenes nítidas.

$$\Delta f = f \cdot \frac{\sin(\theta)^2}{\cos(\theta)} = 900 \cdot \frac{\sin(5^\circ)^2}{\cos(5^\circ)} = 6,86mm \quad \text{Ecuación (15)}$$

Con la selección de los espejos y los ángulos fijados se puede cerrar la distribución que debe llevar el montaje Schlieren tipo Z a diseñar, el cual en este caso corresponde con la Figura 33, en la cual destacar que la distancia entre los espejos está fijada a 3 metros para asegurar el espacio de prueba suficiente para posicionar los colectores y su soporte.

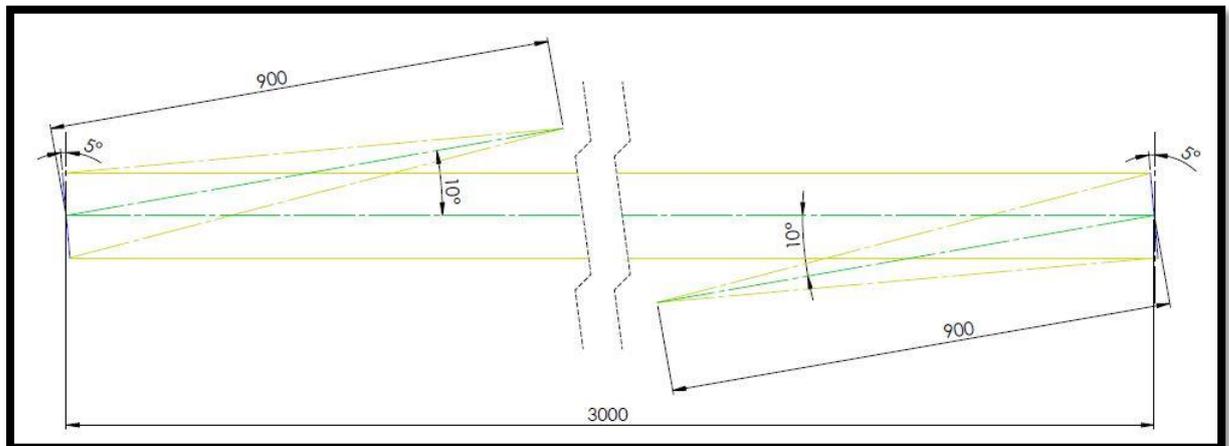


Figura 33: Vista en Planta de la distribución del montaje Tipo Z diseñado.

4.1.2 Elementos:

Una vez seleccionado los espejos y hecho la distribución, se procede a mostrar el resto de los elementos que componen el montaje Schlieren diseñado:

- **Soporte o Montura de gran Apertura:**

La función de este elemento es la sujeción y posicionamiento del espejo, ya que una vez introducido este en el orificio se aprisiona con un tornillo sin cabeza de hendidura Allen. Dicha montura se caracteriza por el rango angular, o giro respecto al Eje vertical, que permite al espejo, siendo este ajustable por medio de dos micrómetros.

- Diámetro de óptica $\approx 153\text{mm}$;
- Rango Angular = 4° ;
- Material de la base = Acero; Material del frontal = Aluminio; Peso total = 1,4 kg.

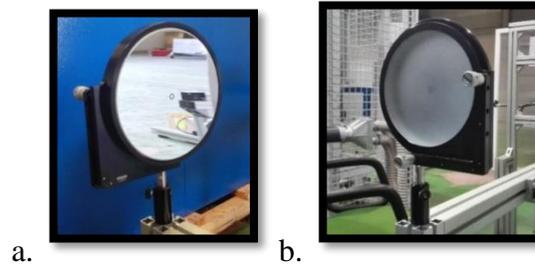


Figura 34: Soporte o Montura de gran Apertura para los espejos.

- **Fuente de luz:**

La fuente de luz a emplear debe proporcionar un haz de luz homogéneo, es decir, que los rayos de luz tengan una proyección uniforme y se formen haces con la misma luminosidad. En este proyecto se emplea una fuente iluminadora de fibra óptica, la cual permite regular la intensidad de luz suministrada, o una fuente LED de alta intensidad; el uso de uno u otro es arbitrario ya que se ha comprobado que ambas aportan luminosidad suficiente para la formación de imágenes Schlieren de pequeños gradientes. Finalmente, se puede emplear un diafragma para disminuir todavía más el haz de luz emitido.

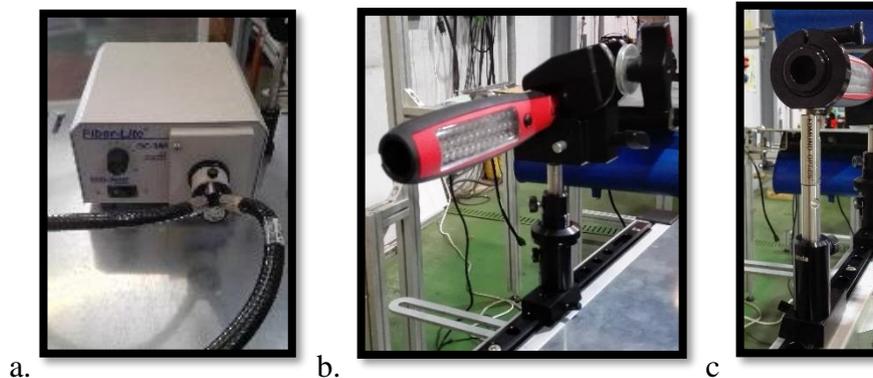


Figura 35: Fuentes de luz y Diafragma.

- **Cuchilla o filtro:**

El objetivo de la cuchilla es el bloqueo parcial de los rayos de luz, con lo que se consigue una mejora del contraste del haz de luz incidente en la cámara, mejorando la percepción de gradientes menores. Sólo se precisa de un objeto de poco espesor y con un borde afilado, por lo que en la práctica se emplea una cuchilla de afeitar.

También se han realizado pruebas con filtros de colores graduales, aunque disminuye la sensibilidad del sistema.

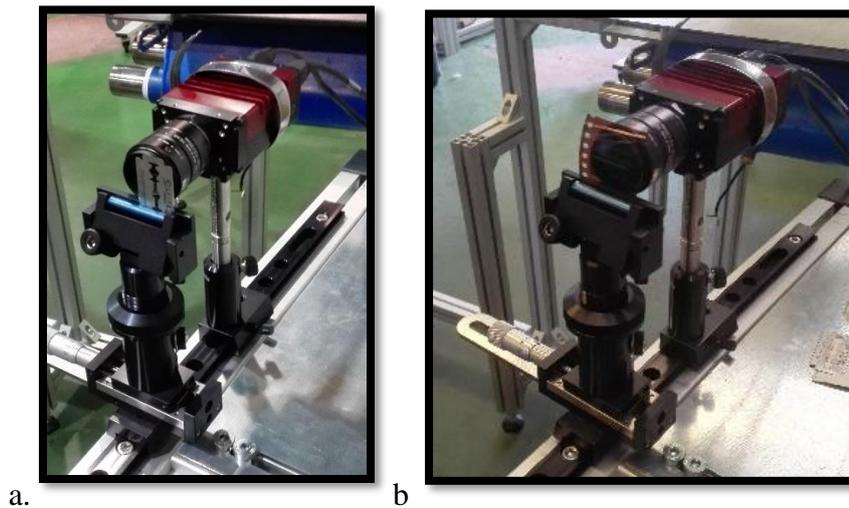


Figura 36: Montaje de la Cuchilla y del filtro gradual.

Para la sujeción de los diferentes filtros se ha adquirido un soporte con agarre variable de 0 a 12 mm de rango (Figura 37.a).

Para el desplazamiento de la cuchilla en la dirección transversal al haz de luz, y así controlar la sensibilidad por el bloqueo parcial del haz, se empleará una base con traslación controlada por un micrómetro (Figura 37.b).

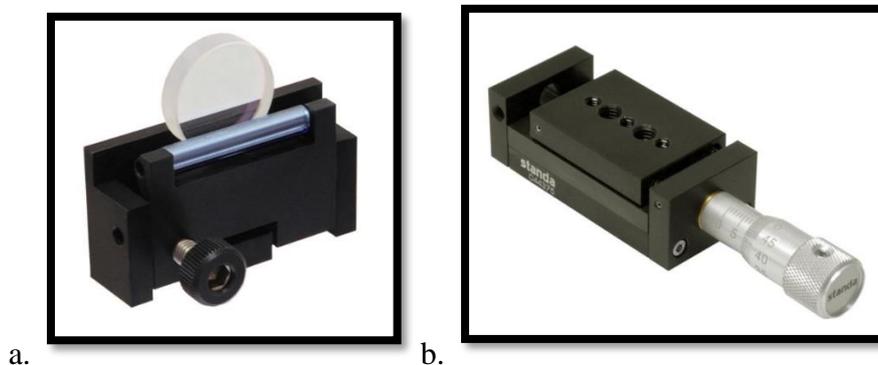


Figura 37: Soporte con agarre variable y Base de traslación.

- **Cámara de adquisición y Objetivo:**

Para la captación de imágenes Schlieren es recomendable el uso de cámaras sin objetivo incorporado, ya que este juego de lentes puede distorsionar o hacer imposible de ver las imágenes, por lo que se recomienda el uso de una cámara la cual permita proyectar el haz de luz, proveniente de la cuchilla, sobre su propio sensor, o que permita el montaje de objetivos individuales.

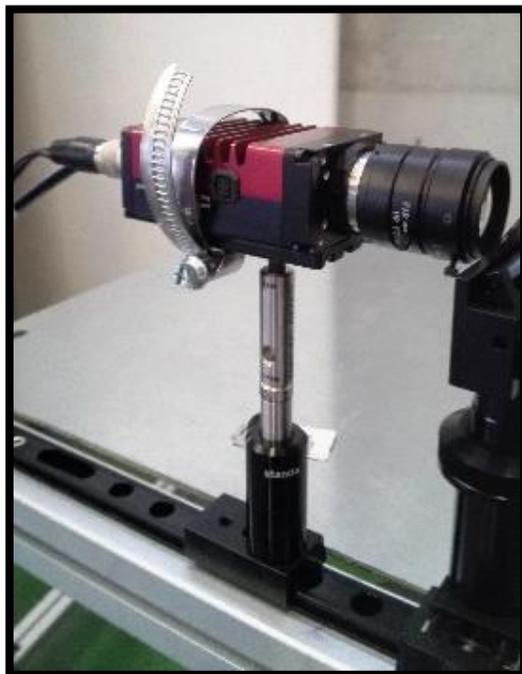
El sistema de recepción de imágenes consta de la cámara de alta sensibilidad Prosilica GT-1920, a la que se incorporará un Objetivo de 35mm con apertura F2, ya que al proyectar el haz de luz directamente sobre el sensor este se saturaba.

Características de la Cámara:

- Familia = Prosilica GT; Modelo = 1920; Fabricante = Allied Vision Technologies.
- Sensor = Sony ICX674 2/3''; Resolución = 1936x1456 píxeles; Velocidad = 40 fps.
- Tipo de Sensor = CCD; Dimensiones = 29x53,3x33mm; Peso = 0,224 kg.

Características del Objetivo:

- Familia = JC1MS Series; Modelo = LM35JC1MS; Fabricante = KOWA.
- Apertura (F) = 2; Distancia Focal = 35 mm; Tamaño sensor = 2/3''.



a.



b.

Figura 38: Cámara de captación y Objetivo.

- **Sistemas Soporte y de Desplazamiento:**

Para fijar todos los elementos a la estructura base se emplearán los soportes y postes de montaje mostrados en la Figura 39.a y .b, los cuales permiten, además, el movimiento en el Eje Vertical para calibrar y situar los componentes en el mismo plano Horizontal.

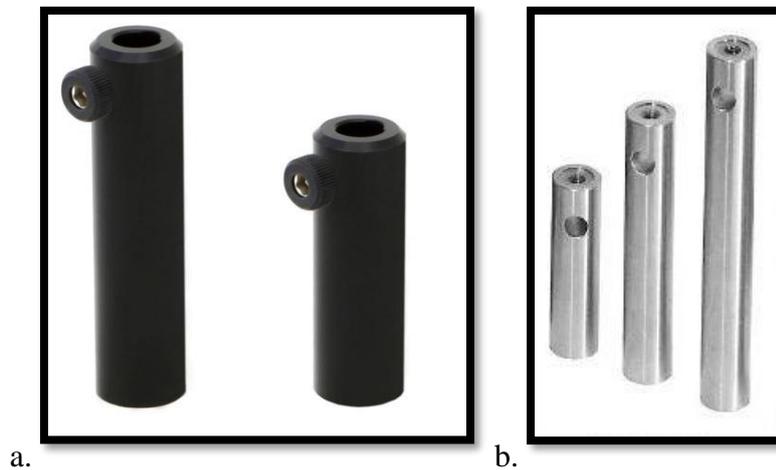


Figura 39: Soporte y Postes de Montaje.

Para permitir el desplazamiento de la fuente de luz, de la cuchilla y de la cámara hasta su posición óptima se implementarán dichos componentes sobre bases deslizantes, y estas a su vez sobre carriles ópticos de aluminio, Figura 40.a y .b.

Se precisa de este grado de libertad ya que se necesita hallar los puntos exactos a la distancia focal de ambos espejos, para situar en uno la fuente de luz y en el otro la cuchilla.

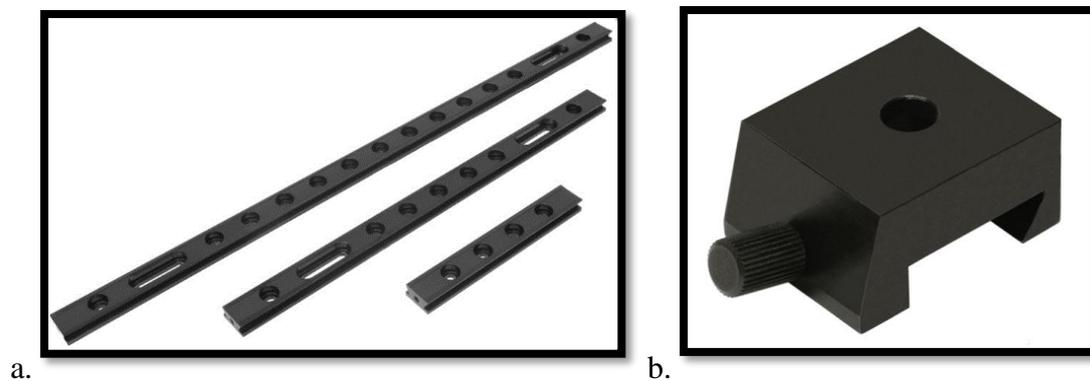


Figura 40: Carril óptico y Base deslizante.

4.2 Estructura Base y Pórtico:

Para el diseño y el montaje de las estructuras se empleará Perfil de Aluminio de sección 45x45mm (Figura 41.a) y escuadras metálicas como método de unión (Figura 41.c) debido a la gran versatilidad que estos aportan, pudiendo realizar sencillamente modificaciones, cambios y ajustes una vez estén las estructuras montadas.

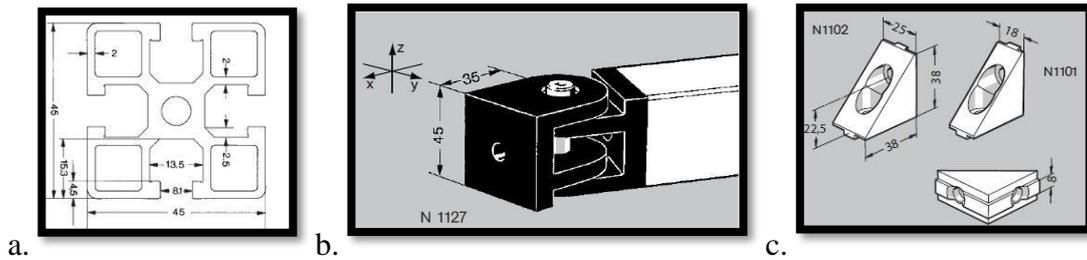


Figura 41: Perfil, rótula y escuadra empleados en el montaje.

En la Figura 42.a se muestra el diseño de la Estructura Base implementada para sostener el montaje Schlieren, el diseño consta de una base con forma de I, apoyada en el suelo mediante pies regulables, y en dos Subestructuras con forma de U, las cuales harán de apoyo para los espejos. El perfil central se empleará como guía para apoyar y posicionar las diferentes partes de la Estructura, como es el caso de la Subestructuras y el Pórtico.

Se incorporará una Extensión lateral (Figura 42.b), unida mediante una rótula de acero (Figura 41.b) a cada Subestructura, donde se posicionarán los diferentes elementos del montaje Schlieren (fuente de luz, cuchilla y cámara). El objetivo de la rótula, además, es calibrar el ángulo de incidencia (2θ) entre la fuente de luz y el espejo, una vez dicho ángulo esté ajustado se fijará la extensión a la subestructura mediante una placa de sujeción situada en la parte inferior del montaje.

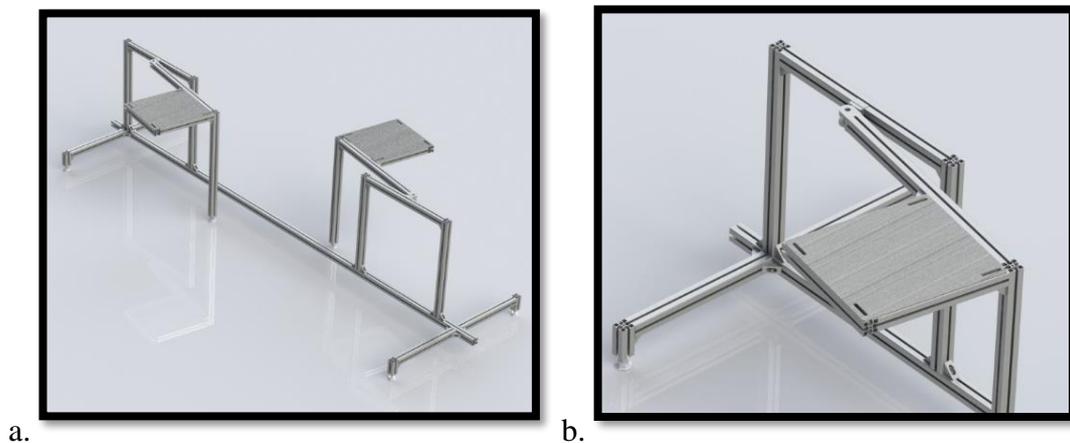


Figura 42: Diseño de la Estructura Base.

Finalmente, se diseña una estructura soporte, o Pórtico, para la sujeción y posicionamiento de los colectores de soplado (Figura 43.a). Dicho Pórtico permite el movimiento y ajuste Vertical de los colectores, y mediante unas placas de sujeción prediseñadas (Figura 43.b) se controla los demás grados de libertad, los cuales son el movimiento horizontal y separación individual de cada colector con la placa de pruebas.

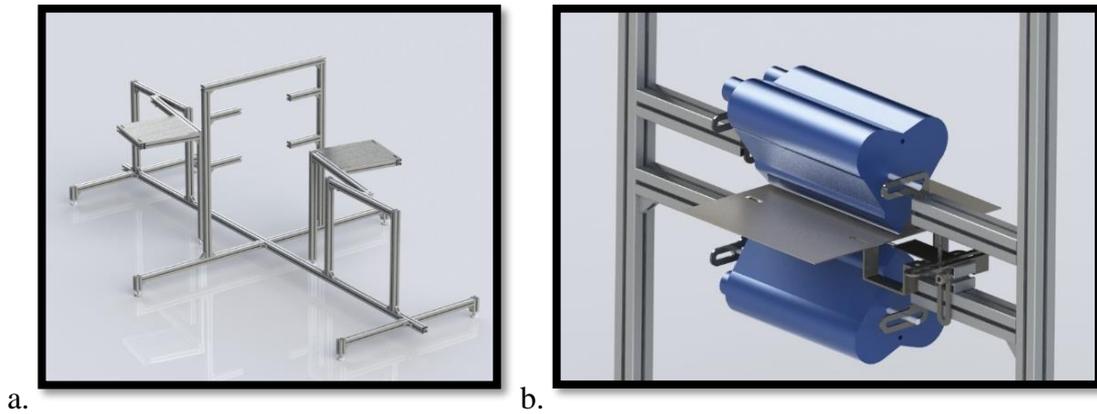


Figura 43: Diseño e incorporación del pórtico y la sujeción de los colectores a la Estructura base.

En las posteriores Figuras se puede observar el proceso de montaje de las estructuras del Sistema:

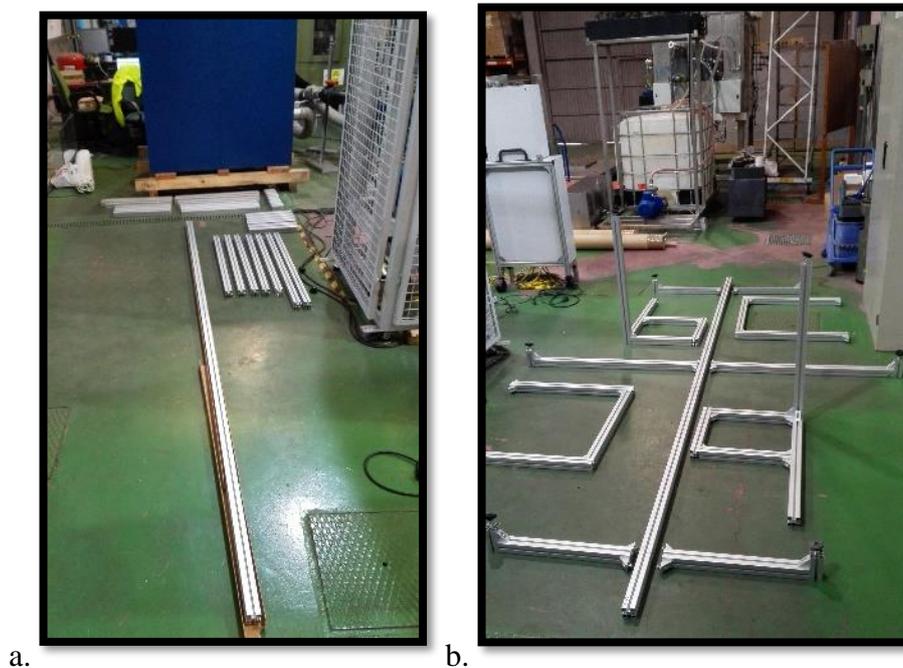


Figura 44: Montaje de la Estructura Base.



a.



b.

Figura 45: Estructura Base y Pórtico.



a.

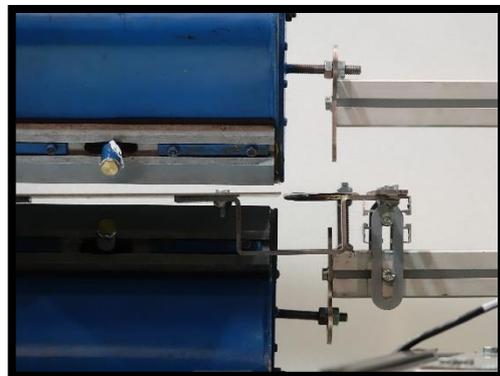


b.

Figura 46: Vista Completa del Sistema Schlieren.



a.

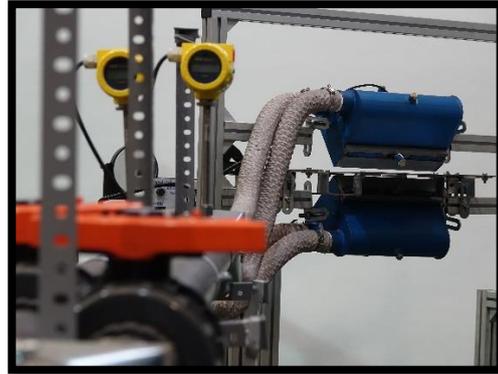


b.

Figura 47: Colectores de Soplado y vista detalle de la placa y el baffle.



a.

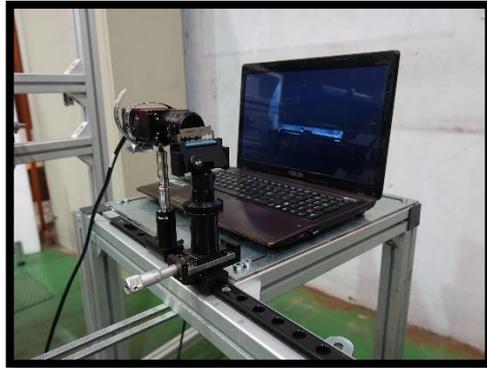


b.

Figura 48: Vista desde la Línea de Alimentación de aire del Sistema.

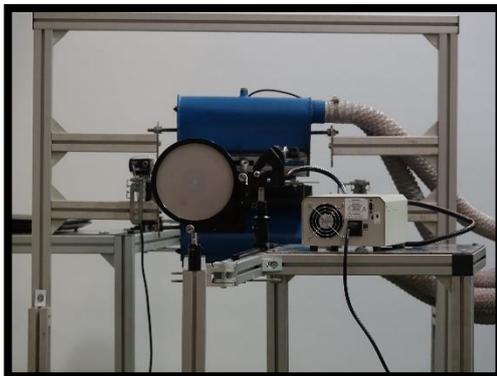


a.



b.

Figura 49: Vista detalle de la Fuente de Luz y del Sistema de Captación de imágenes.



a.



b.

Figura 50: Vista del Sistema desde la posición de los espejos.

5. CALIBRACIÓN Y PUESTA A PUNTO:

En este apartado se abordará la calibración del Sistema para asegurar la captación de óptimas imágenes Schlieren:

Inicialmente, se procederá a explicar el montaje y cuidado de los espejos, ya que cualquier imperfección en su superficie puede alterar los haces de luz, lo que conlleva la obtención de imágenes erróneas.

- Condiciones de cuidado del espejo:

1. No se debe tocar con las manos la parte pulida del espejo. Para su transporte y colocación en la montura se debe emplear una ventosa o el uso de guantes de látex, y sostenerlo por la parte contraria a la cara pulida.
2. La cara pulida se debe limpiar con acetona o con agua destilada, y una gasa presionando suavemente sobre la superficie para no producir imperfecciones.
3. Para retirar los restos sólidos se empleará un algodón, procurando no pasar varias veces sobre el mismo lugar.
4. Finalmente, se sopla con una pera de absorción o con una inyección de aire la superficie para eliminar los posibles restos del algodón.

- Calibración del Sistema Schlieren:

1. Ajustar y fijar el ángulo de incidencia (2θ) de las extensiones laterales.
2. Asegurar que el eje óptico de todos los elementos esté en el mismo Plano Horizontal, ajustando para ello la altura de los componentes mediante los soportes y postes de montaje.
3. Posicionar la fuente de luz en el foco del Espejo 1.
4. Realizar un primer ajuste de los espejos hasta que el haz de luz se refleje en la superficie de la cuchilla.
5. Posicionar la cuchilla en el foco del Espejo 2, para esto se desplazará la cuchilla sobre el carril óptico hasta lograr una imagen del espejo constante en luminosidad:
 - Figura 51.a: la cuchilla está situada a una distancia menor de la focal del Espejo 2.
 - Figura 51.b: la cuchilla está situada a una distancia mayor de la focal del Espejo 2.
 - Figura 51.c: la cuchilla está situada en el foco del Espejo 2, posición óptima.

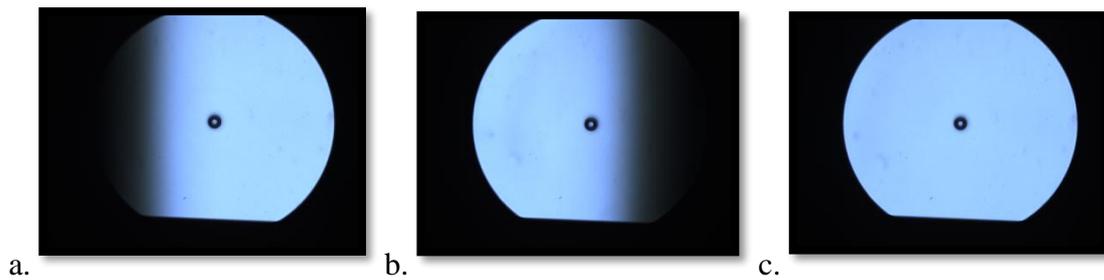


Figura 51: Calibración del posicionamiento de la cuchilla.

6. Alinear los espejos mediante los micrómetros de las monturas hasta que los círculos centrales, los cuales indican el centro y el eje óptico del espejo, queden superpuestos. Un desalineamiento de los espejos produce que se visualice la superficie del espejo como una elipse, en vez de una circunferencia:

- Figura 52.a: Desalineamiento de los espejos.
- Figura 52.b: Desalineamiento de los espejos.
- Figura 52.c: Alineamiento de los espejos, posición óptima.

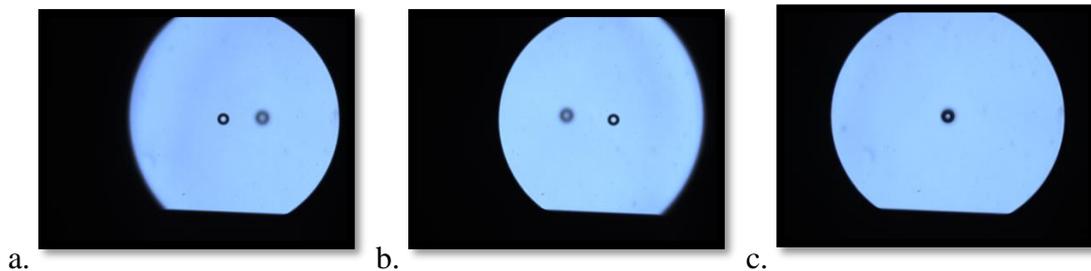


Figura 52: Calibración del alineamiento de los espejos.

7. Finalmente, se posiciona la cámara posteriormente de la cuchilla y se enfoca hasta conseguir una imagen nítida.

Para modificar la sensibilidad del Sistema una vez calibrado, se debe modificar el haz de luz bloqueado por la cuchilla mediante el micrómetro de la base de traslación (Figura 37.b), ya que al aumentar el haz de luz bloqueado aumenta la sensibilidad del montaje y se pueden visualizar gradientes de densidad menores.

Paralelamente al aumento del haz bloqueado se debe incrementar el tiempo de exposición de la cámara para permitir que aumente la luz captada por el sensor.

6. PRIMERAS CONCLUSIONES Y MEJORAS:

6.1 Conclusiones:

A continuación, se presentan los hitos alcanzados tras la experimentación y pruebas realizadas con el Sistema Schlieren:

- Se ha identificado las características y parámetros críticos para la visualización del Método Schlieren.
- Se ha diseñado un Sistema versátil y ajustable para la realización de futuros y diferentes experimentos, pudiendo ser este empleado como una herramienta de visualización.
- Se visualizó en tiempo real la expulsión de aire a través de los colectores, siendo perceptible el recorrido del flujo desde la salida de los colectores, hasta el choque con la banda de pruebas y la interacción del baffle en dicho recorrido.
- Gracias a la visualización de los flujos en tiempo real se pueden realizar multitud de pruebas con los colectores, variando su separación con la banda, el ángulo de soplado, uso de diferentes baffles y distancia de estos con la banda..., sin tener que requerir a simulaciones con programas de elementos finitos, ya que estos conllevan un tiempo elevado de realización y procesado.

En la Figura 53.a se muestra la imagen captada por una cámara corriente de los colectores expulsando aire, mientras que la Figura 53.b es la imagen Schlieren tomada con el Sistema, en dicha imagen se visualiza claramente los flujos de aire de cada colector y la interacción con el baffle.

En la Figura 54 se puede ver dos imágenes Schlieren, una sin expulsar aire y la segunda con los colectores en marcha.

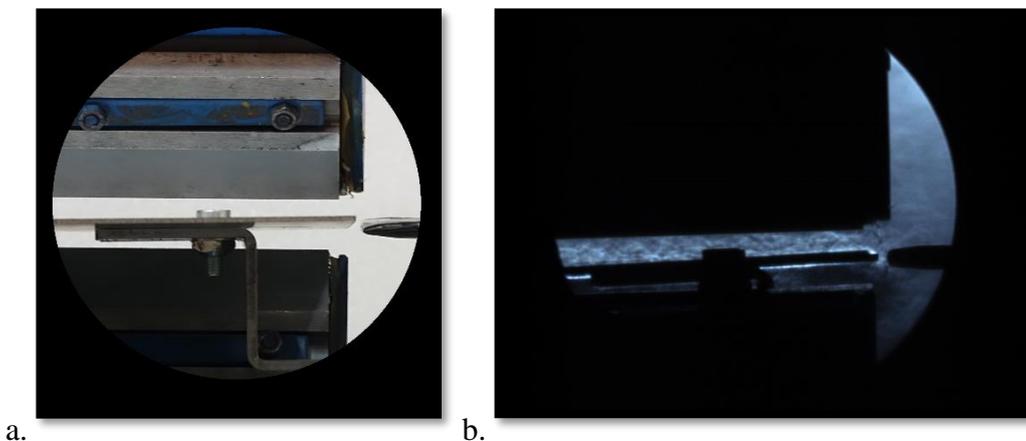


Figura 53: Imagen de los colectores e Imagen Schlieren del flujo del aire.

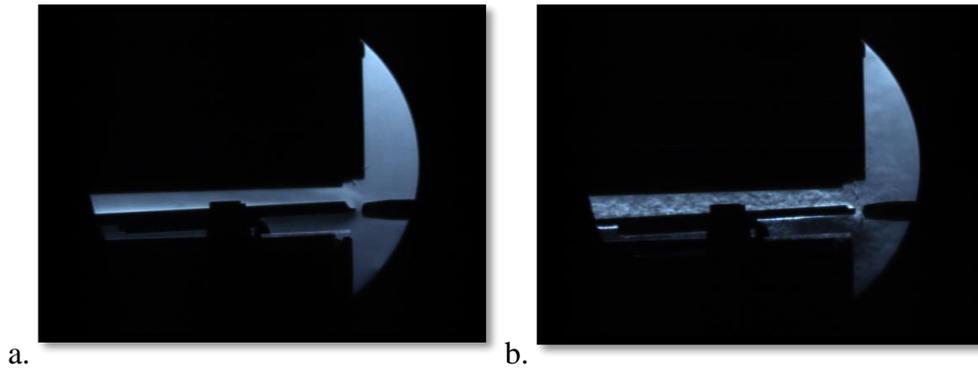


Figura 54: Imágenes Schlieren de los colectores sin y con flujo de aire.

- Rainbow Schlieren o Schlieren de color: este montaje se basa en la sustitución de la cuchilla por un filtro gradual de colores, por lo que antes de ver la imagen en la escala de grises empleando la cuchilla se visualizará los colores por los que pase la luz refractada.

Mediante el programa Matlab, se diseñó los filtros graduales mostrados en las Figuras 55.a y .b, y posteriormente, fueron revelados en carrete fotográfico de 35m, para poder ser implementados en el Montaje Schlieren.

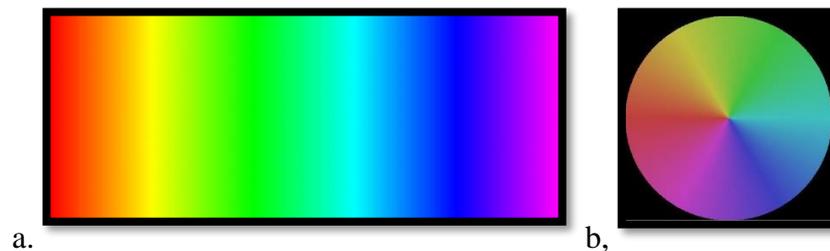


Figura 55: Filtros graduales diseñados.

Aunque la introducción del color facilita el posterior procesado cuantitativo de la imagen, e incluso la ayuda en el reconocimiento de los diferentes gradientes, cabe destacar la pérdida de sensibilidad en la imagen al sustituir la cuchilla por cualquier filtro, ya que los gradientes de densidad capaces de ser detectados con un filtro gradual no son tan pequeños como los que se puede llegar a visualizar empleando la cuchilla.

En la Figura 56.a y .b se puede observar los gases producidos por la combustión de una vela y por un encendedor respectivamente.

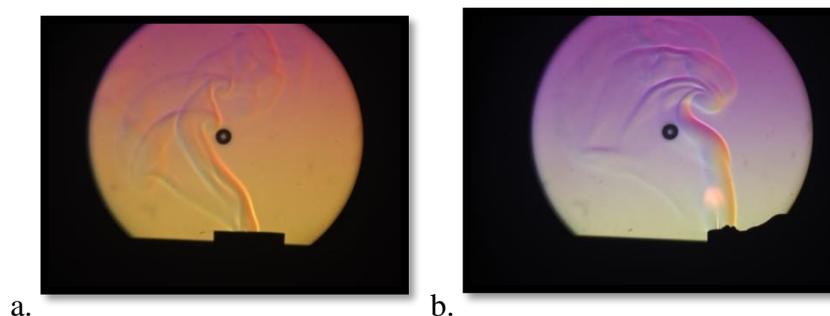


Figura 56: Imágenes Schlieren captadas implementando los filtros graduales.

6.2 Mejoras:

- Se estudiará la interferencia de la separación y posicionamiento de los colectores de soplado con la banda, para detectar el origen de fallos en la superficie galvanizada.
- Se realizará pruebas con diferentes diseños de baffles analizando el comportamiento de las corrientes bajo su interferencia.
- Se precisa separar el Pórtico de la Estructura Base, ya que las vibraciones de los colectores pueden interferir con la cámara de captación y con la cuchilla, modificando el porcentaje de haz de luz bloqueado con esta, lo que conlleva una variación de la sensibilidad del Sistema y la pérdida de nitidez en la imagen.
- Es conveniente el uso de guías y patines lineales para la modificación de la posición de los colectores y de la banda, para agilizar y acelerar la modificación de las futuras pruebas.
- Es necesario incorporar un Sistema calefactor de aire en la Línea de alimentación que une el compresor con los colectores, ya que el aire proveniente del compresor está a una temperatura próxima, aunque inferior, a la temperatura del aire ambiente, lo que conlleva gradientes de densidad pequeños y difícilmente perceptibles con este Sistema Schlieren. En las Figuras 57.a y.b se puede apreciar la visualización de un flujo de aire a temperatura ambiente (20°) y de un flujo calentado hasta los 50°, como se puede ver, al aumentar, moderadamente, la temperatura del aire expulsado se consigue la óptima visualización del flujo.

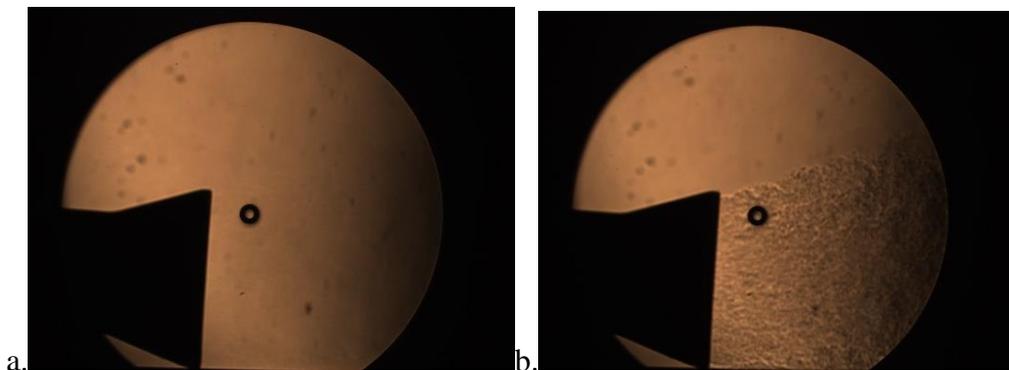


Figura 57: Imágenes Schlieren de flujo de aire a temperatura ambiente y calentado.

7. SOPLANTE Y LÍNEA DE ALIMENTACIÓN:

Como se ha comentado anteriormente, es necesario incorporar un sistema calefactor del aire entrante en los colectores de soplado, pero antes es necesario explicar el propio sistema de alimentación de estos, el cual está compuesto por el soplante y la línea de alimentación.

7.1 Soplante:

Este elemento se encarga de proporcionar un caudal de aire fijo a los colectores, este tipo de máquinas no aportan caudal a una presión prefijada, sino que suministran un caudal a la presión que demande la línea hasta llegar a la presión de tarado del presostato de seguridad del soplante, la cual esta fijada en 450mbar, es decir, se suministrará un caudal constante siempre que la presión de la línea sea inferior a 450 mbar.

El modelo adquirido es el soplante de desplazamiento positivo GM 15-L de Aerzen.

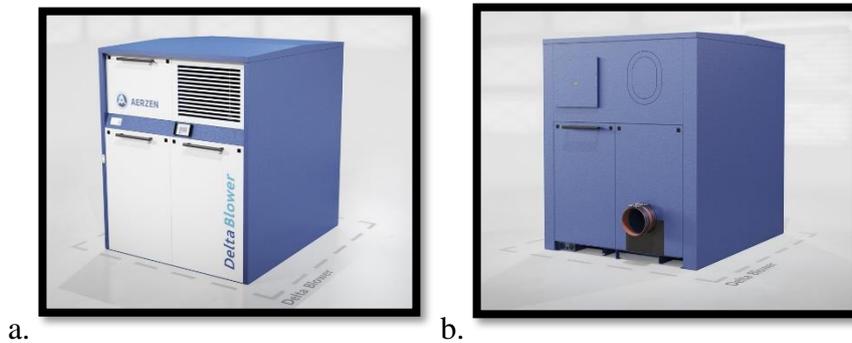


Figura 58: Imagen del Soplante.

En la Figura 59 se puede observar las curvas características del soplante, del cual se puede obtener los valores principales de caudal y potencia absorbida por el motor.

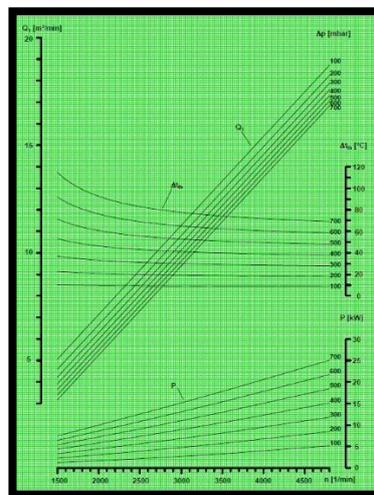


Figura 59: Curvas características del Soplante.

En la Tabla 9 se muestran las dimensiones del equipo y en la Tabla 10 los valores principales del soplante, de los cuales destacar que el caudal de aire proporcionado es de 1000 m³/hora para un consumo del motor de 15,6 kW. Para modificar el caudal proporcionado por el soplante habría que modificar la transmisión entre el rotor principal y motor, la cual es por correa y lo que conllevaría realizar modificaciones en la distribución de ambos elementos dentro del soplante, lo que es una tarea compleja y que puede afectar al funcionamiento de la máquina. Otra opción sería incorporar un variador de frecuencia para el rotor, y así controlar las revoluciones de este, y, por lo tanto, las revoluciones del motor y el caudal suministrado. Esta opción se tendrá en cuenta si se necesita tener, en un futuro, caudales específicos de aire.

Dimensiones	Unidades	Valor
Anchura	m	1,250
Profundidad	m	1,350
Altura	m	1,500
Peso	kg	511

Tabla 10: Dimensiones del Soplante.

Medio	Unidades	Valores Mínimos	Valores Máximos
Caudal de aspiración	m ³ /min	3,59	16,7
Caudal de aspiración	m ³ /hora	216	1001
Presión de aspiración(abs)	bar	1,013	1,013
Presión de impulsión(abs)	bar	1,413	1,413
Presión diferencial	mbar	400	400
Rev. del rotor principal	rpm	1419	4606
Potencia absorbida	kW	4,14	15,6
Velocidad del motor	rpm	887	2879
Potencia del motor	kW	22	22
Frecuencia	Hz	15	48,7

Tabla 11: Datos de servicio de funcionamiento.

Finalmente, volver a mencionar los valores suministrados por la máquina en su configuración actual:

- Caudal: 1000 m³/hora
- Presión máxima en línea: 400 mbar
- Revoluciones del rotor: 4606 rpm
- Potencia absorbida: 15,6 kW

7.2 Línea de Alimentación:

Se denomina Línea de Alimentación a todos los componentes que unen la salida del soplante con la entrada de los colectores de soplado, dichos componentes son tuberías, divisores de flujo y los propios sensores de medida.

La línea de alimentación está dividida en tres tramos:

1. Primer tramo:

Compuesta por una única tubería de sección 125mm y un transductor para conocer el valor de la presión a la salida del soplante.

2. Segundo tramo:

En este tramo el flujo de aire se bifurca mediante un divisor de caudal hacia dos tuberías de sección 75mm, en las cuales se encuentra un medidor de caudal másico con display para visualizar el caudal de aire.

3. Tercer tramo:

Finalmente, los dos flujos de aire son nuevamente divididos por un divisor de caudal para obtener 4 salidas de aire, las cuales se conectan mediante tubo flexible a las entradas de los colectores, en los cuales se incorporará un sensor de presión.

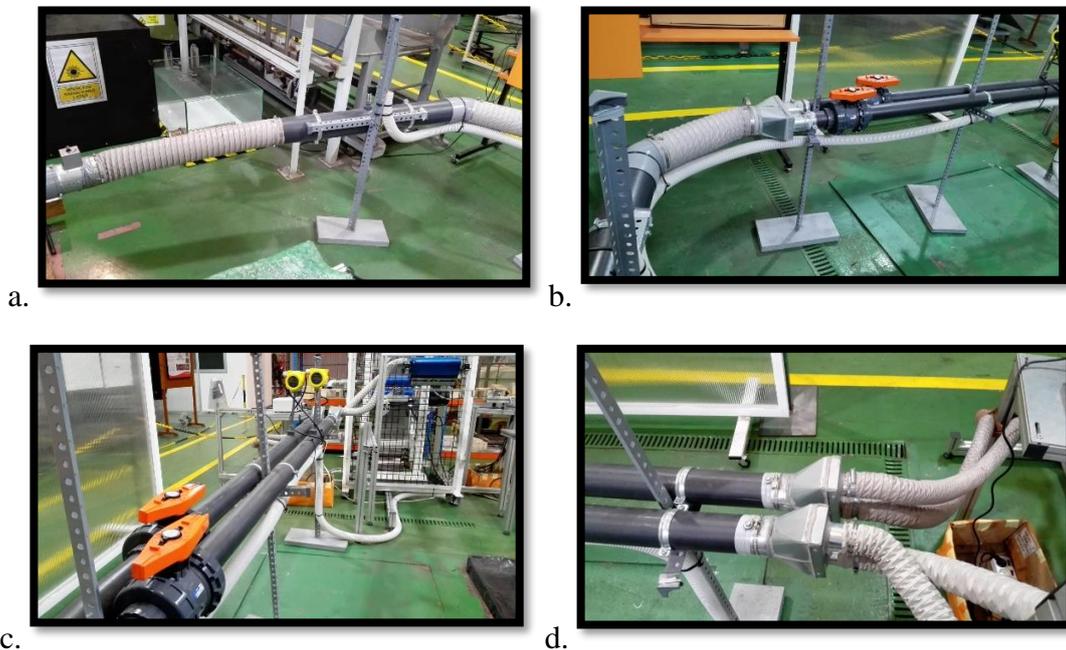


Figura 60: Tramos de la Línea de Alimentación.

1. Sensor de Presión Manométrica:

Con estos sensores se monitorizará la presión en la salida del soplante como en cada colector, se empleará un Arduino para ir mostrando por pantalla la presión en cada instante de tiempo.



Figura 61: Sensor de Presión Manométrica.

Atributo	Valor
Lectura de Presión Mínima	0 bar
Lectura de Presión Máxima	1 bar
Tipo de salida	Tensión
Salida Analógica	0-5V
Tensión de Alimentación	9-32V dc
Conexión eléctrica	Conector DIN 43650
Temperatura de funcionamiento máxima	+135°C

Tabla 12: Atributos del sensor de presión.

2. Medidor de caudal másico:

Como se ha mencionado anteriormente, en el segundo tramo de la Línea de Alimentación se ha incorporado un caudalímetro por tubería, para conocer el flujo en cada instante.

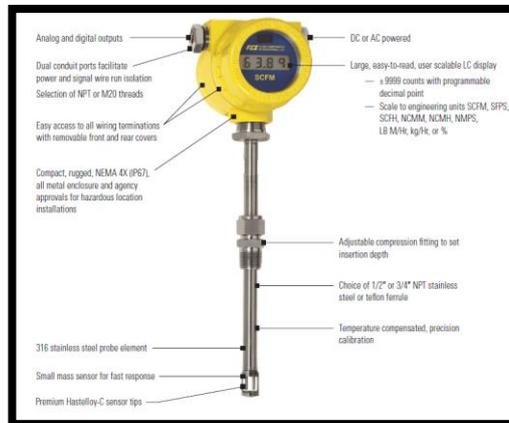


Figura 62: Medidor de caudal másico.

Atributo	Valor
Lectura de Caudal Mínimo	0,75 SFPS
Lectura de Caudal Máxima	400 SFPS
Tipo de salida	Corriente
Salida Analógica	4-20mA
Tensión de Alimentación	18-36V dc
Temperatura de funcionamiento máxima	+121°C

Tabla 13: Atributos del medidor de caudal.

7.3 Sistema Calefactor:

Como se ha mencionado, se precisa de calentar el aire expulsado por las cuchillas para poder este ser visualizado a través del Sistema Schlieren, ya que los gradientes de densidad en un fluido se producen por cambios de temperatura o de presión. Para ello se empleará resistencias eléctricas como la de la Figura 63, las cuales se incorporarán en los orificios de entrada de las cuchillas, para evitar pérdidas de temperatura con el entorno.

El objetivo de estas resistencias no es aportar un caudal de aire a una temperatura dada permanentemente, sino aumentar la temperatura del caudal durante un breve periodo de tiempo suficiente para captar una secuencia de imágenes Schlieren para su posterior procesamiento, con este planteamiento se logra el empleo de un número bajo de resistencias y facilitar el montaje en las cuchillas, además del ahorro económico que supone.



Figura 63: Resistencia eléctrica conformada circular.

Para el cálculo de la potencia térmica, o la potencia eléctrica de la resistencia para calentar un caudal de aire se emplea la Ecuación 16, donde:

$$W_{res} = \rho_{aire} \cdot c_{paire} \cdot Q \cdot (T_{final} - T_{inicial}) \quad \text{Ecuación (16)}$$

- $W_{res} [KW]$: es la potencia eléctrica de la resistencia para calentar un caudal.
- $\rho_{aire} [\frac{kg}{m^3}]$: es la densidad del aire a la temperatura de compresión.
- $c_{paire} [\frac{KJ}{kg \cdot C^{\circ}}]$: es el calor específico del aire a presión.
- $Q [\frac{m^3}{s}]$: es el caudal de aire a calentar.
- $T_{final} - T_{inicial} [C^{\circ}]$: es el incremento de temperatura, de la temperatura del aire al salir del soplante hasta la temperatura alcanzada al atravesar las resistencias.

En la Tabla 14 se recoge los cálculos de los caudales posibles a calentar según el valor de la potencia de la resistencia eléctrica a aplicar.

Dato de entrada: Potencia Calorífica, Temp.Final -Dato de salida: Caudal									
QSop. [m3/h]	Qcuch. [m3/h]	Qcuch. [m3/s]	Calor esp. Aire [KJ/kgC]	Densidad Aire [kg/m3]	T.Inicial [C]	Temp. Final[C]	Incr.Temp [C]	Pot.Cal [KW]	Pot.Cal [W]
51,43	12,86	0,004	1	1,2	30	100	70	0,3	300
68,57	17,14	0,005	1	1,2	30	100	70	0,4	400
85,71	21,43	0,006	1	1,2	30	100	70	0,5	500
102,86	25,71	0,007	1	1,2	30	100	70	0,6	600
120,00	30,00	0,008	1	1,2	30	100	70	0,7	700
137,14	34,29	0,010	1	1,2	30	100	70	0,8	800
154,29	38,57	0,011	1	1,2	30	100	70	0,9	900
171,43	42,86	0,012	1	1,2	30	100	70	1	1000

Tabla 14: Cálculo del caudal calentado según la potencia calorífica.

Se necesitaría el uso de un número elevado de resistencias en serie para poder calentar los $100 \frac{m^3}{s}$ que aporta el soplante, por lo que se empleará uno de los dos tramos de alimentación para suministrar el aire a ambas cuchillas mientras el otro estará descargando el resto del caudal al ambiente. Esto explica que en la anterior Tabla el valor del Caudal del soplante sea cuatro veces superior al de la cuchilla.

Caudal Cuchilla → x2 → Caudal Línea de alimentación → x2 → Caudal Soplante

Finalmente, se ha optado por la adquisición de dos resistencias eléctricas de 1KW, una para cada cuchilla. Dichas resistencias tienen las siguientes características:

Atributo	Valor
Potencia	1000W
Tensión	230V
Diámetro interior	25mm
Diámetro exterior	33mm
Longitud sección espiras	175mm
Salida cables	Perpendicular a la sección de las espiras

Tabla 15: Atributos de las resistencias eléctricas.

Las resistencias se acoplarán a las cuchillas mediante componentes de tubería de acero galvanizado de 1^{1/2} pulgadas, dicho sistema se muestra en la Figura 64 y está compuesto por:

- Un tubo de longitud 180mm y diámetro 48,2mm el cual alojará la resistencia en su interior sujeta mediante refractario para evitar que la resistencia esté en contacto con la cara interior del tubo.
- Un acoplador T roscado para sujetar la resistencia y permitir la salida de los cables.
- Dos tubos de longitud 50mm y diámetro 48,2mm para facilitar la unión con las tuberías flexibles de la Línea de alimentación, ambos unidos por un acoplador a 90 grados.



Figura 64: Incorporación de las resistencias a las cuchillas.

8. ANÁLISIS DEL SOPLADO DE LAS CUCHILLAS:

Antes de incorporar las cuchillas a la planta piloto de galvanizado y posteriormente unirlo todo al Sistema Schlieren se debe comprobar el soplado uniforme de estas, para ello se emplea una manta de presiones la cual consta de miles de sensores de presión dentro de un área de trabajo, con este sensor se puede comprobar que el soplado es constante y uniforme a lo largo de toda la salida de las cuchillas.

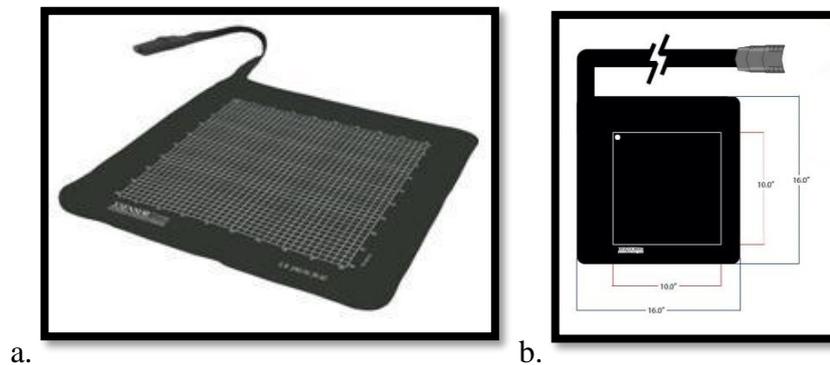


Figura 65: Manta de presiones de Xsensor Technology.

Atributo	Valor
Modelo	LX100:100.100.10
Rango de Presiones	6,89-266,83mbar
Resolución	2,54mm
Precisión	±5% en toda el área sensitiva
Frecuencia de Muestreo	14 frames/s
Área sensitiva	25,4cm x 25,4cm
Área Total	40,7cm x 40,7cm

Tabla 16: Características de la manta de presiones.

Este sensor también puede ser empleado para realizar ensayos de soplado, tanto con distintos tipos de cuchillas y labios hasta la caracterización de boquillas de enfriamiento. Con el sensor, además, se realizará el análisis temporal del soplado, ver si se mantiene la presión en la huella, si aparecen picos o bajadas de presión...etc., en resumen, es la forma de verificar el estado óptimo de los elementos de soplado.

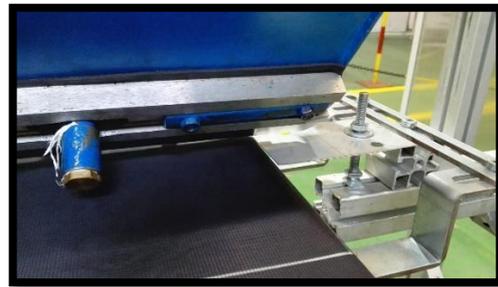
8.1 Montaje y procedimiento:

Se ha montado un pórtico con perfilera de aluminio para permitir incorporar las cuchillas y la propia manta, además se ha incorporado dos varillas roscadas las cuales se unen mediante unas agarraderas metálicas a las cuchillas, para permitir un movimiento en el Eje vertical sencillo y preciso, ya que se probará el soplado a distintas configuraciones de:

- Distancia cuchilla-manta.
- Distancia baffle-manta.
- Variación en la presión de soplado.



a.



b.

Figura 66: Cuchilla y manta de presiones para la verificación del soplado.

Con estos ensayos, además de comprobar el soplado, se puede obtener el valor de las presiones a lo largo de la huella, a la vez del área y de la fuerza ejercida a lo largo del tiempo.

El procedimiento y la duración de los ensayos es la siguiente:

1. Se tara o se realiza un cero en la manta para eliminar todas las presiones residuales que puedan detectar inicialmente los sensores.
2. Se enciende el soplante y se mantiene durante 25 segundos.
3. Transcurrido ese tiempo se apaga el soplante y se sigue grabando para captar la bajada de presión en la huella.
4. Finalizado el ensayo se guarda el archivo de la simulación y se extrae los datos de los sensores en todos los frames en un archivo .txt. Dichos archivos serán posteriormente procesados mediante Matlab.

La necesidad de realizar un programa externo surge a que, hasta ahora, el análisis de las huellas se hacía en un solo frame seleccionado de forma visual, y su posterior obtención de la presión media mediante una herramienta del software de la manta, esto no aportaba un análisis cuantitativo de la huella en un periodo de tiempo, por lo que para agilizar y facilitar el procesamiento de los datos se ha decidido realizar esta tarea mediante Matlab.

Sin mencionar el tiempo necesario para analizar de forma manual un solo frame, siendo este excesivo y haciendo imposible la tarea de analizar una gran cantidad de ensayos.

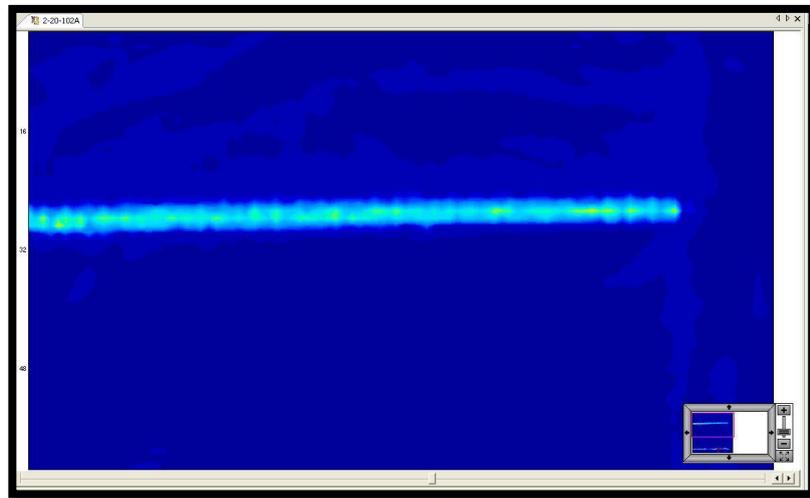


Figura 67: Huella total obtenida mediante el software de la manta.

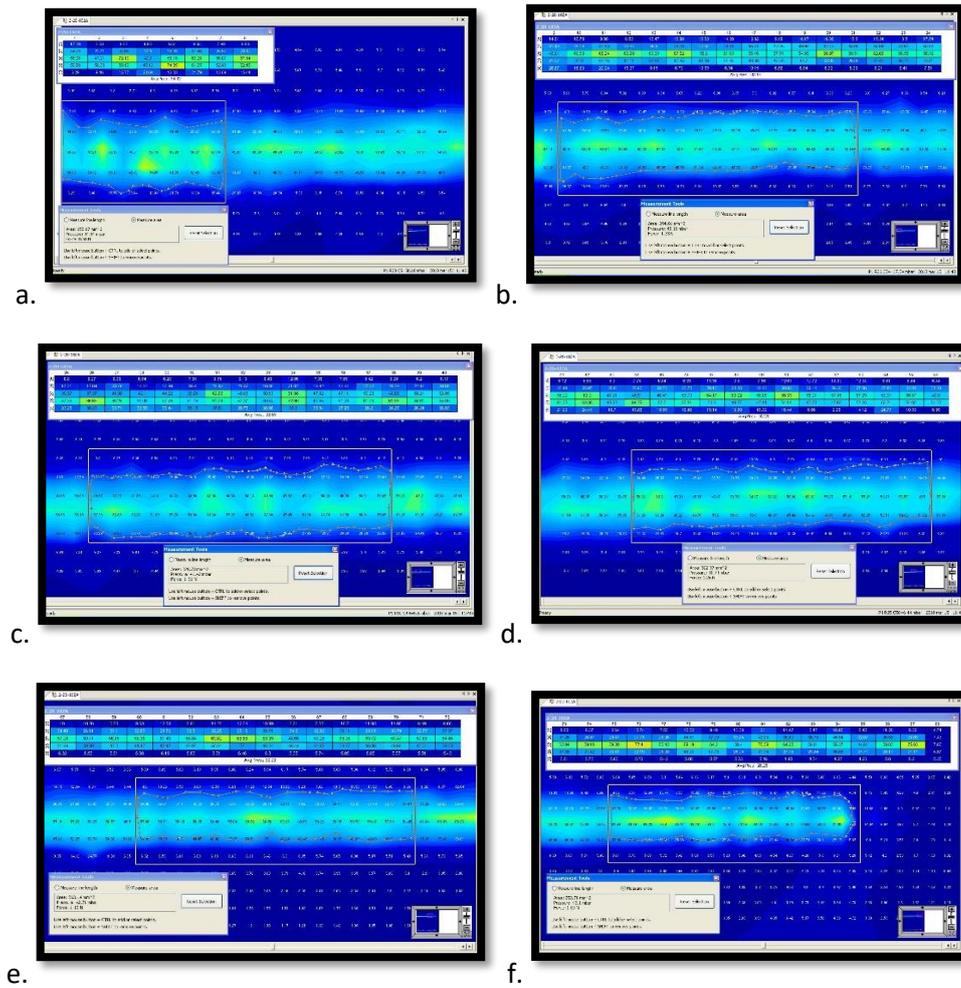


Figura 68: Análisis manual por secciones de la huella.

8.2 Procesamiento de los datos:

Se ha realizado el procesamiento mediante la herramienta Matlab, dicho programa está compuesto por diferentes scripts, donde cada uno tiene una funcionalidad u objetivo preciso. El programa está compuesto por 4 scripts y dos funciones auxiliares y en la Figura 69 se muestra la metodología que se sigue, desde la exportación de los datos desde el software de la manta hasta la obtención de resultados.

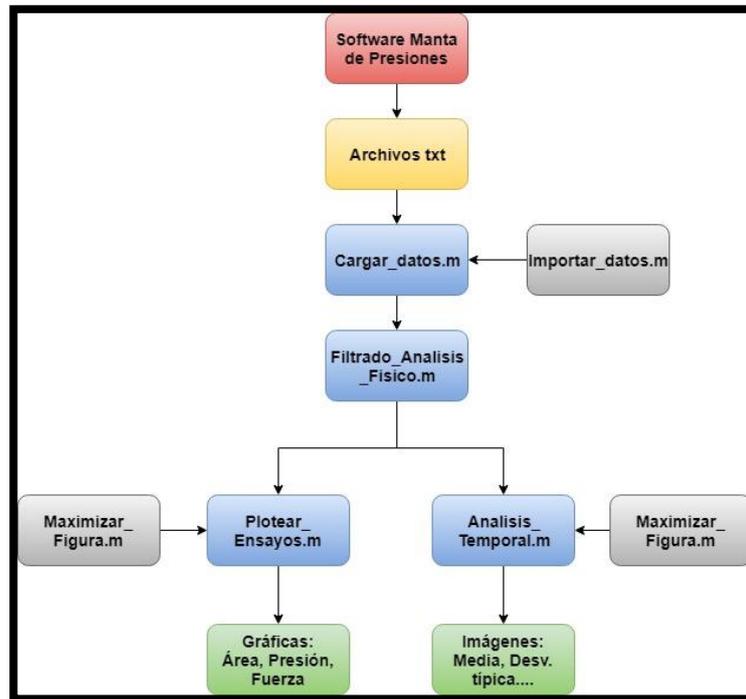


Figura 69: Diagrama General del programa de tratamiento de datos.

El objetivo de este programa es el análisis de todos los frames de cada ensayo y la comparación automática entre ellos, por ejemplo, se podrá conocer la evolución del área, la presión y la fuerza producida por las cuchillas en el tiempo, comparación entre distintas configuraciones de distancia banda-cuchilla-presión de soplado, verificación del estado de las cuchillas para detectar imperfecciones en los labios de soplado....etc.

La posibilidad de analizar todas las muestras y en todos los instantes de tiempo era una tarea imposible a realizar manualmente, por lo que contando con un programa que analice todas las muestras se puede realizar investigaciones y experimentos en cortos periodos de tiempo.

Sin mencionar que al estar realizado con Matlab, el programa es modular y se le puede ir incorporando en el futuro diferentes scripts para realizar diferentes tareas según las necesidades de cada experimento, por lo que se posee una gran versatilidad y flexibilidad.

8.2.1 Cargar datos.m:

En este primer script el objetivo es la importación de todos los datos del txt,, posteriormente se realiza un procesado para eliminar filas de cabecera para obtener solo los datos de todos los sensores en frames separados.

Las variables de salida de este script son un fichero con los nombres de cada ensayo y otro con todos los datos de los sensores por frames.

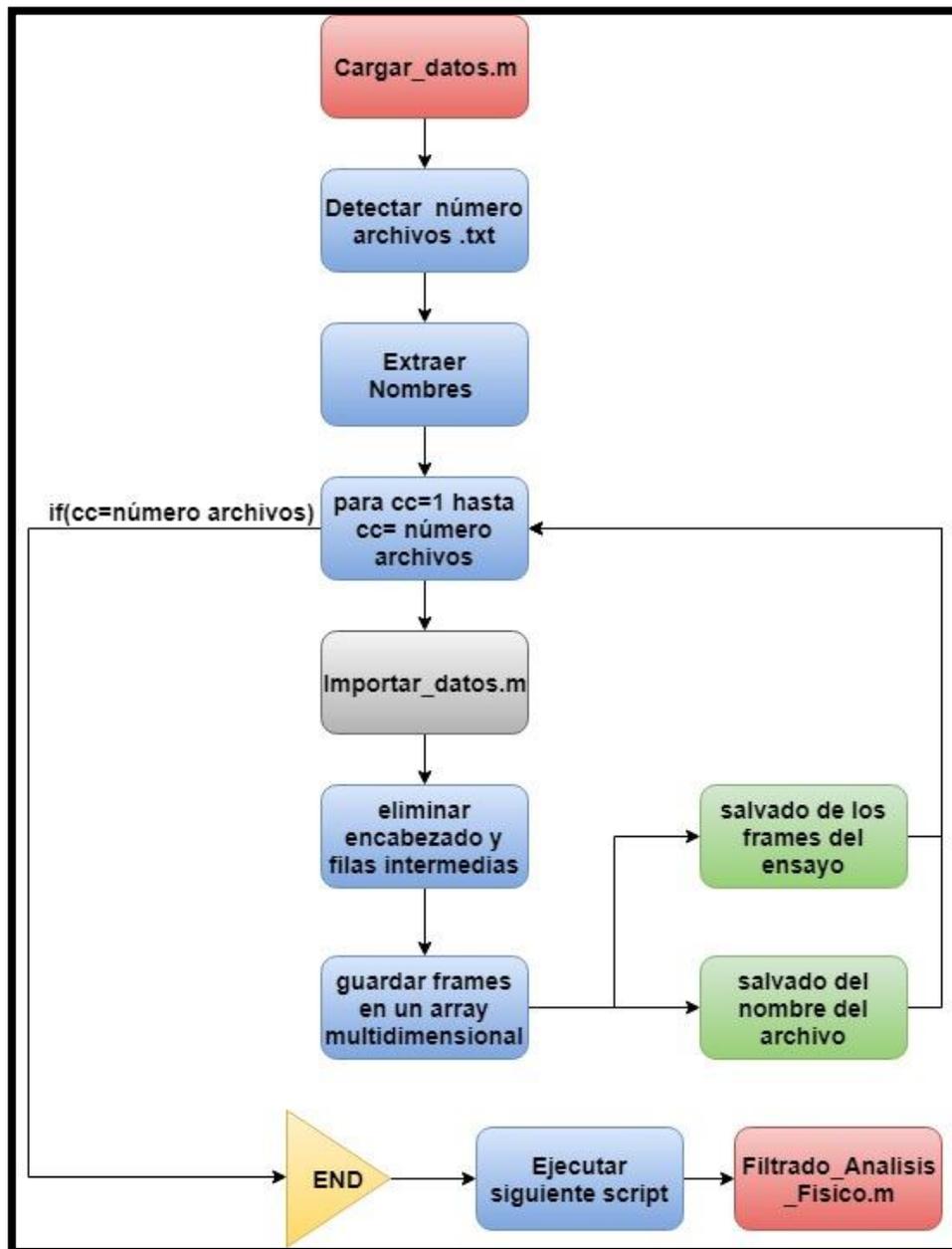


Figura 70: Diagrama del script Cargar_datos.m.

8.2.2 Filtrado Analisis Fisico.m:

A continuación, se carga los frames de cada ensayo y se realiza su filtrado. Se empieza por detectar la huella y posteriormente se calcula el área, presión y fuerza de esta. Posteriormente se analiza toda la muestra y se selecciona la parte estacionaria del ensayo para realizar el cálculo de la media, desviación típica...etc. Finalmente se guardan todas las variables de los ensayos para su posterior ploteo.

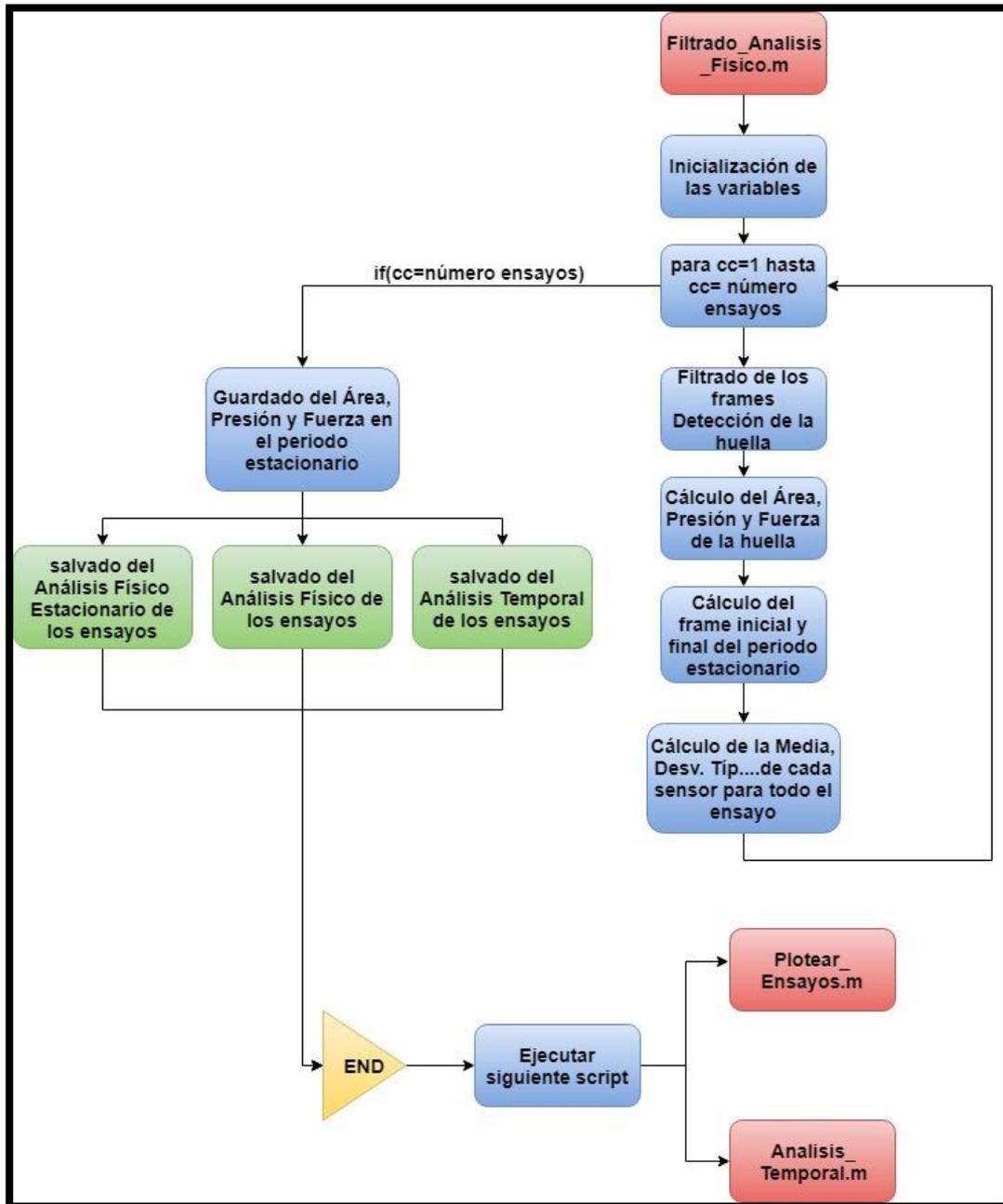


Figura 71: Diagrama del script Filtrado_Analisis_Fisico.m.

8.2.3 Plotear Ensayos.m:

Este script se encarga de cargar los datos del área, presión y fuerza de cada ensayo y realizar su plotado en una misma imagen para su comparación.

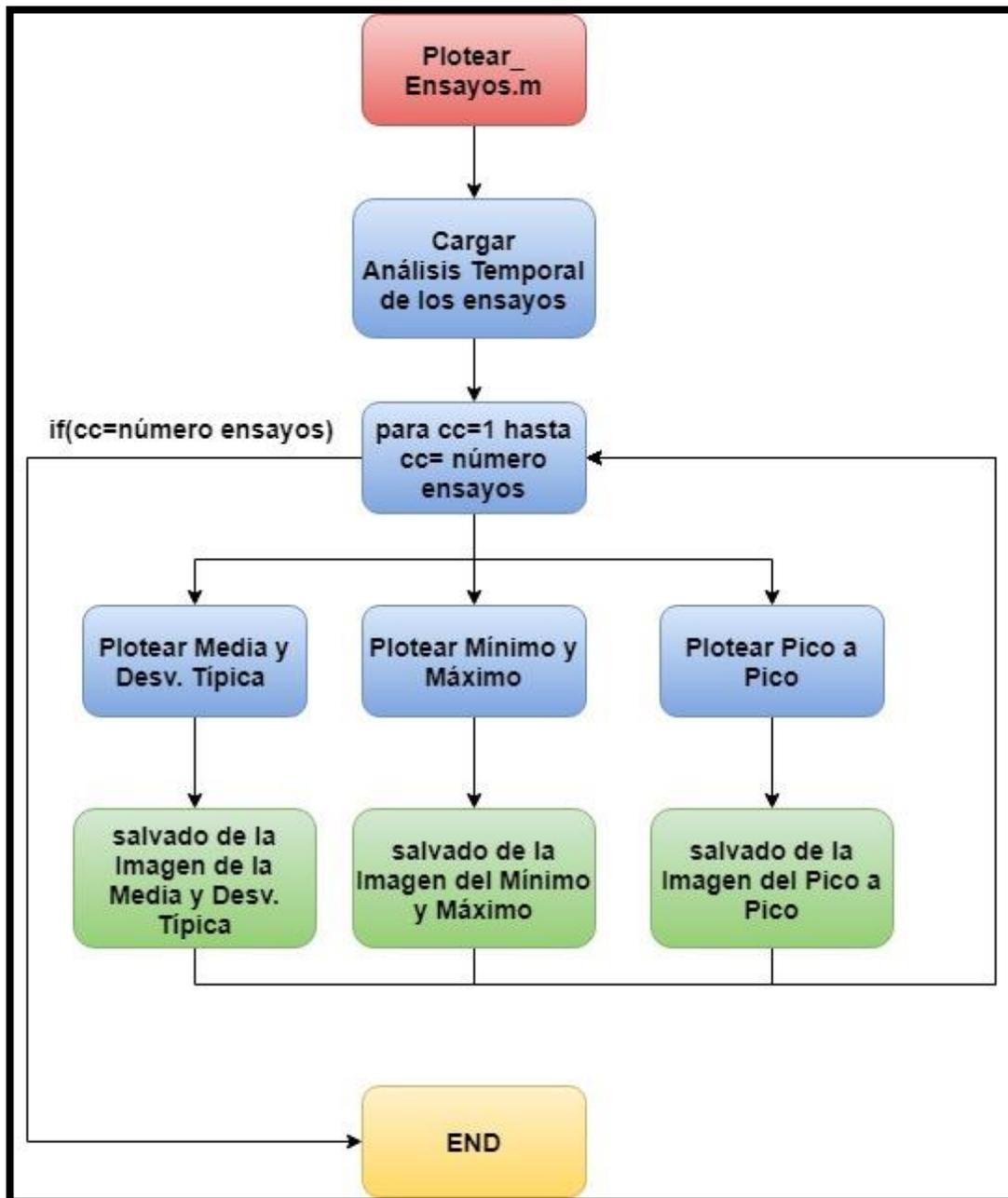


Figura 72: Diagrama del script Plotear_Ensayos.m.

8.2.4 *Analisis Temporal.m:*

Finalmente, con este script se cargan los datos de la parte estacionaria de los ensayos y se realiza su ploteado.

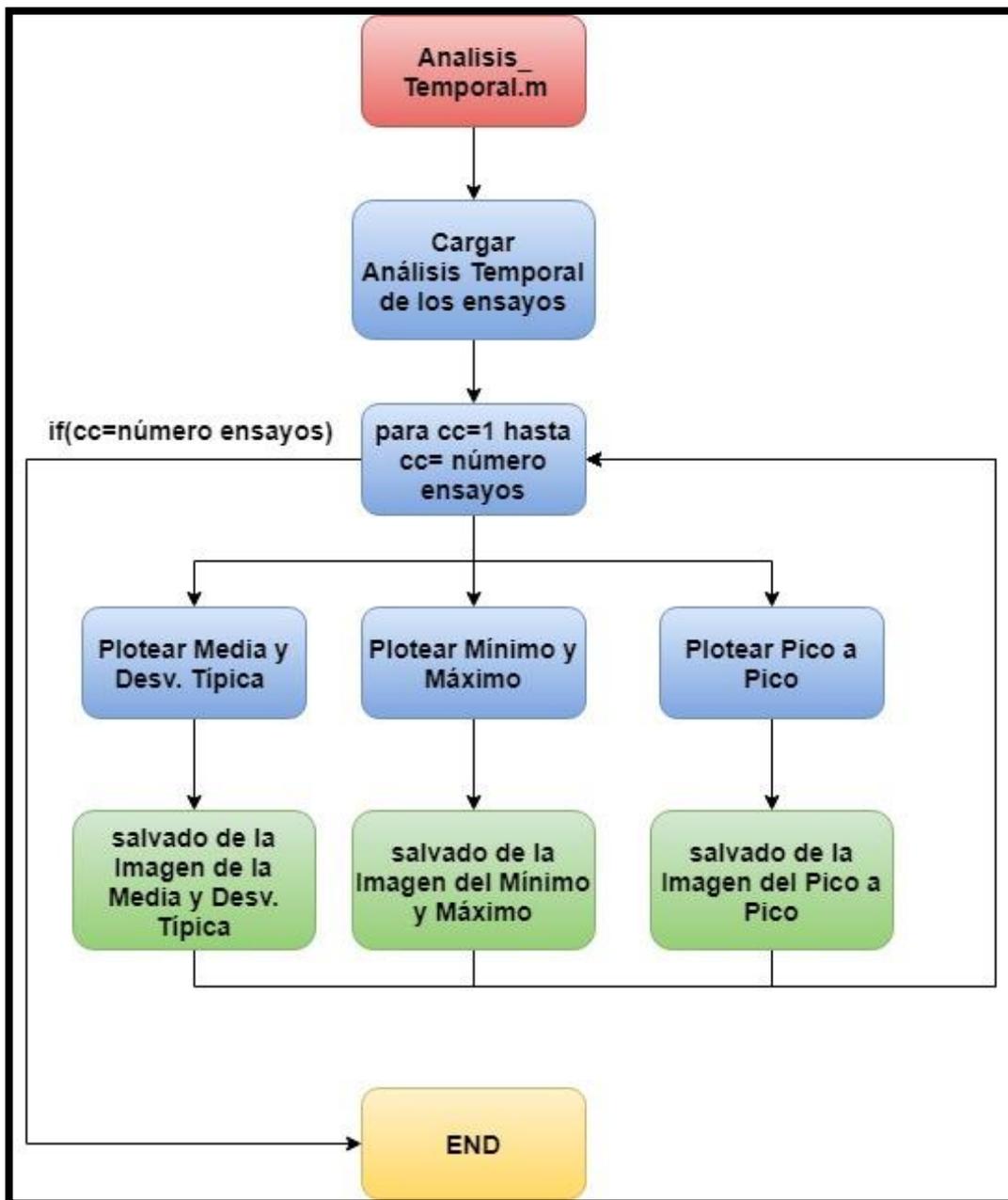


Figura 73: Diagrama del script Analisis_Temporal.m.

8.2.5 Muestra de Resultados:

Finalmente, se muestra los resultados de la verificación del estado de las cuchillas y la comparación de ambos sopladors. Dicho análisis se ha realizado con unos parámetros constantes, los cuales son los siguientes:

Nomenclatura empleada: X-Y-Z-CuchillaV

- X: es la distancia en mm del baffle a la banda o manta, en este caso es 5mm.
- Y: es la distancia en mm de la cuchilla a la banda o manta, en este caso es 22mm.
- Z: es la presión en mbar en la cuchilla a analizar, en este caso es 110 mbar.

Como se puede observar en las Figuras 74, 75 y 76, tanto el área como la presión y la fuerza de la huella producida por cada cuchilla es semejante, por lo que el soplado de ambas cuchillas en las mismas condiciones es equivalente.

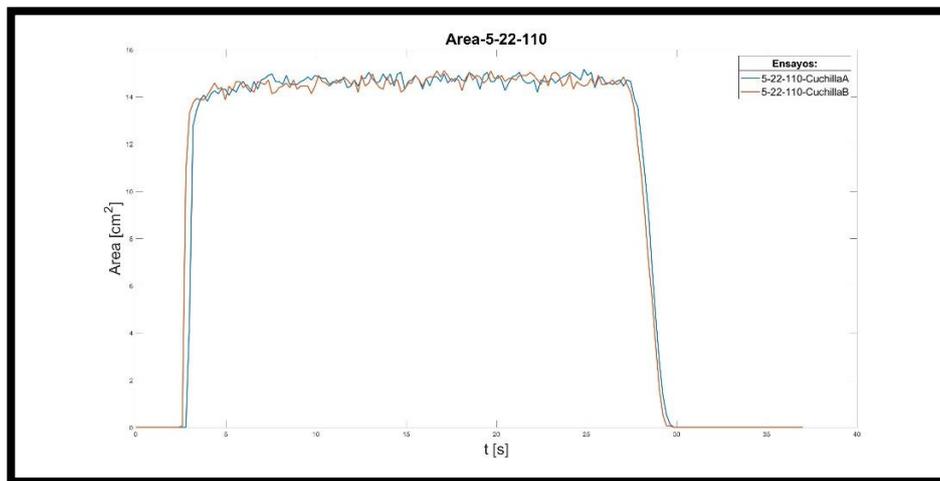


Figura 74: Gráfica del área de la huella producida por cada cuchilla.

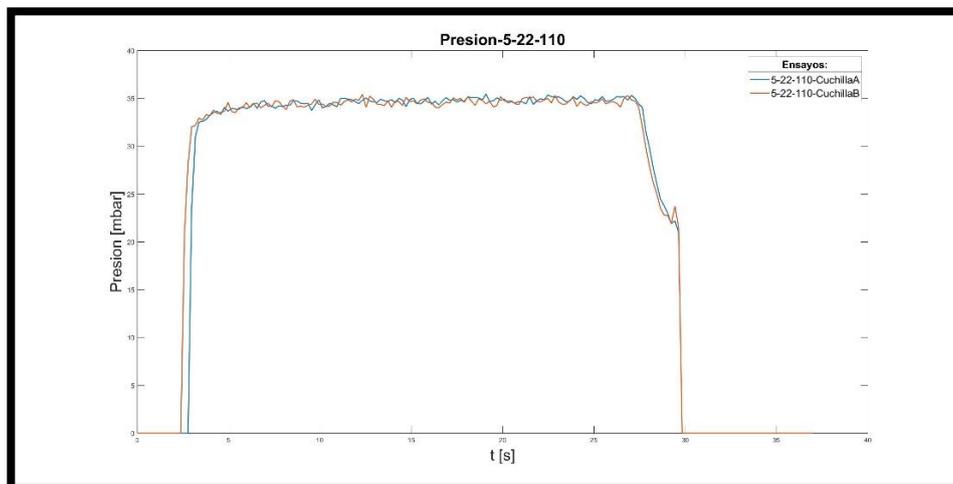


Figura 75: Gráfica de la presión de la huella producida por cada cuchilla.

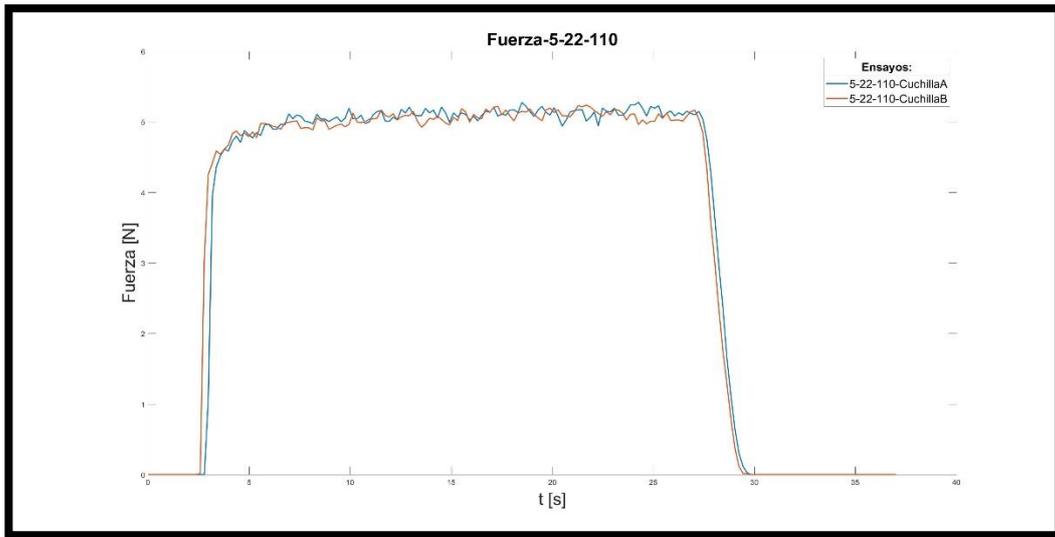


Figura 76: Gráfica de la fuerza de la huella producida por cada cuchilla.

El análisis temporal de ambos ensayos muestra un valor de soplado constante en todos los sensores de la huella, un indicador de este resultado es la Desviación típica de la Media, siendo la máxima desviación de 3,5mbar, un valor bajo y admisible. En la Figura 77 y 78 se muestra la Media y la Desviación típica para el tramo estacionario de los ensayos.

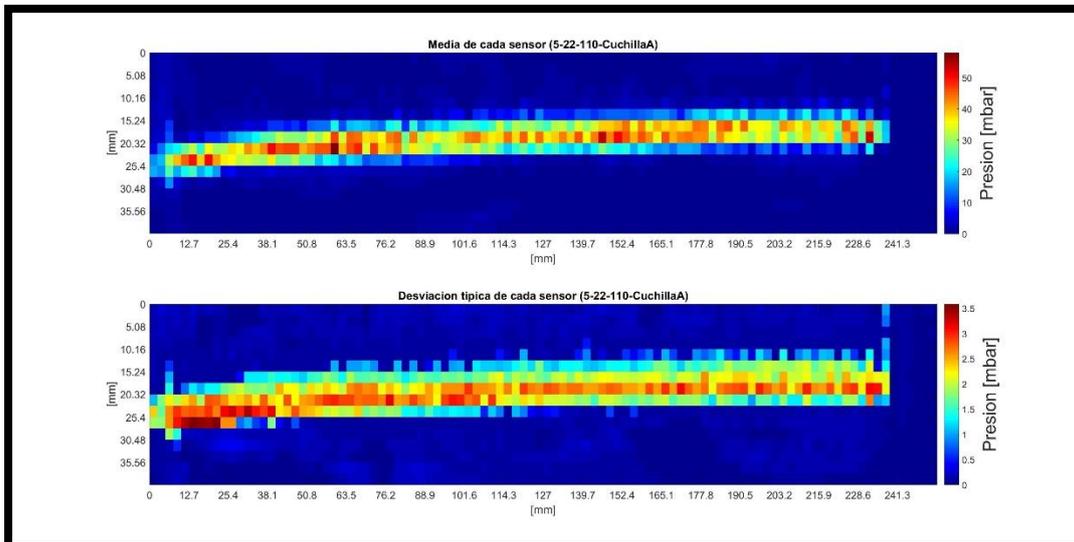


Figura 77: Media y Desviación típica, ensayo con la Cuchilla A.

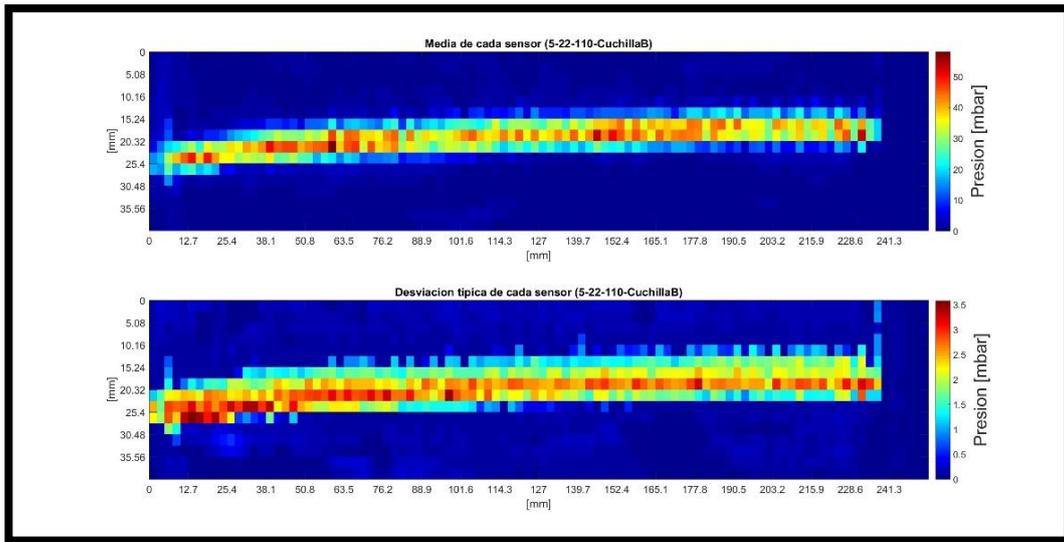


Figura 78: Media y Desviación típica, ensayo con la Cuchilla B.

Finalmente, en la Figura 79 se muestra el ploteo de la resta de la Media de la Cuchilla A con la Media de la Cuchilla B, siendo la máxima diferencia entre valores de los sensores 2,3 mbar, por lo que en conclusión se puede afirmar que ambas cuchillas tienen un comportamiento similar en soplado para las mismas condiciones.

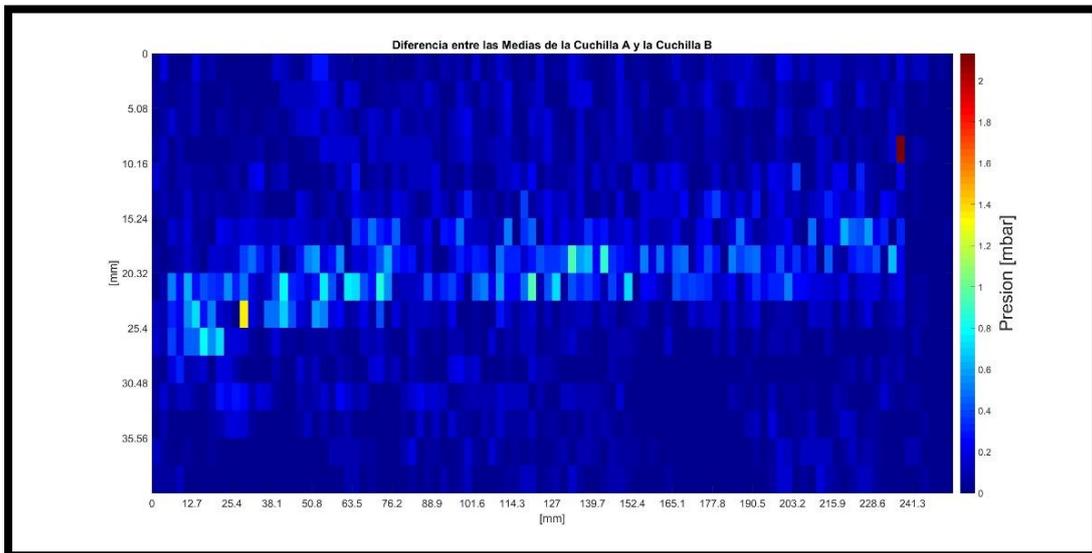


Figura 79: Diferencia entre las Medias de los ensayos de las Cuchillas.

9. INCORPORACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE GALVANIZADO:

9.1 Montaje del Sistema Schlieren con la Planta Piloto:

Una vez analizado el soplado de ambas cuchillas, se procede a incorporar la Planta Piloto de Galvanizado en el Sistema Schlieren, dicha Planta consta de un circuito cerrado de rodillos por el cual circula una banda metálica, accionada por un motor y regulada su velocidad mediante un variador de frecuencia. Se ha posicionado la Planta entre los dos espejos del Sistema Schlieren, por lo que se ha tenido que retirar el anterior pórtico donde iban acopladas las cuchillas, aparte de realizar pequeñas variaciones en la estructura soporte para poder enlazar el Sistema con la Planta Piloto.

En la Figura 80 se puede apreciar el Sistema en conjunto, mientras que en la Figura 81 se muestra una vista en detalle de las cuchillas de soplado desde ambos lados del Sistema.



a.



b.

Figura 80: Vistas de la Planta Piloto de Galvanizado con el Sistema Schlieren.

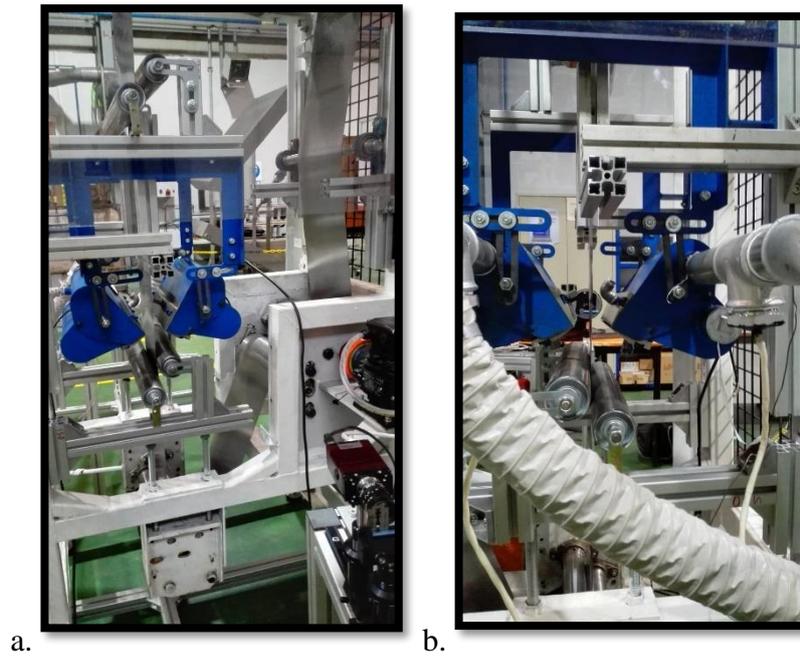


Figura 81: Detalle de las Cuchillas en el Sistema.

Se ha incorporado 4 rodillos guía para asegurar que la banda pase paralela a las dos cuchillas y no se produzcan choques entre elementos, lo que podría desencadenar en la rotura de la banda y de los labios de los soplantes, aparte de ser un riesgo para la seguridad. Dichos rodillos se pueden observar en la Figura 82 a y b. Además, se ha integrado un rodillo extra para aplicar tensión a la banda y facilitar su posicionamiento dentro del circuito cerrado de rodillos, Figura 82 c.

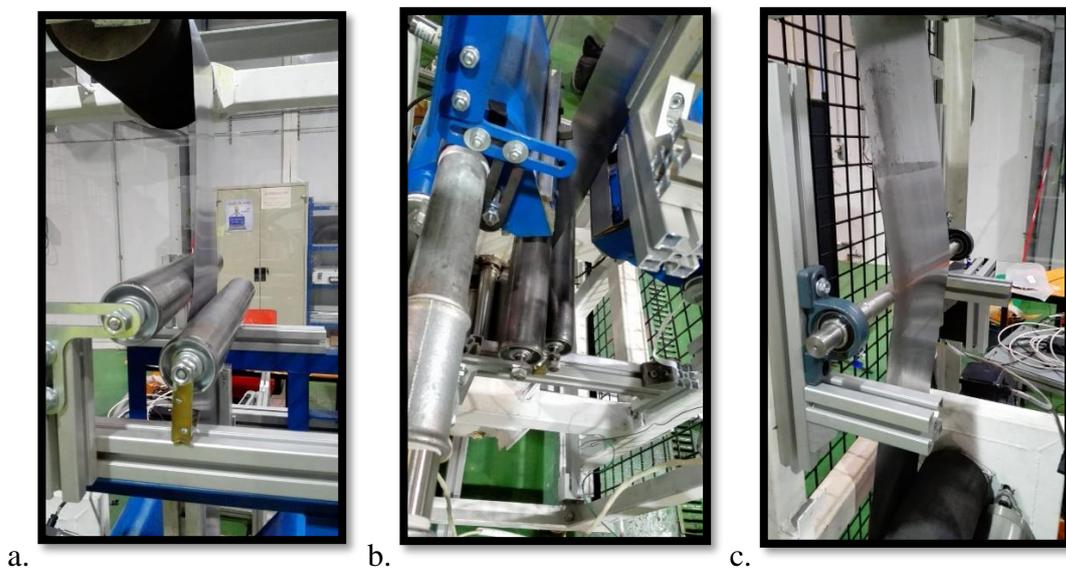


Figura 82: Rodillos guía y rodillo tensor para la banda.

Una vez incorporada la Planta al Sistema se procede a mapear la velocidad de la banda con la frecuencia de trabajo del motor, para ello se han realizado varios ensayos aplicando a la banda diferentes frecuencias mediante el variador y midiendo la velocidad de la banda con un sensor láser, el cual se adquirió de la compañía Proton InteliSENS SLR. En la Figura 83 se puede ver la relación lineal entre la velocidad de la banda y la frecuencia del motor que se ha obtenido en los experimentos.

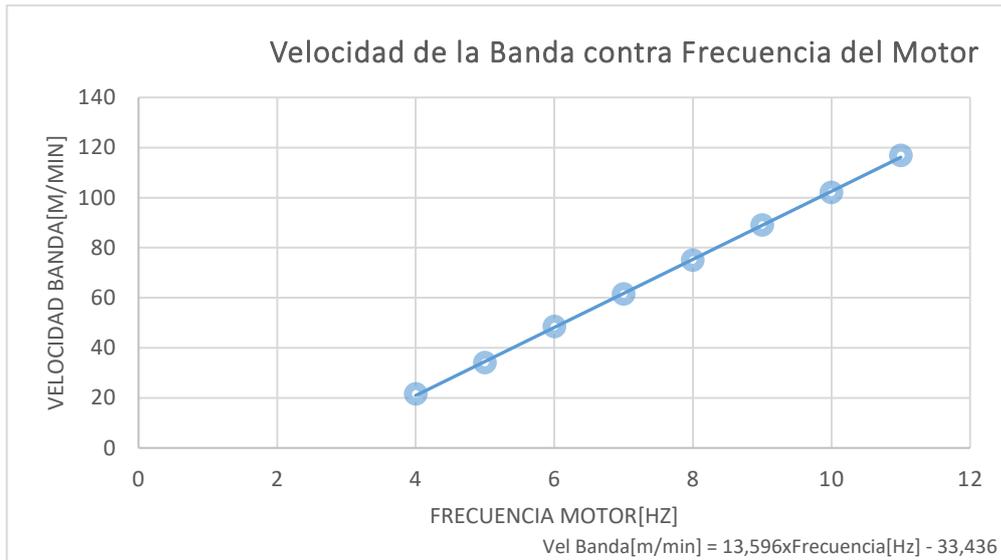


Figura 83: Relación de la velocidad de la banda con la frecuencia del motor.

Finalmente, y con estas medidas como referencia se ha montado un tacómetro digital fijo en el eje del rodillo motriz para monitorizar y comprobar en cada momento de los experimentos la velocidad de la banda.

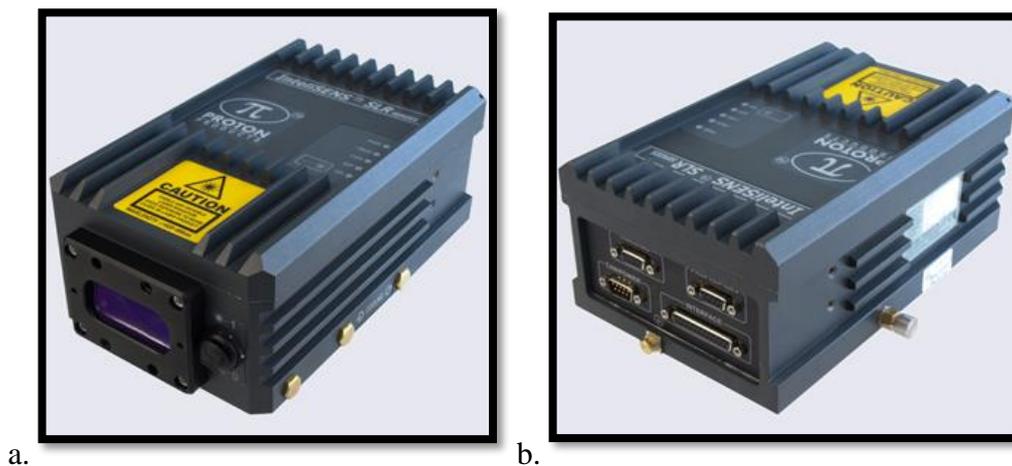


Figura 84: Laser de la compañía Proton InteliSENS SLR.

9.2 Procedimiento de los ensayos:

Una vez incorporado el Sistema Schlieren y las cuchillas en la Planta Piloto de galvanizado se procede a realizar ensayos para la visualización del flujo de aire expulsado por las cuchillas, se realizará un análisis cuantitativo sobre el desarrollo y el soplado óptimo, y además, se comprobará la influencia de la banda en movimiento sobre el soplado, para comprobar si se produce arrastre sobre el flujo.

Para la realización de los ensayos se procederá realizando los siguientes pasos:

- 1- Conexión y alimentación de la Planta Piloto, motor, sensores y Sistema Schlieren.
- 2- Posicionamiento de las cuchillas a una distancia prefijada de la banda.
- 3- Calibrado del Sistema Schlieren.
- 4- Encendido de las resistencias eléctricas hasta alcanzar 150°C el interior de los tubos que las albergan.
- 5- Cuando las resistencias alcancen los 150°C se procederá a activar el motor motriz de la Planta Piloto para poner en movimiento la banda.
- 6- Cuando las resistencias alcancen los 200°C se encenderá el soplante.
- 7- Simultáneamente se activará la captación de imágenes de la cámara del Sistema Schlieren.
- 8- Una vez transcurrido un periodo de 30 segundos se parará la captación de imágenes, el movimiento de la banda y las resistencias eléctricas.
- 9- Cuando las resistencias alcancen los 35°C se apagará el soplante.

Los parámetros de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 17:

N.º Ensayo	Atributos						
	Vel. Banda [m/min]	Presión Cuchillas[mbar]	Dist. Cuchillas- Banda[mm]	Duración Ensayo[s]	Cámara	Lente	f.p.s
1	0	100	25	30	Prosilica GT 1920C	25mm/F1,4	14
2	50	100	25	30	Prosilica GT 1920C	25mm/F1,4	14
3	100	100	25	30	Prosilica GT 1920C	25mm/F1,4	14

Tabla 17: Parámetros de los ensayos.

9.3 Resultados de los ensayos:

Tras finalizar los diferentes ensayos, se puede obtener como conclusiones que:

- 1- Validación del Sistema Schlieren para el estudio del soplado de las cuchillas y para la verificación del soplado y de su posicionamiento.
- 2- Validación del software para el procesado de los ensayos de verificación del soplado de las cuchillas.
- 3- Validación del equipo de resistencias eléctricas para calentar el caudal de aire proporcionado por el soplante.
- 4- La velocidad de la banda no produce arrastre sobre el soplado, ya que el caudal de aire expulsado es muy elevado y la velocidad de soplado es de un orden superior a la de la banda.
- 5- Se precisa de una cámara con mayor tasa de captación para tener un número elevado de frames por segundo, para poder obtener imágenes del flujo más continuas.

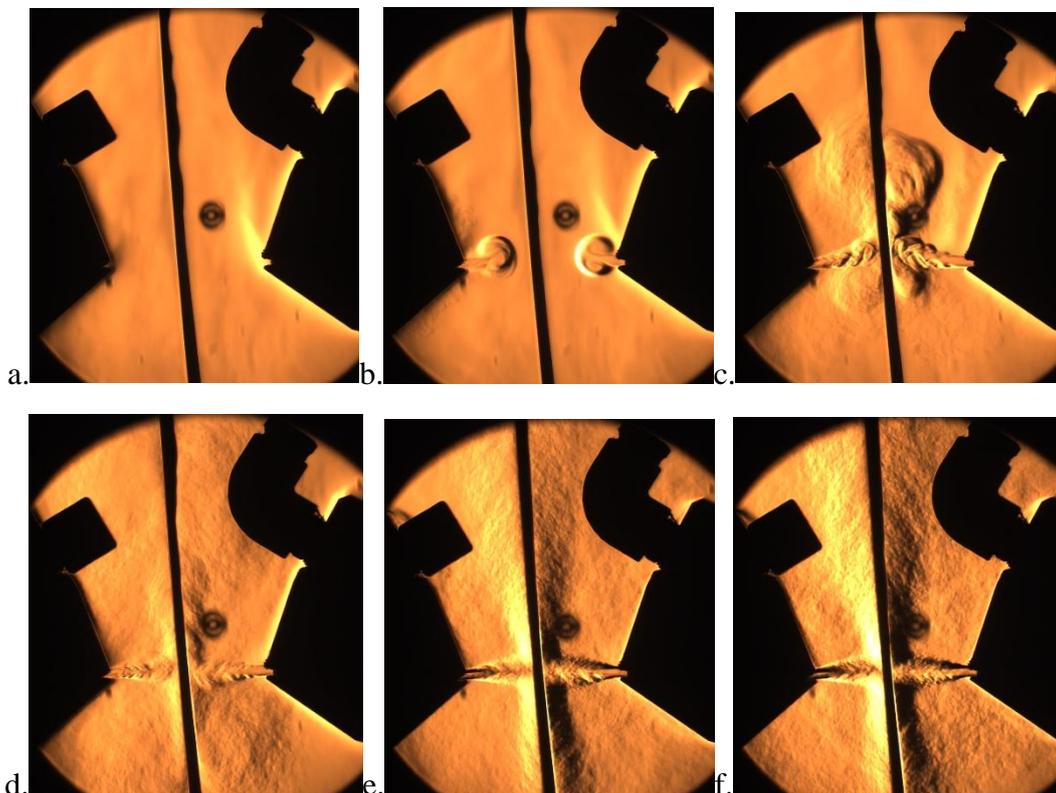


Figura 85: Imágenes Schlieren del desarrollo del soplado de las cuchillas.

10. CONCLUSIONES GENERALES:

10.1 Resultados:

A continuación, se presentan los hitos alcanzados tras la experimentación realizada con el Sistema Schlieren y la Planta Piloto de Galvanizado:

- 1- Validación de la técnica Schlieren en entornos semi-industriales y controlados.
- 2- Validación de la técnica Schlieren para el análisis cualitativo de la fluidodinámica de procesos industriales.
- 3- Validación de la técnica Schlieren como herramienta para la verificación del funcionamiento de elementos de equipos industriales.
- 4- Validación de la técnica Schlieren como herramienta experimental para contrastación de simulaciones CFD de procesos industriales.
- 5- Debido al corto tiempo de calibración del Sistema y de la obtención en tiempo real de las imágenes del flujo, se posibilita la realización de ensayos en los que se realicen modificaciones en los parámetros característicos de los procesos para analizar su influencia directa sobre la fluidodinámica. Esta capacidad reduce el número de simulaciones CFD necesarias, lo que conlleva un ahorro económico y temporal muy elevado.

10.2 Futuras Líneas de Investigación:

- 1- Experimentación con la técnica Schlieren y sus diferentes montajes en diferentes proyectos, procesos y entornos fuera de laboratorio.
- 2- Incorporación del Sistema Schlieren en procesos industriales reales.
- 3- Realización de un Sistema Schlieren con un único espejo, para facilitar la incorporación en procesos industriales en donde el espacio sea reducido.
- 4- Estudio y realización de una herramienta informática para el análisis cuantitativo de las imágenes Schlieren.
- 5- Desarrollo del Know-How de la técnica Schlieren y del estudio de la fluidodinámica para asistir diferentes proyectos industriales.

11. PRESUPUESTO:

A continuación, se mostrará el coste de todos los elementos que forman el Sistema:

- **Estructura Base y Pórtico:**

Producto	Número del Producto	Longitud(mm)	Cantidad	Total (mm)	Precio/Un.	Importe Total
Soporte Principal	N0165	700	4	2800	8,84 €	24,75 €
Viga Principal	N0165	650	2	1300	8,84 €	11,49 €
Viga Rótula	N0165	750	2	1500	8,84 €	13,26 €
Viga para mesa de trabajo	N0165	400	6	2400	8,84 €	21,22 €
Pata mesa de trabajo	N0165	800	2	1600	8,84 €	14,14 €
Viga principal soporte	N0165	3500	1	3500	8,84 €	30,94 €
Vigueta soporte	N0165	500	4	2000	8,84 €	17,68 €
Pata soporte	N0165	100	6	600	8,84 €	5,30 €
Vigueta Pórtico	N0165	1000	2	2000	8,84 €	17,68 €
Columna Pórtico	N0165	1200	2	2400	8,84 €	21,22 €
Vigueta Superior Pórtico	N0165	600	1	600	8,84 €	5,30 €
Total				20700		
Perfil Estándar	N0165	6000	4	24000		
Sobrante				3300		
Perfil sobrante	N0165	1000	3	3000	8,84 €	26,52 €
Perfil sobrante	N0165	300	1	300	8,84 €	2,65 €
Sobrante				0		
Corte Hasta 55	N4210	-	36	-	1,31 €	47,16 €
Número Total de Barras			36			
Producto	Número del Producto	Cantidad	Plus	Total	Precio/Un.	Importe Total
Pie Regulable	N1205	8	2	10	2,68 €	26,80 €
Articulación 45x45 Dinámica	N1127	2	0	2	17,55 €	35,10 €
Placa Anti-rotación	N1129	2	0	2	1,69 €	3,38 €
Escuadra con 2 talones 40 x 25	N1102	48	7	55	3,31 €	182,05 €
Tornillo CHC M8 x 20 cabeza baja	N 3135	100	20	120	0,11 €	13,20 €
Tuerca M8 SC	N 3310	100	20	120	0,14 €	16,80 €
Tapa Plástico Perfil 45x45 ESP.2,5	N1705	20	0	20	0,52 €	10,40 €
EMBALAJE	M0000	-	-	-	20,00 €	20,00 €
TRANSPORTE	M0001	-	-	-	75,00 €	75,00 €
Importe Total BRUTO						642,05 €
IVA						21,00%
Importe Total OFERTA IVA incl.						776,88 €

Tabla 18: Presupuesto de la Estructura Base y del Pórtico.

- **Óptica:**

Producto	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total
Espejo Parabólico diámetro=6'', f=900mm	3	181,00 €	543,00 €
Tapa Protectora Espejo	3	8,00 €	24,00 €
Mont. de Gran Apertura d.óptica=6''	2	266,00 €	532,00 €
Carril óptico Aluminio Longitud=600mm	2	105,00 €	210,00 €
Carro óptico Aluminio Longitud=50mm	4	20,00 €	80,00 €
Soporte Regulable	2	49,00 €	98,00 €
Soporte Poste de Montaje Longitud=50mm	6	14,00 €	84,00 €
Poste de Montaje Longitud= 50mm	6	5,50 €	33,00 €
Adaptador de rosca M6-M6	10	1,50 €	15,00 €
Adaptador de rosca M4-M4	4	1,50 €	6,00 €
Agarre variable para cuchilla	1	53,00 €	53,00 €
Plataforma de traslación de aluminio	1	191,00 €	191,00 €
Tornillos M6x20-M4x15	25	0,16 €	4,00 €
Gastos de Envío	1	50,00 €	50,00 €
Láser 50mw	1	68,90 €	68,90 €
Adaptador de rosca M6-M8	5	4,00 €	20,00 €
Gastos de Envío	1	26,00 €	26,00 €
Importe Total con IVA			2.037,90 €

Tabla 19: Presupuesto de los Elementos Ópticos.

- **Placas de Sujeción:**

Producto	Suministrador	Material	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total
Chapa L 100x100x4mm	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	6	1,37 €	8,22 €
Chapa I 230x30x4mm	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	6	1,43 €	8,58 €
Chapa U 212x30x4mm	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	4	7,91 €	31,64 €
Chapa I 100x30x4mm	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	10	0,70 €	7,00 €
Chapa Rect 320x400x2mm	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	1	4,40 €	4,40 €
Chapa Rect 395x440x4	LASER GALIA S.L.	Acero Galvanizado	2	12,69 €	25,38 €
Importe Total BRUTO					85,22 €
IVA			21%		17,90 €
Importe Total con IVA					103,12 €

Tabla 20: Presupuesto de las Placas de Sujeción.

- **Resistencias Eléctricas:**

Producto	Suministrador	Número del Producto	Cantidad	Precio/Unidad	Precio Total
Resistencia eléctrica 1000W	ALOÑA RESISTENCIAS TERMOELÉCTRICAS	-	2	156,76 €	313,52 €
Importe total BRUTO					313,52 €
IVA			21%		65,84 €
Total					379,36 €

Tabla 21: Presupuesto de las resistencias eléctricas.

- **Total Sistema:**

Categoría	Importe
Óptica	2.037,90 €
Estructura	776,88 €
Resistencias Eléctricas	379,36 €
Placas	103,12 €
TOTAL	3.297,26 €

Tabla 22: Presupuesto Total del Sistema

Como se puede observar en la Tabla 22, el Coste total del Sistema asciende a:

3.297,26€

Correspondiendo el 62% de dicho coste a los elementos ópticos que forman el Montaje Schlieren, el 23,5% a los perfiles y uniones de la Estructura Base y el Pórtico, un 11,5% a las resistencias eléctricas y un 3% a las placas de sujeción y fijación (Figura 86).

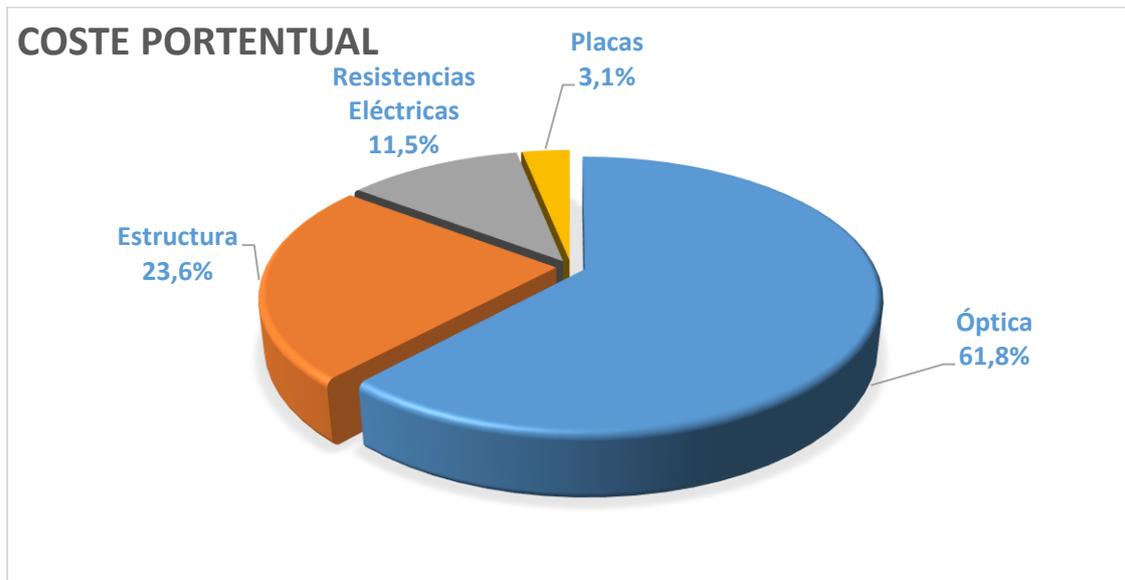


Figura 86: Desempeño porcentual de cada Módulo sobre el Coste Total del Sistema.

12. BIBLIOGRAFÍA:

- [1]. **G. S. Settles** *Schlieren and Shadowgraph Techniques*: Springer,2001.
- [2]. **Pradipta Kumar Panigrahi, Krishnamurthy Muralidhar.** *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*: Springer,2012.
- [3]. **Eugene Hecht,** *Optics (Fifth Edition)*: Pearson,2017.
- [4]. **Ana Manzanares.** *Evaluación óptica de sistemas astronómicos*,2005.
- [5]. **E. Gómez González.** *Guía Básica de Conceptos de Óptica Geométrica.*,2007.
- [6]. **E. Gómez González.** *Fundamentos de Óptica: Óptica Geométrica.*,2011.
- [7]. **Jorge Luis Yoma Vásquez.** *Visualización de flujos no isotérmicos con un dispositivo Schlieren.*,2007.
- [8]. **Andrés Enrique González Sastoque, Gylver Alexander Hastamorir González.** *Diseño y construcción del sistema de visualización Schlieren para el túnel aerodinámico de la Institución Universitaria Los Libertadores.*,2015.
- [9]. **M.C. Adrián Martínez González.** *Estudio y caracterización de un sistema de velocimetría óptica para hacer mediciones de temperatura y velocidad.*,2014.
- [10]. **M.C. Cornelio Álvarez Herrera.** *Medición de temperatura y análisis en flujos de fluido transparente utilizando la técnica Schlieren.*,2009.
- [11]. **Nicolas Degen.** *An Overview on Schlieren Optics and its Applications.*,2012.
- [12]. **R.W. Fish, M.Sc., A.R.C.S. and K. Parnham, B.Sc.** *Focussing Schlieren Systems.*,1951.
- [13]. **Amrita Mazumdar.** *Principles and Techniques of Schlieren Imaging.*,2013.
- [14]. **Benjamin R. Petersen.** *Transient High-Pressure Hydrogen Jet Measurements.*,2006.
- [15]. **Sanghoon Kook, Srinivas Padala.** *Z-type Schlieren Setup and its Application to High-Speed Imagin of Gasoline Sprays.*,2011.
- [16]. **Walton L. Howes.** *Rainbow Schlieren, NASA Technical Paper 2166.*,1983.
- [17]. **Duncan Stevenson.** *Quantitative Colour Schlieren Techniques.*,2011.
- [18]. **M. Pérez Cortés, J. Lugo-Jiménez, A. Bassam, M. Flota-Bañuelos, M. Ortíz Gutiérrez.** *Variante del Sistema Schlieren para observación de cambios en el índice de refracción: Caso de estudio para una vela*,2010.

13. ANEXOS:

13.1 Programación tratamiento de datos de la manta de presiones:

1- Cargar_datos.m:

```

%%PROGRAMA PARA IMPORTAR EL TXT Y SACAR LOS FRAMES DE LOS DATOS EN
BRUTO:
clear all;
clc;
Tipo_Ensayo=0;
%0=Cuando se comparan ensayos totalmente iguales entre si.
%1=Cuando se comparan ensayos con la misma distancia y distinta
presion
%2=cuand se comparan ensayos totalmente distintos.
%% 0-Analizar la carpeta origen y buscar archivos txt para guardar sus
nombres y ejecutarlos en bucle:
ruta=pwd;%si es en la ruta en la que se encuentra el archivo
extension='.txt';
archivos=ls(ruta);
contador_archivos=0;
nombre_archivos=[];
nombre_archivos_Est=[];
nombre_variables=[];
nombre_variables_Est=[];
for cc=1:size(archivos,1)
    archivo_a_comprobar=archivos(cc,:);
    [~,nombre,ext]=fileparts(archivo_a_comprobar);
    ext=deblank(ext);
    longitud_ext(cc)=length(deblank(ext));
    if longitud_ext(cc)==length(extension)
        if ext==extension
            contador_archivos=contador_archivos+1;
            nombre_archivos=[nombre_archivos;nombre];
        end
    end
end
if contador_archivos==0
    disp('No hay archivos con esa extension');
end
nombre_archivos
switch Tipo_Ensayo
    case 0
        [cad1,resto]=strtok(nombre_archivos(1,:),'-');
        [cad2,resto]=strtok(resto,'-');
        cad3=strtok(resto,'-');
        Nombre_Ensayo_General=strcat(cad1,'-',cad2,'-',cad3(1:3));
    case 1
        [cad1,resto]=strtok(nombre_archivos(1,:),'-');
        [cad2,resto]=strtok(resto,'-');
        Nombre_Ensayo_General=strcat(cad1,'-',cad2);
    case 2
        Nombre_Ensayo_General=('Ensayos Diferentes');
end

for cc=1:contador_archivos

```

```

nombre_archivos_Est=[nombre_archivos_Est;strcat(nombre_archivos(cc,:),
'_Est')];

nombre_variaciones=[nombre_variaciones;replace(nombre_archivos(cc),'-
','_')];

nombre_variaciones_Est=[nombre_variaciones_Est;strcat(nombre_variaciones(cc,
:),'_Est')];
end
save('Nombre_de_Archivos','Nombre_Ensayo_General','nombre_archivos','n
ombre_archivos_Est','nombre_variaciones','nombre_variaciones_Est','contado
r_archivos');

%% 0-Inicializacion:
Numero_Filas_Datos=100;
Numero_Columnas_Datos=100;
Columna_Inicial_a_Analizar=1;
Columna_Final_a_Analizar=100;

Filas_Iniciales_Bruto=21;
Filas_Iniciales_Blanco=3;
Filas_Iniciales=Filas_Iniciales_Bruto-Filas_Iniciales_Blanco;
Filas_Intermedias_Bruto=17;
Filas_Intermedias_Blanco=2;
Filas_Intermedias=Filas_Intermedias_Bruto-
Filas_Intermedias_Blanco;

%% 1- Started:
for cc=1:contador_archivos
    Ensayo=nombre_archivos(cc,:)
    %% 1-Cargar Datos y obtener el Número de Frames de la Muestra:
    tic;
    Matriz_Inicial=Importar_Datos(strcat(Ensayo,'.txt'),1,inf);
    toc;
    Numero_Filas=size(Matriz_Inicial,1);
    Numero_Frames=(Numero_Filas-
Filas_Iniciales+Filas_Intermedias)/(Numero_Filas_Datos+Filas_Intermedi
as);

    %% 2-Filtrar la Matriz Inicial,quitar las Filas Iniciales y
despues las Filas Intermedias:
    Matriz_Inicial(1:Filas_Iniciales-Filas_Intermedias,:)=[];
    Matriz_Inicial;
    for cc=1:Numero_Frames

Frames(:, :, cc)=Matriz_Inicial((Filas_Intermedias+1+Numero_Filas_Datos*
(cc-1)+(Filas_Intermedias)*(cc-
1):cc*Numero_Filas_Datos+Filas_Intermedias+Filas_Intermedias*(cc-
1)),Columna_Inicial_a_Analizar:Columna_Final_a_Analizar);
    end

    %% 3-Guardado de las Variables de Salida:Frames_X_XX_XXX:
    if any(isnan(Frames))
        disp('ERROR:Hay algún NaN dentro del array Multidimensional');
    else
        disp('CORRECTO:No hay NaN dentro del array Multidimensional');
        size(Frames)
        Numero_Frames

```

```

[~,Columnas_a_Analizar,~]=size(Frames);

save(strcat('Frames_',Ensayo),'Numero_Frames','Frames','Columnas_a_Analizar','Columna_Inicial_a_Analizar');
clear Frames;
end
end
end

```

2- Filtrado_Analisis_Fisico.m:

```

%PROGRAMA PARA FILTRAR Y ANALIZAR LAS MUESTRAS:
clear all;
clc;
load('Nombre_de_Archivos');

%% 0-Inicializacion:
%Tamaño del sensor:
Size_Sensor=2.54; %[mm]
%Size_Sensor=6.35; %[mm]
%%Variables para la búsqueda de los minimos/maximos de cada frame:
ValorBusqueda=10; %[mbar]
Fila_Limite_Superior=40;
Fila_Limite_Inferior=60;
%Variables para el Filtrado;
Filtro_Limite_Superior=35;
Filtro_Limite_Inferior=55;
Fila_Superior_Ploteado=35;
Fila_Inferior_Ploteado=50;
%Estas dos son en las coordenadas de la matriz inicial, es decir: 0-100 o
%0-64 segun la manta: un cambio de variable para explicarlo.
Columna_Izquierda_Analizar_Huella=1;
Columna_Derecha_Analizar_Huella=100;

Vect_Minimo_de_Muestra=[];
Vect_Maximo_de_Muestra=[];
Vect_Pos_Minimo_de_Muestra=[];
Vect_Pos_Maximo_de_Muestra=[];
Vect_Maximo_Media_Temporal=[];
Vect_Maximo_DesTip_Temporal=[];
Vect_Maximo_Maximo_Temporal=[];
Vect_Maximo_Minimo_Temporal=[];
Vect_Maximo_Pico_a_Pico_Temporal=[];
% Toda la Muestra:
Vect_Area_Huella_mm2=[];
Vect_Area_Huella_cm2=[];
Vect_Presion_Huella_mbar=[];
Vect_Fuerza_Huella_N=[];
Vect_Numero_Frames=[];
%Estacionario:
Vect_Area_Huella_mm2_Est=[];
Vect_Area_Huella_cm2_Est=[];
Vect_Presion_Huella_mbar_Est=[];
Vect_Fuerza_Huella_N_Est=[];
Vect_Numero_Frames_Est=[];
%Temporal:
Vect_M_Maximo_Temporal=[];
Vect_M_Minimo_Temporal=[];
Vect_M_Media_Temporal=[];
Vect_M_DesTip_Temporal=[];

```

```

Vect_M_Pico_a_Pico_Temporal=[];
nombre_archivos
for cc=1:contador_archivos
    Ensayo=nombre_archivos(cc,:);
    load(strcat('Frames_',Ensayo));
    Vect_Numero_Frames=[Vect_Numero_Frames;Numero_Frames];
end
clear cc Ensayo;
Minimo_Numero_Frames=min(Vect_Numero_Frames);
Maximo_Numero_Frames=max(Vect_Numero_Frames);
%Creacion de las matrices iniciales para los valores estacionarios:
Zero_Area_Huella_mm2_Est=zeros(Maximo_Numero_Frames,contador_archivos)
;
Zero_Area_Huella_cm2_Est=zeros(Maximo_Numero_Frames,contador_archivos)
;
Zero_Presion_Huella_mbar_Est=zeros(Maximo_Numero_Frames,contador_archivos)
;
Zero_Fuerza_Huella_N_Est=zeros(Maximo_Numero_Frames,contador_archivos)
;
%% Started:
for cc_archivos=1:contador_archivos
    Ensayo=nombre_archivos(cc_archivos,:);
    Ensayo_Est=nombre_archivos_Est(cc_archivos,:);
    Nombre_Variables=nombre_variables(cc_archivos,:);
    Nombre_Variables_Est=nombre_variables_Est(cc_archivos,:);
    load(strcat('Frames_',Ensayo));
    %% 0-Variables del FILTRADO:
    Minimo_por_Frame=[];
    Maximo_por_Frame=[];
    %%Seleccion de Frames:
    Frame_Inicial=1;
    Frame_Final=Numero_Frames;
    contador_Frames=Frame_Inicial;

    %% 1-Filtrado:
    for cc=1:(Frame_Final-Frame_Inicial+1)
        for cc_colum=1:Columnas_a_Analizar
            %Busqueda de los minimos/maximos del frame:

[init_filainit,columnainit]=find(Frames(Fila_Limite_Superior:Fila_Limite_Inferior,cc_colum,contador_Frames)>ValorBusqueda,1);
            filainit=init_filainit+Fila_Limite_Superior-1;

[filafinal,columnafinal]=find(Frames(1:Fila_Limite_Inferior,cc_colum,contador_Frames)>ValorBusqueda,1,'last');
            if isempty(filainit)
                minimo_por_columna=[NaN;cc_colum];
            else
                minimo_por_columna=[filainit;cc_colum];
            end
            if isempty(filafinal)
                maximo_por_columna=[NaN;cc_colum];
            else
                maximo_por_columna=[filafinal;cc_colum];
            end
            minimos_del_frame(:,cc_colum,cc)=minimo_por_columna;
            maximos_del_frame(:,cc_colum,cc)=maximo_por_columna;
        end
        %%Busqueda del minimo/maximo del frame:

if((min((minimos_del_frame(1,:,cc))))>=Filtro_Limite_Superior)==false

```

```

        Minimo_por_Frame=[Minimo_por_Frame;NaN];
    else
Minimo_por_Frame=[Minimo_por_Frame;(min((minimos_del_frame(1, :, cc))))]
;
        end

if((max(maximos_del_frame(1, :, cc))<=Filtro_Limite_Inferior)==false
        Maximo_por_Frame=[Maximo_por_Frame;NaN];
    else
Maximo_por_Frame=[Maximo_por_Frame;(max((maximos_del_frame(1, :, cc))))]
;
        end
    contador_Frames=contador_Frames+1;
end
[Minimo_de_Muestra, Pos_Minimo_de_Muestra]=min(Minimo_por_Frame);
[Maximo_de_Muestra, Pos_Maximo_de_Muestra]=max(Maximo_por_Frame);

%% 2-Obtencion de los Frames Filtrados y de los Frames Plotear:
for cc=Frame_Inicial:Frame_Final

Frames_Filtrados(:, :, cc)=Frames(Minimo_de_Muestra:Maximo_de_Muestra, :,
cc);
    end
    Vect_Minimo_de_Muestra=[Vect_Minimo_de_Muestra;Minimo_de_Muestra];
    Vect_Maximo_de_Muestra=[Vect_Maximo_de_Muestra;Maximo_de_Muestra];

Vect_Pos_Minimo_de_Muestra=[Vect_Pos_Minimo_de_Muestra;Pos_Minimo_de_M
uestra];

Vect_Pos_Maximo_de_Muestra=[Vect_Pos_Maximo_de_Muestra;Pos_Maximo_de_M
uestra];
    for cc=Frame_Inicial:Frame_Final

Frames_Plotear(:, :, cc)=Frames(Fila_Superior_Ploteado:Fila_Inferior_Plo
teado, :, cc);
    end

    size(Frames_Plotear);

%% ANALISIS TEMPORAL
%% 1-VARIABLES para el Calculo del Area, Presion y Fuerza:
CC_Celdas=[];
Sensores_Huella=[];
Area_Sensor=Size_Sensor*Size_Sensor;
Area_Huella_mm2=[];
Area_Huella_cm2=[];
Presion_Huella_mbar=[];
Fuerza_Huella_N=[];
Columna_Izquierda_Analizar=Columna_Izquierda_Analizar_Huella-
Columna_Inicial_a_Analizar+1;
Columna_Derecha_Analizar=Columna_Derecha_Analizar_Huella-
Columna_Inicial_a_Analizar+1;
%% 2-Calculo del Area, Presion y Fuerza:
for cc=1:Numero_Frames
%   for cc=20:20
%       %Inicializacion de los contadores:
%       cc_celdas=0;

```

```

cc_0_3=0;cc_3_5=0;cc_5_10=0;cc_10_20=0;cc_20_40=0;cc_40_50=0;cc_50_60=
0;cc_60_80=0;cc_80_100=0;cc_100_120=0;cc_120=0;

m_cc_0_3=[];m_cc_3_5=[];m_cc_5_10=[];m_cc_10_20=[];m_cc_20_40=[];m_cc_
40_50=[];m_cc_50_60=[];m_cc_60_80=[];m_cc_80_100=[];m_cc_100_120=[];m_
cc_120=[];
    sensores_huella=0;
    area_huella_mm2=0;
    area_huella_cm2=0;
    presion_huella_mbar=0;
    fuerza_huella_N=0;
    for cc_fila=1:(Maximo_de_Muestra-Minimo_de_Muestra+1)
        for
cc_colum=Columna_Izquierda_Analizar:Columna_Derecha_Analizar
            cc_celdas=cc_celdas+1;
            valor_celda=Frames_Filtrados(cc_fila,cc_colum,cc);
            %0-3:
            if((valor_celda>=0)&&(valor_celda<3))
                cc_0_3=cc_0_3+1;
                m_cc_0_3=[m_cc_0_3;valor_celda];
            %3-5:
            elseif((valor_celda>=3)&&(valor_celda<5))
                cc_3_5=cc_3_5+1;
                m_cc_3_5=[m_cc_3_5;valor_celda];
            %5-10:
            elseif((valor_celda>=5)&&(valor_celda<10))
                cc_5_10=cc_5_10+1;
                m_cc_5_10=[m_cc_5_10;valor_celda];
            %10-20:
            elseif((valor_celda>=10)&&(valor_celda<20))
                cc_10_20=cc_10_20+1;
                m_cc_10_20=[m_cc_10_20;valor_celda];
            %20-40:
            elseif((valor_celda>=20)&&(valor_celda<40))
                cc_20_40=cc_20_40+1;
                m_cc_20_40=[m_cc_20_40;valor_celda];
            %40-50:
            elseif((valor_celda>=40)&&(valor_celda<50))
                cc_40_50=cc_40_50+1;
                m_cc_40_50=[m_cc_40_50;valor_celda];
            %50-60:
            elseif((valor_celda>=50)&&(valor_celda<60))
                cc_50_60=cc_50_60+1;
                m_cc_50_60=[m_cc_50_60;valor_celda];
            %60-80:
            elseif((valor_celda>=60)&&(valor_celda<80))
                cc_60_80=cc_60_80+1;
                m_cc_60_80=[m_cc_60_80;valor_celda];
            %80-100:
            elseif((valor_celda>=80)&&(valor_celda<100))
                cc_80_100=cc_80_100+1;
                m_cc_80_100=[m_cc_80_100;valor_celda];
            %100-120:
            elseif((valor_celda>=100)&&(valor_celda<120))
                cc_100_120=cc_100_120+1;
                m_cc_100_120=[m_cc_100_120;valor_celda];
            %>120:
            else
                cc_120=cc_120+1;
                m_cc_120=[m_cc_120;valor_celda];

```

```

        end
    end
end
CC_Celdas=[CC_Celdas;cc_celdas];
%SELECCIONAR QUE CELDAS SE CONSIDERAN PARA LA HUELLA:

sensores_huella=cc_20_40+cc_40_50+cc_50_60+cc_60_80+cc_80_100+cc_100_1
20+cc_120;

presion_huella_mbar=(sum(m_cc_20_40)+sum(m_cc_40_50)+sum(m_cc_50_60)+
sum(m_cc_60_80)+sum(m_cc_80_100)+sum(m_cc_100_120)+sum(m_cc_120))/sens
ores_huella;
    if (isnan(presion_huella_mbar))
        presion_huella_mbar=0;
    end
    Sensores_Huella=[Sensores_Huella;sensores_huella];
    area_huella_mm2=sensores_huella*Area_Sensör;
    Area_Huella_mm2=[Area_Huella_mm2;area_huella_mm2];
    area_huella_cm2=area_huella_mm2/100;
    Area_Huella_cm2=[Area_Huella_cm2;area_huella_cm2];

    Presion_Huella_mbar=[Presion_Huella_mbar;presion_huella_mbar];
    fuerza_huella_N=(presion_huella_mbar*area_huella_mm2)/10000;
    Fuerza_Huella_N=[Fuerza_Huella_N;fuerza_huella_N];
end
Area_Huella_cm2;
Presion_Huella_mbar;
Fuerza_Huella_N;
%% 3-Calculo de los frames iniciales y finales del periodo
estacionario de la Muestra:
%OJO!!Mirar Area_Huella_mm2 para ver si el valor_limite_busqueda
es aceptable
max_Huella=max(Area_Huella_mm2);
valor_limite_busqueda=max_Huella*(1-0.15);
cc_frame_inicial=1;
cc_frame=1;
for cc=1:Numero_Frames
    valor_Area=Area_Huella_mm2(cc,1);
    if (valor_Area>=valor_limite_busqueda)
        break;
    end
    cc_frame_inicial=cc_frame_inicial+1;
end
for cc=Numero_Frames:-1:1
    valor_Area=Area_Huella_mm2(cc,1);
    if (valor_Area>=valor_limite_busqueda)
        break;
    end
    cc_frame=cc_frame+1;
end
Frame_Inicial_Estacionario=cc_frame_inicial;
Frame_Final_Estacionario=Numero_Frames-cc_frame;
Numero_Frames_Est=Frame_Final_Estacionario-
Frame_Inicial_Estacionario+1;
Vect_Numero_Frames_Est=[Vect_Numero_Frames_Est;Numero_Frames_Est];

Zero_Area_Huella_mm2_Est((1:Numero_Frames_Est),cc_archivos)=Area_Huell
a_mm2(Frame_Inicial_Estacionario:Frame_Final_Estacionario);

Zero_Area_Huella_cm2_Est((1:Numero_Frames_Est),cc_archivos)=Area_Huell
a_cm2(Frame_Inicial_Estacionario:Frame_Final_Estacionario);

```

```

Zero_Presion_Huella_mbar_Est((1:Numero_Frames_Est),cc_archivos)=Presion_Huella_mbar(Frame_Inicial_Estacionario:Frame_Final_Estacionario);

Zero_Fuerza_Huella_N_Est((1:Numero_Frames_Est),cc_archivos)=Fuerza_Huella_N(Frame_Inicial_Estacionario:Frame_Final_Estacionario);

    %% 4-Calculo de la matriz MAX,MIN,PICaPIC,MEDIA,DESV.TIPICA de la Muestra:

Fr_Fil_An_Temporal=Frames_Plotear(:, :, Frame_Inicial_Estacionario:Frame_Final_Estacionario);
    for cc_fila=1:(Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1)
        for cc_colum=1:Columnas_a_Analizar

M_Maximo_Temporal(cc_fila,cc_colum)=max(Fr_Fil_An_Temporal(cc_fila,cc_colum, :));

M_Minimo_Temporal(cc_fila,cc_colum)=min(Fr_Fil_An_Temporal(cc_fila,cc_colum, :));

M_Media_Temporal(cc_fila,cc_colum)=mean(Fr_Fil_An_Temporal(cc_fila,cc_colum, :));

M_DesTip_Temporal(cc_fila,cc_colum)=std(Fr_Fil_An_Temporal(cc_fila,cc_colum, :));
        end
        M_Pico_a_Pico_Temporal=M_Maximo_Temporal-M_Minimo_Temporal;
        %Guardado:
        Maximo_Media_Temporal=max(max(M_Media_Temporal));
        Maximo_DesTip_Temporal=max(max(M_DesTip_Temporal));
        Maximo_Maximo_Temporal=max(max(M_Maximo_Temporal));
        Maximo_Minimo_Temporal=max(max(M_Minimo_Temporal));
        Maximo_Pico_a_Pico_Temporal=max(max(M_Pico_a_Pico_Temporal));

Vect_Maximo_Media_Temporal=[Vect_Maximo_Media_Temporal;Maximo_Media_Temporal];

Vect_Maximo_DesTip_Temporal=[Vect_Maximo_DesTip_Temporal;Maximo_DesTip_Temporal];

Vect_Maximo_Maximo_Temporal=[Vect_Maximo_Maximo_Temporal;Maximo_Maximo_Temporal];

Vect_Maximo_Minimo_Temporal=[Vect_Maximo_Minimo_Temporal;Maximo_Minimo_Temporal];

Vect_Maximo_Pico_a_Pico_Temporal=[Vect_Maximo_Pico_a_Pico_Temporal;Maximo_Pico_a_Pico_Temporal];

    %% 5-Vectores de valores de todas las muestras y de los valores temporales:

    if(Numero_Frames==Maximo_Numero_Frames)
        Vect_Area_Huella_mm2(:,cc_archivos)=Area_Huella_mm2;
        Vect_Area_Huella_cm2(:,cc_archivos)=Area_Huella_cm2;
        Vect_Presion_Huella_mbar(:,cc_archivos)=Presion_Huella_mbar;
        Vect_Fuerza_Huella_N(:,cc_archivos)=Fuerza_Huella_N;
    else
        Resto_Numero_Frames=Maximo_Numero_Frames-Numero_Frames;
    
```

```

Matriz_Frames_ceros=zeros(Resto_Numero_Frames,1);
Area_Huella_mm2=[Area_Huella_mm2;Matriz_Frames_ceros];
Area_Huella_cm2=[Area_Huella_cm2;Matriz_Frames_ceros];
Presion_Huella_mbar=[Presion_Huella_mbar;Matriz_Frames_ceros];
Fuerza_Huella_N=[Fuerza_Huella_N;Matriz_Frames_ceros];
Vect_Area_Huella_mm2(:,cc_archivos)=Area_Huella_mm2;
Vect_Area_Huella_cm2(:,cc_archivos)=Area_Huella_cm2;
Vect_Presion_Huella_mbar(:,cc_archivos)=Presion_Huella_mbar;
Vect_Fuerza_Huella_N(:,cc_archivos)=Fuerza_Huella_N;
end
%Temporal:
Vect_M_Maximo_Temporal(:, :, cc_archivos)=M_Maximo_Temporal;
Vect_M_Minimo_Temporal(:, :, cc_archivos)=M_Minimo_Temporal;
Vect_M_Media_Temporal(:, :, cc_archivos)=M_Media_Temporal;
Vect_M_DesTip_Temporal(:, :, cc_archivos)=M_DesTip_Temporal;

Vect_M_Pico_a_Pico_Temporal(:, :, cc_archivos)=M_Pico_a_Pico_Temporal;
clear Frames_Filtrados;

end

%% 5-Vectores de valores estacionarios:
%Nos quedaremos con el numero de valores menores de todas las
muestras:
Minimo_Numero_Frames_Est=min(Vect_Numero_Frames_Est);
for cc_archivos=1:contador_archivos

Vect_Area_Huella_mm2_Est(:,cc_archivos)=Zero_Area_Huella_mm2_Est((1:Mi
nimo_Numero_Frames_Est),cc_archivos);

Vect_Area_Huella_cm2_Est(:,cc_archivos)=Zero_Area_Huella_cm2_Est((1:Mi
nimo_Numero_Frames_Est),cc_archivos);

Vect_Presion_Huella_mbar_Est(:,cc_archivos)=Zero_Presion_Huella_mbar_E
st((1:Minimo_Numero_Frames_Est),cc_archivos);

Vect_Fuerza_Huella_N_Est(:,cc_archivos)=Zero_Fuerza_Huella_N_Est((1:Mi
nimo_Numero_Frames_Est),cc_archivos);
end
%% 6-Guardado:
disp('FILTRADO:');
disp('Filas Limite');
Vect_Minimo_de_Muestra
Vect_Maximo_de_Muestra
disp('Frames Limite');
Vect_Pos_Minimo_de_Muestra
Vect_Pos_Maximo_de_Muestra
disp('ANALISIS TEMPORAL:');
Vect_Maximo_Media_Temporal
Vect_Maximo_DesTip_Temporal
Vect_Maximo_Maximo_Temporal
Vect_Maximo_Minimo_Temporal
Vect_Maximo_Pico_a_Pico_Temporal

% Busco y guardo el maximo de los temporales para despues poner el
mismo
% valor en las escalas de los ploteados:
Max_Temporales=[max(Vect_Maximo_Media_Temporal)
max(Vect_Maximo_DesTip_Temporal) max(Vect_Maximo_Maximo_Temporal)
max(Vect_Maximo_Minimo_Temporal)
max(Vect_Maximo_Pico_a_Pico_Temporal)]

```

```

%Análisis Total de los Frames:
save(strcat('Análisis_Fisico_',Nombre_Ensayo_General),'Vect_Numero_Fra
mes','Vect_Area_Huella_mm2','Vect_Area_Huella_cm2','Vect_Presion_Huell
a_mbar','Vect_Fuerza_Huella_N');
%Análisis Estacionario de los Frames:
save(strcat('Análisis_Fisico_Est_',Nombre_Ensayo_General),'Vect_Numero
_Frames_Est','Vect_Area_Huella_mm2_Est','Vect_Area_Huella_cm2_Est','Ve
ct_Presion_Huella_mbar_Est','Vect_Fuerza_Huella_N_Est');
%Análisis Temporal:
save(strcat('Análisis_Temporal_',Nombre_Ensayo_General),'Size_Sensor',
'Fila_Superior_Ploteado','Fila_Inferior_Ploteado','Vect_M_Media_Temporal',
'Vect_M_DesTip_Temporal','Vect_M_Minimo_Temporal','Vect_M_Maximo_T
emporal','Vect_M_Pico_a_Pico_Temporal');
%Maximos temporales:
Ruta_Maximos_Temporales=uigetdir('C:\Users\PP Cuchillas
Galva\Desktop\5-Manta de Presiones\2-Matlab','Seleccione la ruta donde
quieres guardar los Maximos temporales');
save(strcat(Ruta_Maximos_Temporales,'\','1_Max_Temporales'),'Max_Tempo
rales');
save('Ruta_Maximos_Temporales','Ruta_Maximos_Temporales');

```

3- Plotear Ensayos.m:

```

%PROGRAMA PARA REALIZAR LAS GRAFICAS DE TODA LA MUESTRA:
clear all;
clc;
load('Nombre_de_Archivos');
nombre_archivos
nombre_archivos_Est

%% 0-Inicialización:
%General:
load(strcat('Análisis_Fisico_',Nombre_Ensayo_General));
%Estacionario:
load(strcat('Análisis_Fisico_Est_',Nombre_Ensayo_General));
%Parametros para modificar las graficas:
LineWidth_Plots=1.5;
Font_Size_Titulo_General=24;
Font_Size_Titulo_Ejes=24;
Font_Size_Titulo_Leyenda=16;
Font_Size_Leyenda=16;

%% 1-Cálculo del vector tiempo para el ploteado:
Frames_por_segundo=5;
%General:
Maximo_Frames_Ensayos=max(Vect_Numero_Frames);
Tiempo_Ensayos_s=round((Maximo_Frames_Ensayos)/Frames_por_segundo);
Vector_Tiempo_s=(linspace(0,Tiempo_Ensayos_s,Maximo_Frames_Ensayos));
%Estacionario:
Mnimo_Frames_Ensayos_Est=min(Vect_Numero_Frames_Est);
Tiempo_Ensayos_s_Est=round((Mnimo_Frames_Ensayos_Est)/Frames_por_segun
do);
Vector_Tiempo_s_Est=(linspace(0,Tiempo_Ensayos_s_Est,Mnimo_Frames_Ensa
yos_Est));

%% 2-Plotear Todo las muestras:
%Area:

```

```

Area=figure(1);
plot(Vector_Tiempo_s,Vect_Area_Huella_cm2(:,:),'LineWidth',LineWidth_Plots);
title(strcat('Area-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Area [cm^2]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Area);
saveas(Area,strcat('Area_',Nombre_Ensayo_General,'.jpg'));

%Presion:
Presion=figure(2);
plot(Vector_Tiempo_s,Vect_Presion_Huella_mbar(:,:),'LineWidth',LineWidth_Plots);
title(strcat('Presion-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Presion [mbar]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Presion);
saveas(Presion,strcat('Presion_',Nombre_Ensayo_General,'.jpg'));

%Fuerza:
Fuerza=figure(3);
plot(Vector_Tiempo_s,Vect_Fuerza_Huella_N(:,:),'LineWidth',LineWidth_Plots);
title(strcat('Fuerza-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Fuerza [N]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Fuerza);
saveas(Fuerza,strcat('Fuerza_',Nombre_Ensayo_General,'.jpg'));

%% 3-Plotear Estacionario:
%Area:
Area_Est=figure(4);
plot(Vector_Tiempo_s_Est,Vect_Area_Huella_cm2_Est(:,:),'LineWidth',LineWidth_Plots);
title(strcat('Area-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Area [cm^2]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Area_Est);
saveas(Area_Est,strcat('Area_Est_',Nombre_Ensayo_General,'.jpg'));

%Presion:
Presion_Est=figure(5);
plot(Vector_Tiempo_s_Est,Vect_Presion_Huella_mbar_Est(:,:),'LineWidth',LineWidth_Plots);

```

```

title(strcat('Presion-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Presion [mbar]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Presion_Est);
saveas(Presion_Est,strcat('Presion_Est_',Nombre_Ensayo_General, '.jpg')
);

%Fuerza:
Fuerza_Est=figure(6);
plot(Vector_Tiempo_s_Est,Vect_Fuerza_Huella_N_Est(:,:),'LineWidth',Lin
ewidth_Plots);
title(strcat('Fuerza-
',Nombre_Ensayo_General),'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel('t [s]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel('Fuerza [N]','FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
lgd=legend(nombre_archivos);
lgd.FontSize =Font_Size_Titulo_Leyenda;
title(lgd,'Ensayos:','FontSize',Font_Size_Leyenda);
Maximizar_Figura(Fuerza_Est);
saveas(Fuerza_Est,strcat('Fuerza_Est_',Nombre_Ensayo_General, '.jpg'))
;

```

4- Analisis_Temporal.m:

```

%PROGRAMA PARA REALIZAR EL ANALISIS FISICO:
clear all;
clc;
load('Nombre_de_Archivos');
%% 0-Inicializacion:
load(strcat('Analisis_Temporal_',Nombre_Ensayo_General));
[Numero_Filas,Numero_Columnas]=size(Vect_M_DesTip_Temporal(:,:,1));
%Parametros para modificar las graficas:
Font_Size_Titulo_General=24;
Font_Size_Titulo_Ejes=24;
Font_Size_Titulo_Escala=24;
Font_Size_Valor_Ejes=14;
%% 1-Cargar los Maximos Temporales y buscar los maximos para definir
los topes de las escalas de colores:
load('Ruta_Maximos_Temporales');
Ruta_Maximos_Temporales
archivos=ls(Ruta_Maximos_Temporales);
extension='.mat';
contador_maximos_temporales=0;
Size_Archivos=size(archivos,1);
Nombre_Maximos_Temporales=[];
for cc=1:Size_Archivos
    archivo_a_comprobar=archivos(cc,:);
    [~,nombre,ext]=fileparts(archivo_a_comprobar);
    ext=deblank(ext);
    longitud_ext(cc)=length(deblank(ext));
    if longitud_ext(cc)==length(extension)
        if ext==extension
            contador_maximos_temporales=contador_maximos_temporales+1;

```

```

Nombre_Maximos_Temporales=[Nombre_Maximos_Temporales;nombre];
    end
end
end
if contador_maximos_temporales==0
    disp('No hay archivos con esa extension');
end
Matriz_Maximos_Temporales=zeros(size(Nombre_Maximos_Temporales,1),5);
for cc=1:size(Nombre_Maximos_Temporales,1)

Nueva_Ruta_Maximos_Temporales=strcat(Ruta_Maximos_Temporales,'\',strcat(Nombre_Maximos_Temporales(cc,:),'.mat'));
    valor=importdata(Nueva_Ruta_Maximos_Temporales);
    Matriz_Maximos_Temporales(cc,:)=valor;
end
%% Maximos Temporales:
MAXIMOS=max(Matriz_Maximos_Temporales,[],1);
Maximo_Media_Temporal=MAXIMOS(1,1);
Maximo_DesTip_Temporal=MAXIMOS(1,2);
Maximo_Maximo_Temporal=MAXIMOS(1,3);
Maximo_Minimo_Temporal=MAXIMOS(1,3);
Maximo_Pico_a_Pico_Temporal=MAXIMOS(1,5);

%% 2-Started:
contador_figuras=0;
for cc_archivos=1:contador_archivos
    %% 1-Plotear Medias y Desviaciones tipicas:
    contador_figuras=contador_figuras+1;
    Media=figure(contador_figuras);
    subplot(2,4,1:4);
    imagesc(Vect_M_Media_Temporal(:,:,cc_archivos));
    colormap jet;
    caxis([0 Maximo_Media_Temporal]);
    escalacolor=colorbar;
    escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
    escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
    title(strcat('Media de cada sensor
(' ,nombre_archivos(cc_archivos,:), ')'), 'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
    xlabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
    ylabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
    yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);
    yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
    xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
    xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);
    set(gca, 'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
    subplot(2,4,5:8);
    imagesc(Vect_M_DesTip_Temporal(:,:,cc_archivos));
    colormap jet;
    caxis([0 Maximo_DesTip_Temporal]);
    escalacolor=colorbar;
    escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
    escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
    title(strcat('Desviacion tipica de cada sensor
(' ,nombre_archivos(cc_archivos,:), ')'), 'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
    xlabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
    ylabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
    yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);

```

```

        yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-
Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
        set(gca,'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
        xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
        xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);

        Maximizar_Figura(Media);

saveas(Media, strcat('Media_Desv_', nombre_archivos(cc_archivos,:), '.jpg
'));
        contador_figuras=contador_figuras+1;

        %% 2-Plotear Minimos y Maximos:
        Min_Max=figure(contador_figuras);
        subplot(2,4,1:4);
        imagesc(Vect_M_Minimo_Temporal(:, :, cc_archivos));
        colormap jet;
        caxis([0 Maximo_Minimo_Temporal]);
        escalacolor=colorbar;
        escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
        escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
        title(strcat('Minimo de cada sensor
(' , nombre_archivos(cc_archivos, :), ')'), 'FontSize', Font_Size_Titulo_Gen
eral);
        xlabel(' [mm]', 'FontSize', Font_Size_Titulo_Ejes);
        ylabel(' [mm]', 'FontSize', Font_Size_Titulo_Ejes);
        yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);
        yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-
Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
        set(gca,'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
        xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
        xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);
        subplot(2,4,5:8);
        imagesc(Vect_M_Maximo_Temporal(:, :, cc_archivos));
        colormap jet;
        caxis([0 Maximo_Maximo_Temporal]);
        escalacolor=colorbar;
        escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
        escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
        title(strcat('Máximo de cada sensor
(' , nombre_archivos(cc_archivos, :), ')'), 'FontSize', Font_Size_Titulo_Gen
eral);
        xlabel(' [mm]', 'FontSize', Font_Size_Titulo_Ejes);
        ylabel(' [mm]', 'FontSize', Font_Size_Titulo_Ejes);
        yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);
        yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-
Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
        set(gca,'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
        xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
        xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);

        Maximizar_Figura(Min_Max);

saveas(Min_Max, strcat('Min_Max_', nombre_archivos(cc_archivos,:), '.jpg'
));
        contador_figuras=contador_figuras+1;
        %% 3-Plotear Pico a Pico:
        Pico_a_Pico=figure(contador_figuras);
        imagesc(Vect_M_Pico_a_Pico_Temporal(:, :, cc_archivos));
        colormap jet;
        caxis([0 Maximo_Pico_a_Pico_Temporal]);

```

```

escalacolor=colorbar;
escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
title(strcat('Pico a Pico
(','nombre_archivos(cc_archivos,:),''), 'FontSize',Font_Size_Titulo_Gen
eral);
xlabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);
yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-
Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
set(gca, 'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);

Maximizar_Figura(Pico_a_Pico);

saveas(Pico_a_Pico,strcat('Pico_a_Pico_',nombre_archivos(cc_archivos,:
),'.jpg'));
end
contador_figuras;

% 5-Plotear Resta de Medias:
M_Resta_Medias_Cuchillas=abs(Vect_M_Media_Temporal(:, :,1)-
Vect_M_Media_Temporal(:, :,2));
Maximo_Resta_Medias=max(max(M_Resta_Medias_Cuchillas));
Resta_Medias_Cuchillas=figure(7);
subplot(1,4,1:4);
imagesc(M_Resta_Medias_Cuchillas);
colormap jet;
caxis([0 Maximo_Resta_Medias]);
escalacolor=colorbar;
escalacolor.Label.String = 'Presion [mbar]';
escalacolor.Label.FontSize=Font_Size_Titulo_Escala;
title(strcat('Diferencia entre las Medias de la Cuchilla A y la
Cuchilla B'), 'FontSize',Font_Size_Titulo_General);
xlabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
ylabel(' [mm]', 'FontSize',Font_Size_Titulo_Ejes);
yticks(0.5:2:Fila_Inferior_Ploteado-Fila_Superior_Ploteado+1);
yticklabels(0:Size_Sensor*2:(Fila_Inferior_Ploteado-
Fila_Superior_Ploteado+1)*Size_Sensor);
xticks(0.5:5:Numero_Columnas);
set(gca, 'FontSize',Font_Size_Valor_Ejes);
xticklabels(0:Size_Sensor*5:Numero_Columnas*Size_Sensor);

Maximizar_Figura(Resta_Medias_Cuchillas);
saveas(Resta_Medias_Cuchillas,strcat('Resta_Medias_Cuchillas','.jpg'))
;

```