



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

Instrumentación óptica para la medición volumétrica de velocidad dentro de un túnel de viento



Como requisito para obtener el grado de:

Maestría en Optomecatrónica

Asesor:

Dr. David Moreno Hernández

Estudiante:

Jorge Eduardo Aguirre Rocha

Diciembre 2017

León, Guanajuato, México

Resumen

En esta tesis se desarrolló la instrumentación óptica necesaria para realizar mediciones de velocidad en volumen de flujos dentro de un túnel de viento. La medición de velocidad se hizo en la estela del flujo de aire que pasa por un cilindro usando velocimetría por partículas de imágenes (Particle Image Velocimetry-PIV). Para poder realizar dichas mediciones la propuesta incluye el diseño y construcción de un túnel de viento de baja velocidad, la instrumentación necesaria para operar el túnel de viento a diferentes velocidades y la instrumentación óptica para realizar la técnica de PIV.

La instrumentación realizada para operar el túnel de viento corresponde a un control de movimiento lateral del túnel de viento usando un motor a pasos, control de velocidad de un motor que establece la velocidad del flujo en la sección de trabajo del túnel de viento, control de dosificado homogéneo de partículas en el túnel de viento y la construcción de un sistema de extracción de partículas del laboratorio. La instrumentación óptica desarrollada para realizar PIV corresponde al diseño mecánico de monturas para lentes cilíndricas, puesta en operación de un láser semiconductor de 10 Watts de potencia y manejo de una cámara digital de alta velocidad.

La sección de trabajo del túnel de viento construido es de $20 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$ y tiene una velocidad mínima y máxima de 0.1 y 4.9 m/s respectivamente. Las mediciones usando PIV se hicieron para el flujo que pasa a través de un cilindro de 10.2 milímetros de diámetro a una velocidad de 0.16 m/s. Las mediciones del flujo se hicieron en 10 secciones en la dirección lateral con una separación de 1 milímetro cada una. Esto permitió tener un volumen de medición de la velocidad del flujo de aproximadamente de $40 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$.

La instrumentación óptica realizada permite obtener información de la velocidad del flujo dentro de un volumen. Este tipo de datos obtenidos experimentalmente aportan información relevante para diseños y validación de simulaciones en dinámica de fluidos.

Agradecimientos

A mi familia en especial a mis padres por todo su apoyo a lo largo de mi formación académica, por la educación y los valores que me dieron en casa.

A mi asesor el Dr. David Moreno por todo el apoyo que me brindó en el desarrollo de esta tesis, por creer en mí para la elaboración de este trabajo, y por sus consejos.

A mis sinodales el Doctor Moises Cywiak y Adrián Martínez por el tiempo sacrificado en la revisión de este trabajo.

Al director general y al director de investigación por facilitar el laboratorio de pruebas ópticas no destructivas y el equipo que hay dentro.

A mi mejor compañera de generación María Fernanda por todo el apoyo que me dio, por todas las desveladas estudiando, y lo principal su valiosa compañía a lo largo de esta maestría.

A mis compañeros de generación Amanda, Fabio, Daniel, Pepe, Ramón, Ricardo, Iosvani por el buen trabajo en equipo que hicimos para sacar esto adelante, por su amistad y compañía incondicional.

Al profesor Noé por las clases impartidas en esta maestría y por el soporte de ingeniería que me brindó.

A Adrián Coronel por sus valiosas clases y por el apoyo de la solicitud del equipo del laboratorio de electrónica.

A Diego Armenta por su clase de Solid Works y por el apoyo en la impresión de diseños en la impresora 3D que fueron de gran ayuda para la elaboración de esta tesis.

Al profesor Ricardo Valdivia por su amistad, por el soporte electrónico que dio, por la elaboración de circuitos impresos y por el material que me prestó para la elaboración de esta tesis.

A la señora Ángeles y a Gabriela por la ayuda para el uso de los recursos disponibles de la biblioteca.

A Rubén Ibarra, Paulina Castellanos y Carlos Montañez por complementar mi trabajo de tesis con sus estancias en el CIO.

A Javier Gantes, Maribel Juárez y Jonatán Avalos por ser buen compañero y amigo dentro CIO en especial dentro de los capítulos estudiantiles.

Agradezco infinitamente a Centro de Investigaciones en Óptica, por darme la oportunidad de estudiar una maestría y por hacer de este lugar mi casa de estudios durante más de dos años.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el soporte económico que me permitió seguirme preparado para contribuir al desarrollo de la ciencia y la tecnología en este país.

CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción a la medición de velocidad con PIV | 1 |
| 1.1 | Antecedentes históricos | 1 |
| 1.2 | Principios de velocimetría por imágenes de partículas (PIV)..... | 2 |
| 1.2.1 | Partículas trazadoras | 5 |
| 1.2.2 | Propiedades mecánicas de la mecánica de fluidos | 5 |
| 1.2.3 | Comportamiento del esparcimiento de la luz | 5 |
| 1.2.4 | Generación de partículas | 6 |
| 1.2.5 | Fuentes de luz láser..... | 7 |
| 1.2.6 | Óptica de la hoja de luz | 7 |
| 1.2.7 | Registro digital de imágenes..... | 9 |
| 1.3 | Medición de velocidad en tres dimensiones (PIV 3D) | 12 |
| 1.3.1 | PIV estéreo | 12 |
| 1.3.2 | PIV holográfico | 12 |
| 1.3.3 | Hojas de luz paralelas..... | 13 |
| 2 | Diseño de la instrumentación para la medición de velocidad en volumen dentro de un túnel de viento. | 13 |
| 2.1 | Diseño de un túnel de viento de baja velocidad..... | 13 |
| 2.1.1 | Control de velocidad del túnel de viento | 19 |
| 2.2 | Dosificación de partículas..... | 21 |
| 2.2.1 | Máquina generadora de humo. | 22 |
| 2.2.2 | Cámara de concentración con ventilador de expulsión | 23 |
| 2.3 | Sistema de extracción de partículas | 23 |
| 2.4 | Mecanismo de corredera para el desplazamiento del túnel de viento para medición de velocidad volumétrica. | 24 |
| 3 | Procedimiento experimental para medir velocidad..... | 26 |
| 3.1 | Cámara digital de alta velocidad..... | 26 |
| 3.2 | Láser..... | 30 |
| 3.3 | Sistema óptico de la hoja de luz..... | 32 |
| 3.4 | Objetivo de la cámara | 36 |
| 3.5 | Arreglo experimental | 39 |
| 3.6 | Metodología para la adquisición de imágenes en el arreglo experimental | 43 |
| 3.7 | Datos obtenidos en la experimentación. | 45 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4 | Resultados experimentales y conclusiones. | 46 |
| 4.1 | Análisis de las imágenes de PIV: el método de correlación cruzada..... | 46 |
| 4.2 | Obtención de campos de velocidad en múltiples planos paralelos del flujo que pasa a través de un cilindro..... | 49 |
| 4.3 | Conclusiones y trabajo futuro..... | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Ludwig Prandtl frente a su túnel de agua para la visualización de flujo en 1904 [1]. | 1 |
| Figura 1.2 Flujo turbulento de la estela de un cilindro. | 2 |
| Figura 1.3 Arreglo experimental para velocimetría por imágenes de partículas en un túnel de viento [1]. | 3 |
| Figura 1.4 Los tres tipos de densidad de partículas de imágenes: bajo (PVT),(b) media (PIV) y (c) alta densidad (LSV). | 4 |
| Figura 1.5. Haz colimado incidiendo en una superficie plano-cóncava de distancia focal $-f$ [6]. | 8 |
| Figura 1.6. Óptica de la hoja de luz utilizando tres lentes cilíndricas, una negativa y dos positivas. | 8 |
| Figura 1.7. Óptica de la hoja de luz utilizando tres lentes cilíndricas, dos negativas y una positiva | 9 |
| Figura 2.1. Elementos de un túnel de viento. | 14 |
| Figura 2.2. Vista isométrica frontal del cono de contracción. | 15 |
| Figura 2.3 Vista isométrica trasera del cono de contracción. | 15 |
| Figura 2.4. Vista isométrica frontal del difusor. | 16 |
| Figura 2.5. Vista isométrica lateral del difusor. | 16 |
| Figura 2.6. Sección de trabajo. | 17 |
| Figura 2.7. Rejilla para la eliminación de componentes de velocidad que no son paralelos a la dirección del flujo. | 17 |
| Figura 2.8. Ensamble de la sección de pruebas con la rejilla de eliminación de componentes de velocidad no deseadas. | 18 |
| Figura 2.9. Motor extractor del túnel de viento. | 18 |
| Figura 2.10. Túnel de viento | 19 |
| Figura 2.11. Conducción de la onda de voltaje de un triac. | 20 |
| Figura 2.12. Diagrama electrónico para el control del motor extractor. | 21 |
| Figura 2.13. Serpentín y resistencia tubular de la máquina de humo. | 22 |
| Figura 2.14. Cámara de concentración, ducto y ventilador expulsor de humo. | 23 |
| Figura 2.15. Ducto de extracción de partículas. | 24 |
| Figura 2.16. Mecanismo de desplazamiento del túnel de viento. | 25 |
| Figura 2.17. Mecanismo de desplazamiento en una sola dirección mediante un motor a pasos conectado con una banda de transmisión a un tornillo con rosca ACME. | 25 |
| Figura 2.18. Mecanismo de desplazamiento con el túnel de viento. | 26 |
| Figura 3.1. Interface de Motion Studio que controla los parámetros de la cámara Y7-S1 | 28 |
| Figura 3.2. Láser semiconductor Millenia Edge | 31 |
| Figura 3.3. Diagrama del sistema óptico de la hoja de luz | 34 |
| Figura 3.4. Sistema óptico de la hoja de luz en soportes. | 36 |
| Figura 3.5. Objetivo macro con distancia focal de 60 mm | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.6. Arreglo experimental para la medición de velocidad en un volumen..... | 39 |
| Figura 3.7. Ducto del sistema de dosificación de partículas cercano a la entrada del túnel de viento. | 40 |
| Figura 3.8. Colocación del sistema óptico para la hoja de luz | 41 |
| Figura 3.9. Desplazamiento del túnel de viento para obtener múltiples hojas paralelas. | 42 |
| Figura 3.10. Sistema de extracción acoplado al túnel de viento. | 42 |
| Figura 3.11. Fotografía del arreglo de PIV para medición de velocidad en volumen..... | 43 |
| Figura 3.12. Imagen 1 de 10,000 adquirida en la experimentación para la medición del flujo de un cilindro que atraviesa un volumen. | 46 |
| Figura 4.1. Correlación cruzada de dos ventanas de interrogación. | 48 |
| Figura 4.2. Segmentación de las imágenes a y b en múltiples ventanas de interrogación. | 49 |
| Figura 4.3. Parámetros de correlación y de malla del cálculo de vectores. | 50 |
| Figura 4.4. Malla del mismo tamaño que la generada por las áreas de interrogación. | 51 |
| Figura 4.5. Configuración de los datos de salida de proVISION. | 51 |
| Figura 4.6. Rejilla de calibración del sistema PIV. | 52 |
| Figura 4.7. Mapa de vectores de la solución de primer par de imágenes del plano de medición 1 | 53 |
| Figura 4.8. Mapa de vectores con imagen de la solución de primer par de imágenes del plano de medición 1 con imagen. | 53 |
| Figura 4.9. Campo vectorial y velocidad resultante de los 10 planos de medición de $z=0$ mm a $z=9$ mm. | 55 |
| Figura 4.10. Planos de velocidad que construyen el flujo que atraviesa un cilindro dentro de un volumen. | 56 |
| Figura 4.11. Campo vectorial y vorticidad de los 10 planos de medición de $z=0$ mm a $z=9$ mm. | 58 |
| Figura 4.12. Planos de vorticidad que construyen el flujo que atraviesa un cilindro dentro de un volumen. | 58 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Partículas usadas para fluidos en estado líquido. | 6 |
| Tabla 1.2. Partículas usadas para fluidos en estado gaseoso. | 6 |
| Tabla 2.1. Dimensiones de los componentes del túnel de viento. | 14 |
| Tabla 3.1. Características de la cámara de alta velocidad. | 27 |
| Tabla 3.2. Características del láser semiconductor Millenia Edge. | 30 |
| Tabla 3.3. Nomenclatura, consideraciones y explicación del sistema de la hoja de luz. | 33 |
| Tabla 3.4. Parámetros de diseño de la hoja de luz. | 35 |
| Tabla 3.5. Parámetros conocidos del arreglo PIV. | 38 |
| Tabla 3.6. Comportamiento del número f respecto a la amplificación y al campo de visión. | 38 |
| Tabla 3.7. Parámetros utilizados en el arreglo PIV. | 45 |

NOMENCLATURA

| | |
|-------------|--|
| r_0 | Radio de haz láser |
| f | Distancia focal |
| θ | Ángulo de convergencia del haz láser |
| z | Distancia posterior a la lente cilíndrica |
| L | Longitud de la hoja de luz |
| t_{max} | Tiempo máximo de exposición |
| t_e | Tiempo de exposición |
| f_s | Frecuencia de muestreo en cada adquisición |
| t_{cw} | Tiempo de conversión y de escritura |
| t_{min} | Tiempo mínimo de exposición |
| $f_{s max}$ | Frecuencia máxima de muestreo para una cámara |
| Q | Caudal de succión |
| A_1 | Área de la sección de pruebas del túnel de viento |
| v_1 | Velocidad en la sección de pruebas del túnel de viento |
| V_{rms} | Voltaje root mean square |
| $V(t)$ | Señal de voltaje en el tiempo de la red eléctrica. |
| T | Periodo de la red eléctrica |
| T_1 | Tiempo de espera para el disparo del triac. |
| λ | Longitud de onda del láser. |
| M | Amplificación del objetivo de la cámara. |
| $f_{\#}$ | Número f del objetivo de la cámara. |
| d_{dif} | Diámetro de la difracción de la partícula trazadora |
| d_p | Diámetro de la partícula trazadora |
| d_T | Diámetro total de la partícula trazadora |
| f_o | Distancia focal del objetivo de la cámara |

| | |
|------------|--|
| D_d | Diámetro del diafragma de la cámara. |
| dZ | Desplazamiento entre los planos de medición. |
| Z | Desplazamiento total del volumen. |
| n | Número de imágenes por plano de medición. |
| n_t | Número total de imágenes del análisis. |
| ρ | Densidad de partículas. |
| i | Número de correlación de una secuencia de imágenes. |
| t_0 | Tiempo de adquisición de la imagen inicial utilizada en la correlación cruzada |
| t_1 | Tiempo de adquisición de la imagen retardada utilizada en la correlación cruzada |
| δ_z | Profundidad de campo del objetivo de la cámara. |

ABREVIACIONES

PIV Particle Image Velocimetry

LDV Laser Doppler Velocimetry

PTV Particle Tracking Velocimetry

LSV Laser Speckle Velocimetry

FPS Frames per Second

ROI Region of interest

ISO International Organization for Standardization

RMS Root Mean Square

PWM Pulse width modulation

PCB Printed Circuit Board

BROC Burst Record on Command

CMOS Complementary metal oxide semiconductor

1 Introducción a la medición de velocidad con PIV

1.1 Antecedentes históricos

Los humanos se han interesado en la observaciones de la naturaleza, hasta este momento es una de las más importantes para la supervivencia de la humanidad. Los sentidos humanos son muy sensibles al reconocer movimientos de objetos aunque estos puedan ser peligrosos. Se puede imaginar como la observación del movimiento de objetos ha estimulado los primeros experimentos con configuraciones y herramientas disponibles en la naturaleza. Hoy se tiene el mismo comportamiento primitivo que se hace evidente cuando los niños arrojan pequeñas piezas de madera al precipicio de un puente colgando sobre un río y después lo observan como flota corriente abajo. Esto es simplemente un experimento que les permite hacer una burda estimación de la velocidad a la cual el río está corriendo y detectar estructuras tales como remolinos, estelas detrás de obstáculos en el río y fuentes de agua.

No obstante con dichas herramientas experimentales basadas en la observación, la descripción de las propiedades del flujo es restringida a aseveraciones cualitativas, sin embargo al inicio del mismo tiempo un artista con excelentes habilidades y muy buen observador de la naturaleza, Leonardo Da Vinci, fue capaz de realizar bosquejos detallados de las estructuras dentro de un flujo únicamente por observación.

Un gran adelanto en la investigación de los flujos fue hecha posible al remplazar la observación pasiva por métodos de visualización, el mejor precursor de esto fue Ludwig Prandtl, uno de los más altos representantes de la mecánica de fluidos, quien diseño y utilizó técnicas de visualización de flujo en agua para estudiar aspectos de flujos inestables separados detrás de alas y algunos otros objetos. [1]

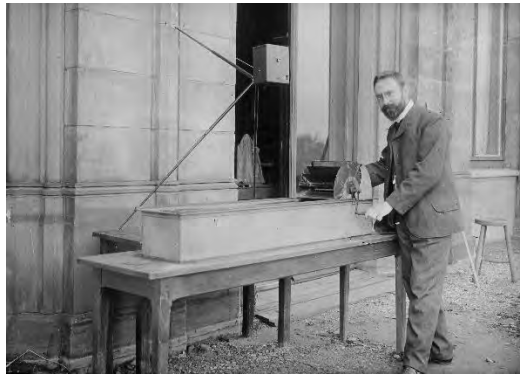


Figura 1.1 Ludwig Prandtl frente a su túnel de agua para la visualización de flujo en 1904 [1].

La Figura 1.1 muestra a Ludwig Prandtl en 1904 frente a su túnel moviendo el flujo manualmente mediante una rueda con palas, el agua recircula a lo largo de todo el túnel donde modelos como cilindros, prismas y alas pueden ser fácilmente montadas arriba de los canales. El flujo es visto mediante una distribución de partículas sobre la superficie del agua. Ludwig Prandtl estudió utilizando su arreglo experimental las estructuras del flujo estacionario, lo mismo hizo con las del flujo no estacionario.

Hoy, 113 años después de los experimentos de Ludwig Prandtl es fácilmente extraer información de la velocidad instantánea de flujos del mismo tipo como las que hizo Prandtl, Incluso estas pueden ser obtenidas para cualquier fluido. Sin embargo, los científicos y el progreso técnico ha logrado avances en óptica, láseres, video y técnicas de computación las cuales fueron necesarias para el desarrollo de nuevas técnicas para la visualización cuantitativa, que puede ser empleada para mediciones cuantitativas de campos instantáneos de velocidad en fluidos.



Figura 1.2 Flujo turbulento de la estela de un cilindro.

En la Figura 1.2 Se visualiza el flujo turbulento de la estela de un cilindro usando un sistema PIV.

1.2 Principios de velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

Los principios básicos de esta técnica de medición ampliamente nombrada como “Particle Image Velocimetry” o “PIV” son descritos brevemente. El arreglo experimental de un sistema PIV típicamente consiste en varios subsistemas. En la mayoría de las aplicaciones, las partículas trazadoras tienen que ser agregadas al fluido, dichas partículas deben de ser iluminadas en al menos un par de ocasiones dentro de un intervalo corto de tiempo para que la luz esparcida por las partículas sea registrada en un fotograma o en secuencia. El desplazamiento de las partículas entre pulsos consecutivos puede ser usado para determinar campos de velocidad. Para esto se requiere un sofisticado pos-procesamiento debido a la enorme cantidad de datos que son recolectados al usar la técnica de PIV.

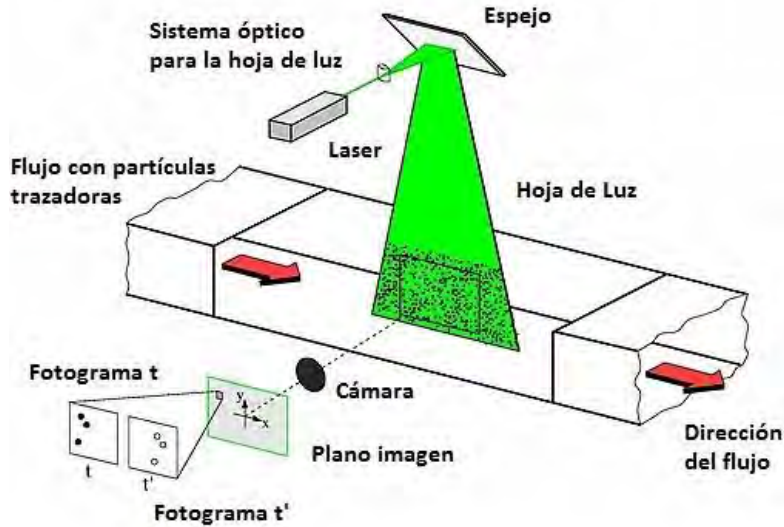


Figura 1.3 Arreglo experimental para velocimetría por imágenes de partículas en un túnel de viento [1].

La Figura 1.3 explica una configuración típica de PIV en un túnel de viento. Pequeñas partículas trazadoras son agregadas al flujo para que sean iluminadas por una hoja de luz que está presente en un plano, la luz esparcida por las partículas es registrada por un sensor CMOS en dos tiempos consecutivos y así mediante un pos-procesamiento se puede determinar la velocidad instantánea del flujo. El tiempo entre las imágenes depende de la velocidad del flujo y la amplificación en la imagen. En esta técnica se asume que las partículas trazadoras siguen el flujo durante el registro del par de imágenes [1].

Para la evaluación del registro digital del sistema PIV se divide la imagen en pequeñas subáreas llamadas “áreas de interrogación”, el desplazamiento local (cada área de interrogación) de las partículas entre la primera y la segunda iluminación es determinado mediante métodos estadísticos como: autocorrelación y correlación cruzada. También se asume que las partículas dentro de cada área de interrogación se mueven homogéneamente entre las dos imágenes adquiridas. La proyección de la velocidad del flujo local está en el plano de la hoja de luz es decir; solo dos componentes del vector de velocidad son calculadas.

El proceso se repite en cada área de interrogación para todas las imágenes adquiridas. Con cámaras modernas (1920x 1080) es posible almacenar más de 5,000 imágenes por segundo [2]. El tamaño del área de interrogación depende de la densidad de partículas que se ingrese al fluido y de la velocidad del mismo.

Antes de explicar detalles de la técnica PIV se deben de discutir algunos aspectos para facilitar el entendimiento de algunas cuestiones técnicas.

Medición de velocidad no intrusiva. A diferencia de las técnicas de medición de velocidad en los fluidos en las que se emplean sondas; como tubos de presión o cables calientes. PIV comenzó a ser una técnica óptica no intrusiva que permite medir flujos de alta velocidad, con ondas de choque o incluso ver que la capa límite se mantenga pegada sin necesidad de introducir sondas que solo perturban el flujo.

Medición de velocidad indirecta. De la misma forma que con LDV, la técnica de PIV mide la velocidad de un fluido indirectamente al medir la velocidad de partículas trazadoras dentro del flujo. En la mayoría de las aplicaciones las partículas son agregadas antes de que el experimento inicie.

Iluminación. Para las aplicaciones en fluidos en estado gaseoso una fuente de luz de alta iluminación es requerida para que el esparcimiento producido por las partículas sea suficiente y así obtener un mayor contraste en las imágenes.

Duración de un pulso de iluminación. La duración de un pulso de iluminación debe ser muy corto para que el movimiento de las partículas quede congelado durante el pulso y así evitar un efecto de corrimiento de la imagen de la partícula.

Densidad de partículas en las imágenes. Cuantitativamente hay tres distintos tipos de densidades de partículas en imágenes las cuales se muestran en la Figura 1.4. En el caso de imágenes con baja densidad de partículas (Figura 1.4 a) necesitan ser evaluadas mediante el método de seguimiento de partículas "TRACKING", por sus siglas en inglés "PTV". En el caso de densidad media de partículas (Figura 1.4 b), las imágenes de partículas individuales pueden ser muy bien detectadas, es por eso que se requiere aplicar métodos estadísticos estándar que son utilizados en la técnica de PIV. Para el último caso de densidad alta de partículas (Figura 1.4 c) no es posible detectar partículas individuales porque todas se cruzan entre si y forman un patrón moteado. En esta situación se utiliza LSV para el análisis.

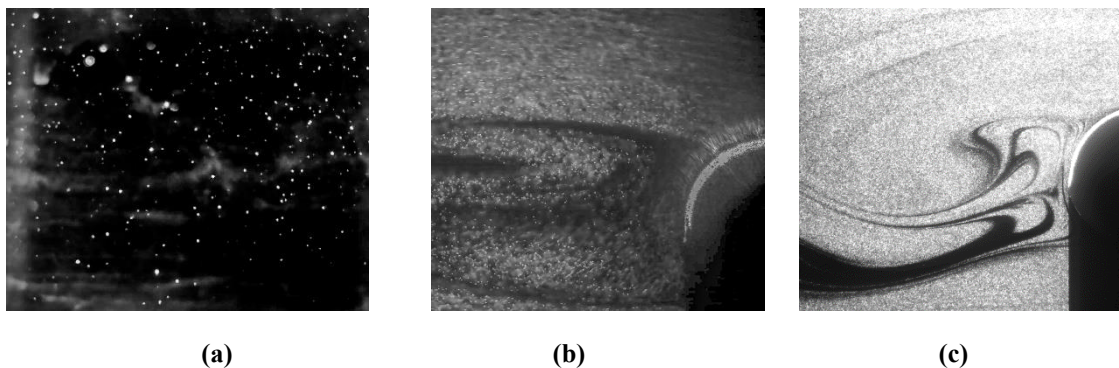


Figura 1.4 Los tres tipos de densidad de partículas de imágenes: bajo (PVT),(b) media (PIV) y (c) alta densidad (LSV).

Número de componentes del vector de velocidad. Debido a que la iluminación atraviesa un solo plano del flujo; el campo vectorial del flujo tiene únicamente dos componentes de velocidad que son determinados por métodos estándar de PIV. Los métodos para extraer la tercera componente del campo vectorial son los siguientes: técnicas estéreo, planos duales de PIV o grabación holográfica [3].

Extensión del volumen de observación. En el caso más general una extensión del volumen de observación es posible mediante el uso de técnicas de holografía. Otros métodos que son usados consisten en la discretización del volumen por varias hojas de luz paralelas [4].

Extensión en tiempo. Esto se refiere a la posibilidad de adquirir secuencias temporales de imágenes PIV, sin embargo la cantidad de imágenes que se pueden almacenar está limitado por los sistemas de grabación.

Tamaño del área de interrogación. El tamaño en el área de interrogación durante el procesamiento debe ser suficientemente pequeño para que los gradientes de velocidad no tengan una influencia significativa. El tamaño del área de interrogación depende de la velocidad del flujo que se quiere medir y la resolución espacial del mapa de velocidad; que a su vez está determinado por la resolución espacial del sensor de grabación.

1.2.1 Partículas trazadoras

A diferencia de la velocimetría por imágenes de partículas, las sondas de hilo caliente o las técnicas de prueba de presión son puntuales. Por otra parte la técnica de PIV es indirecta porque hace la medición de velocidad de las partículas en lugar de la del fluido. Por lo tanto es importante mencionar las características mecánicas de los fluidos para evitar errores significativos entre el movimiento del fluido y el de las partículas.

1.2.2 Propiedades mecánicas de la mecánica de fluidos

El principal error que las partículas introducen a la medición es debido a la influencia de las fuerzas de gravitacionales cuando la densidad del fluido en observación y las partículas seguidoras no tienen buen acoplamiento. Cuando se aplica PIV a fluidos líquidos se debe encontrar partículas cuya densidad sea compatible con la del fluido de análisis. Las partículas sólidas con buenas propiedades (fluido-mecánicas) pueden ser fácilmente encontradas. No obstante los problemas de PIV comienzan a surgir cuando se requiere enviar partículas con alta calidad en aplicaciones con gases, ya que el diámetro de las partículas seguidoras debe ser muy pequeño para asegurar un buen seguimiento dentro del flujo, además el diámetro de las partículas no debe ser tan pequeño para así tener buenas propiedades de esparcimiento de la luz. Evidentemente hay un compromiso entre estos dos factores, el cual debe ser tomado en cuenta al momento de hacer PIV en gases. Sin embargo las partículas más comunes para PIV en gases son mostradas en la Tabla 1.2.

1.2.3 Comportamiento del esparcimiento de la luz

El buen contraste de las partículas en las imágenes de PIV es directamente proporcional al esparcimiento de la fuente de luz. Es más efectivo y económico incrementar el contraste de las imágenes mediante un buen esparcimiento de las partículas que por el incremento de la potencia del láser. Generalmente es mencionado que el esparcimiento de las partículas está en función de del índice de refracción, del tamaño, de la forma y de la orientación de la misma. Además el esparcimiento de la luz depende de la polarización y del ángulo de observación. Cuando se incrementa el tamaño de la partícula mejoran el esparcimiento de la luz lo cual incrementa el contraste en las imágenes. Es importante decir que no sólo el tamaño de las partículas incrementa el esparcimiento de la luz sino también la concentración de partículas que se están agregando al fluido.

1.2.4 Generación de partículas

En la mayoría de los trabajos para tener un mejor contraste en las imágenes es deseable añadir partículas de una forma controlada. En fluidos líquidos es muy sencillo obtener una distribución de las partículas homogéneas, ya que únicamente se deben agregar y mezclar partículas sólidas al fluido hasta obtener una buena distribución y concentración. Diversas partículas pueden ser usadas para la visualización en fluidos independientemente de la técnica que se use ya sea LDV o PIV. En la Tabla 1.1 y Tabla 1.2 se enlistan las partículas usadas para fluidos en estado líquido y en estado sólido respectivamente.

Tabla 1.1. Partículas usadas para fluidos en estado líquido.

| Tipo | Material | Promedio del diámetro en μm |
|----------------|---|--|
| Sólido | Poliestireno | 10-100 |
| Sólido | Aluminio | 2-7 |
| Sólido | Esferas de vidrio | 10-100 |
| Sólido | Granulados de recubrimientos sintéticos | 10-500 |
| Líquido | Aceites | 50-500 |
| Gaseoso | Burbujas de oxígeno | 50-1000 |

Existen diferentes técnicas para la generación de partículas. Se pueden enviar polvos secos a través de camas fluidizadas o por propulsores de aire. En caso de líquidos, estos pueden ser evaporados, y enviados al fluido que se estudia, incluso estos mismos también pueden ser enviados en pequeñas gotas por medio de atomizadores. Los atomizadores pueden ser usados para dispersar partículas sólidas inmersas en vapores líquidos o para generar diminutas gotas vaporizadas mediante alta presión. Los generadores por condensación, generadores de humo y dispersión de partículas de poliestireno monodispersas son comúnmente más usados en LDV para la visualización en túneles de viento. Para mediciones con PIV, los generadores de tobera son los más utilizados ya que las partículas tienen diferentes ventajas como por ejemplo: no son tóxicas, se quedan en el aire durante muchas horas, y su tamaño no cambia significativamente (bajo excepción de algunas condiciones).

Tabla 1.2. Partículas usadas para fluidos en estado gaseoso.

| Tipo | Material | Promedio del diámetro en μm |
|----------------|---|--|
| Sólido | Poliestireno | 0.5-10 |
| Sólido | Aluminio | 2-7 |
| Sólido | Magnesio | 2-5 |
| Sólido | Micro esferas de vidrio | 30-100 |
| Sólido | Granulados de recubrimientos sintéticos | 10-50 |
| Sólido | Diocftalato | 1-10 |
| Humo | | <1 |
| Líquido | Aceites | 0.5-10 |

1.2.5 Fuentes de luz láser

Las fuentes de luz láser son ampliamente usadas en PIV por su capacidad de emitir luz a una sola longitud de onda y por la gran cantidad de energía que pueden emitir en un tiempo muy corto. Estas características son aprovechadas para hacer hojas de luz muy delgadas que iluminan las partículas trazadoras y hacen que el registro de las imágenes sea más fácil. Existen diferentes tipos de láseres que se clasifican por su longitud de onda; desde los microondas hasta los rayos X, por su potencia; alta o baja potencia, por forma de excitación; pulsados o continuos, o por sus características de su medio activo; cualquier estado de la material, cada uno de ellos tiene diferentes aplicaciones.

En PIV se puede utilizar un láser pulsado o un láser continuo. La diferencia es que con un láser pulsado se debe utilizar un sistema de sincronización de registro, y con un láser continuo esto no es necesario. Una ventaja del láser pulsado es que se puede medir un rango más alto de velocidad debido a que los pulsos son de mayor energía, esto hace que el esparcimiento de las partículas sea mayor con un tiempo de exposición más corto [5], una de sus desventajas es que no es posible resolver un flujo temporalmente debido a que la frecuencia de los pares de pulsos es muy baja.

1.2.6 Óptica de la hoja de luz

El elemento esencial para la generación de una hoja de luz es una lente cilíndrica negativa. Cuando se utiliza un láser con un ángulo de divergencia muy pequeño como por ejemplo; un láser de Argón. Se necesita solo una lente cilíndrica para generar la hoja de luz. Para un láser de Nd:YAG se requieren más de una lente cilíndrica, ya que con este láser el diámetro del haz va incrementando conforme la distancia, por esta razón al menos una lente cilíndrica debe ser dedicada a adelgazar la hoja de luz. Antes de explicar la óptica para hacer la hoja de luz más delgada se describirá como se expande el haz en una sola dirección.

Primeramente se desprecia la divergencia del haz gaussiano, es por eso que se considera colimado con un radio r_0 , dicho haz está incidiendo en una superficie plano-cóncava de distancia focal $-f$; en la Figura 1.5 el radio del láser está exagerado para mayor claridad. El láser expande con la mitad del ángulo θ (aproximadamente r_0/f) desde un punto virtual puesto a una distancia f detrás de la lente hasta el infinito. En la distancia z después de la lente existirá una línea delgada de $2r_0$ de espesor (el diámetro del haz) con longitud L , ver Ecuación (1) [6]. Esta es la forma en la cual se abre el haz para la generación de la hoja de luz. Es importante mencionar que una lente cilíndrica negativa debe ser considerada como el primer elemento del sistema óptico de la hoja de luz.

$$L(z) = 2 \frac{r_0}{|f|} (z + |f|) \quad (1)$$

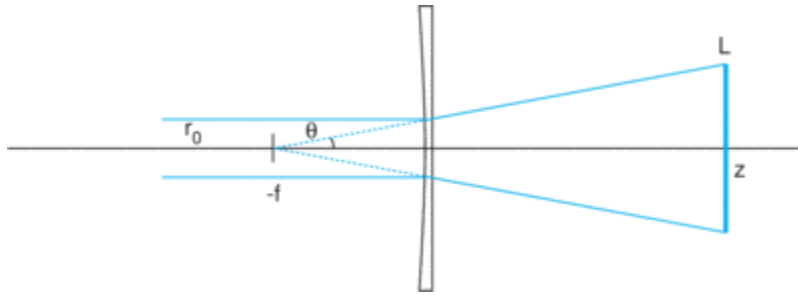


Figura 1.5. Haz colimado incidiendo en una superficie plano-cóncava de distancia focal $-f$ [6].

La razón por la cual se introduce como primer elemento una lente negativa es porque se debe evitar líneas convergentes debido a que la alta energía concentrada en un punto puede ionizar el aire de los alrededores; esto puede manchar las lentes significativamente.

El uso de lentes esféricas no permite optimizar la hoja de luz en altura y en espesor, sin embargo estas dos pueden ser cambiadas independientemente al hacer la configuración de la Figura 1.6. Estas composiciones permiten generar hojas de luz más delgadas que el diámetro del haz en cada ubicación y puede mantener un espesor muy delgado a lo largo de todo el camino óptico.

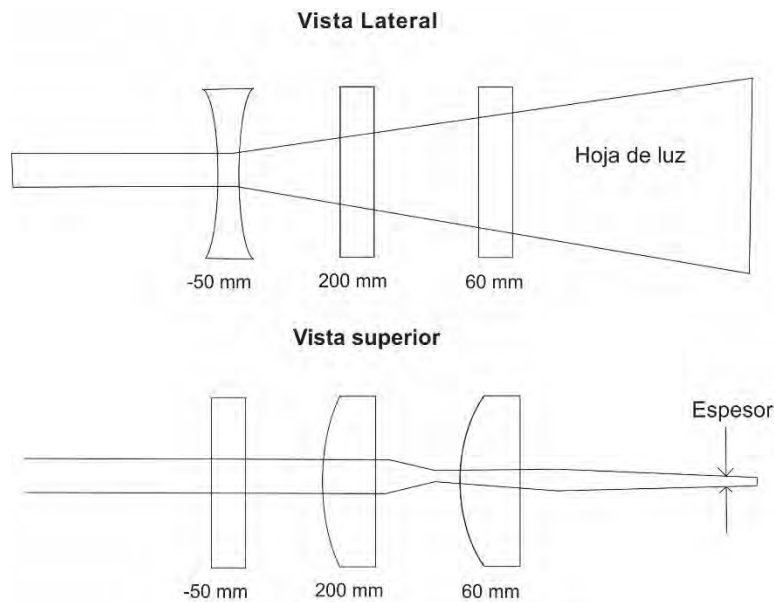


Figura 1.6. Óptica de la hoja de luz utilizando tres lentes cilíndricas, una negativa y dos positivas.

La configuración de la Figura 1.6 consta de dos lentes positivas dedicadas a adelgazar el espesor de la hoja de luz, y una negativa para abrir el haz. No solo con esa configuración es posible hacer lo mismo, sino que también se puede implementar con una lente positiva y dos negativas como se observa en la Figura 1.7.

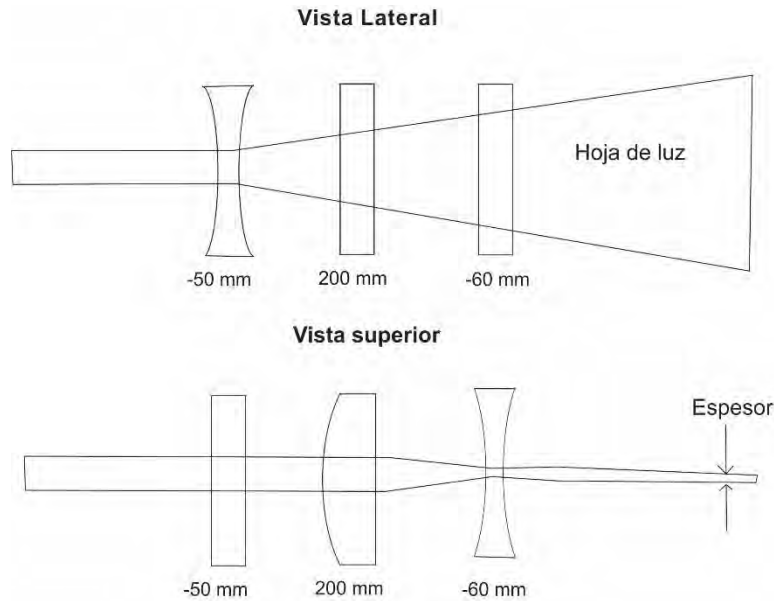


Figura 1.7. Óptica de la hoja de luz utilizando tres lentes cilíndricas, dos negativas y una positiva

Estas dos configuraciones son muy efectivas para reducir el espesor de la hoja de luz. Es de suma importancia mencionar que para conseguir una mejor optimización del uso de las lentes cilíndricas se deben hacer cálculos de óptica geométrica básicos para así poder elegir las lentes cilíndricas de mayor conveniencia. Sin duda alguna, con uno de los dos sistemas de las figuras anteriores se puede hacer más delgada que el diámetro del haz, esto es vital a la hora de hacer el enfoque del objeto en el plano de medición ya que el espesor de la hoja de luz está obligado a ser menor o igual a la profundidad de campo de la lente del sistema de registro.

1.2.7 Registro digital de imágenes

Las películas fotográficas fueron ampliamente usadas en los sistemas ópticos para detectar y grabar información óptica. En velocimetría por imagen de partículas se requiere una secuencia de imágenes de buena calidad para posteriormente ser analizadas, las propiedades que son importantes para esto son; sensibilidad espectral, velocidad y resolución. Recientemente los avances en electrónica de imágenes han proporcionado nuevas técnicas para el grabado de secuencias de imágenes PIV. La información que se obtiene en imágenes digitales esta inmediatamente disponible para ser procesada, por esta razón esta tecnología ha tenido múltiples ventajas sobre los métodos convencionales. Hoy en día hay una gama muy amplia disponible de sensores de imagen para el uso de PIV. Estos son integrados para hacer sistemas completos de adquisición de imágenes. Las cámaras de alta velocidad han evolucionado y han hecho que la evaluación en PIV tenga rangos más altos de velocidad. Las principales características de las cámaras de alta velocidad son; la frecuencia de muestreo, la resolución espacial del sensor, el tiempo de exposición, la sensibilidad y la memoria de almacenamiento.

1.2.7.1 Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo (FPS) es la medida del número de fotogramas por segundo que puede adquirir una cámara. Para la mayoría de las cámaras de video convencionales este parámetro varía entre 20 fps hasta 60 fps, pero las cámaras de alta velocidad van desde 3000 fps hasta los 35,000 fps a la máxima resolución espacial [2]. Estas cámaras pueden adquirir más imágenes por segundo que su límite, si se adquieren menos píxeles del sensor, es decir la adquisición puede ser concentrada en una menor región de interés (ROI).

1.2.7.2 Resolución espacial y de intensidad.

Intuitivamente la resolución espacial es la medida del detalle más pequeño en una imagen, cuantitativamente la resolución espacial es el número de píxeles que existen en el sensor a lo largo y a lo ancho. Es por eso que entre más píxeles se tengan se puede obtener mejor detalle del objeto capturado siempre y cuando las aberraciones del sistema óptico lo permitan. En PIV es muy importante la resolución espacial debido a que el procesamiento de las imágenes depende del número de píxeles que existan en cada imagen adquirida.

La resolución en intensidad está ligado al número de bits que tienen los píxeles del sensor, entre más bits de profundidad se tenga en el sensor, se puede detectar niveles más pequeños de cambios de intensidad [7]. La profundidad en bits en PIV no es tan crítica, es por eso que en cámaras de alta velocidad suele ser de 8 bits lo cual le permite ser más rápida.

1.2.7.3 Tiempo de exposición.

El obturador es una apertura que se abre al momento de adquirir una imagen y limita el tiempo que los rayos alcanzan el sensor digital, dicho tiempo recibe el nombre de tiempo de exposición. En las cámaras de alta velocidad el máximo tiempo de exposición debe ser igual al inverso de la frecuencia de muestreo menos el tiempo de conversión de analógico a digital y el tiempo de escritura en la memoria ($2\mu s$), esto se expresa en la ecuación (2). Mientras que el tiempo de mínimo exposición está limitado al inverso de la máxima frecuencia de muestreo de la cámara el cual se aprecia en la ecuación (3). Por ejemplo; Si se tiene una cámara de alta velocidad cuya máxima frecuencia de muestreo es de 5000 fps y se hace una adquisición de imágenes a 2500 fps, el máximo tiempo de exposición es $398\ \mu s$, mientras que el mínimo tiempo de exposición siempre puede ser menor que $398\ \mu s$. El tiempo de exposición puede variar sin salirse de los rangos mencionados. Comprender esto es de suma importancia al momento de hacer PIV porque comúnmente este parámetro es variado para conseguir el mejor contraste en las imágenes.

$$t_{max} = \frac{1}{f_s} - t_{cw} \quad (2)$$

$$t_{min} < \frac{1}{f_{s\ max}} - t_{cw} \quad (3)$$

El tiempo de exposición también es ajustado en base a la velocidad a la que ocurre el fenómeno, entre más corto el tiempo de exposición se pueden capturar fenómenos más rápidos (congelado de una imagen), la desventaja de esto es que requiere mayor intensidad de iluminación. En PIV es necesario tener un balance entre la frecuencia de muestreo, el tiempo de exposición y la potencia de la hoja de luz, ya que si la frecuencia de muestreo no es lo suficiente, las partículas trazadoras se verán corridas; si el tiempo de exposición y la potencia del láser no son las adecuadas puede haber poco esparcimiento de las partículas hacia el sensor de la cámara.

1.2.7.4 Sensibilidad

El concepto de la sensibilidad ISO se ha mantenido en la fotografía digital, a diferencia que en las películas fotográficas la sensibilidad a la luz en un sensor electrónico significa la amplificación de la señal captada antes de su digitalización. Si la sensibilidad es baja se requiere más tiempo de exposición, pero si esta es alta requiere un menor tiempo de exposición debido a la amplificación hecha electrónicamente. La desventaja de hacer una captura a una sensibilidad alta es el nivel de ruido que se presenta en el sensor lo cual trae lecturas incorrectas, porque al momento de amplificar la señal también el ruido es amplificado. Esto puede ser imperceptible o incluso puede degradar completamente una imagen.

En PIV este parámetro puede ser usado como última opción para mejorar la luz capturada proveniente del esparcimiento de las partículas. En las cámaras de alta velocidad no se tienen diversas sensibilidades como en una cámara convencional, por lo general solo es posible manejar dos sensibilidades; 3000 ISO y 6000 ISO (en cámara monocromática) [2].

1.2.7.5 Memoria de almacenamiento

Los grandes avances en electrónica han permitido que las cámaras de alta velocidad puedan grabar mayor número de imágenes, esto ha evolucionado la técnica de PIV debido a que con un número mayor de imágenes es posible tener más información del comportamiento de los fluidos. Cuando el flujo es de alta velocidad el tiempo entre las adquisiciones debe ser menor, esto hace que para poder seguir la evolución del fluido en el tiempo sea necesario una gran capacidad de memoria y una rápida escritura.

Las cámaras rápidas actuales, dependiendo del tamaño del sensor pueden grabar en su memoria más de 89,570 imágenes sin necesidad de transferirlas a una computadora, esto significa a 5300 fps se pudiera grabar durante 16.9 segundos. En la técnica PIV esto permite no solo evaluar el flujo espacialmente sino también temporalmente [2].

1.3 Medición de velocidad en tres dimensiones (PIV 3D)

Los métodos clásicos de PIV sufren de diversas desventajas; la primera es que solo obtienen campos vectoriales en el plano de la hoja de luz (2D), la segunda es que el esparcimiento de las partículas en una vista lateral es bajo, y por último, no puede hacer frente a gradientes de velocidad muy altos.

Se han propuesto técnicas alternativas para medición de flujos en tres dimensiones a costa de la complejidad del acceso óptico y en algunos casos de la capacidad de hacer mediciones en tiempo real. Estas complejidades experimentales y de procesamiento asociadas a la medición de la tercera componente de velocidad han obstaculizado la aceptación por parte de la comunidad científica. Las técnicas comúnmente utilizadas para medir velocidad en tres dimensiones son; múltiple movimiento de hojas de luz, PIV holográfico, PIV estero o incluso combinaciones de todas ellas [8].

1.3.1 PIV estéreo

PIV estéreo determina la velocidad del flujo en tres dimensiones a diferencia que el PIV tradicional que solo lo hace en dos. Para obtener las tres componentes de velocidad es necesario usar dos cámaras para aprovechar los efectos de profundidad producidos por una vista estereoscópica.

Existen muchos sistemas donde se usan múltiples cámaras, uno de ellos es el trabajo de Delgado [9] que describe uno de los más grandes intentos de hacer PIV estéreo. El artículo describe dos técnicas para hacer el arreglo de PIV estéreo; uno donde dos cámaras son paralelas entre si y el otro donde las dos cámaras tienen un ángulo entre ellas. En este artículo también se describen las ventajas y desventajas que tiene cada uno de estos métodos.

1.3.2 PIV holográfico

La técnica de PIV holográfico mide las tres componentes de velocidad en un flujo volumétrico, la película holográfica tiene mucha más resolución que la que se usa en PIV. Esto también requiere mayor intensidad de luz para hacer la grabación de las partículas consecuentemente se requiere más esparcimiento de la luz para obtener imágenes de buena calidad.

La holografía fuera de eje es fácilmente perturbada por vibraciones y ruido del haz de referencia durante la reconstrucción del holograma. El arreglo consiste en un haz láser que cruza la región del flujo con partículas. La luz que no es esparcida es el haz de referencia mientras que la luz esparcida por las partículas es el haz objeto; estos dos son superpuestos y su interferencia es grabada en una placa holográfica grabadora. La información tridimensional es grabada mediante un sistema óptica con amplia profundidad de campo, posteriormente el holograma de las partículas es reconstruido digitalmente en cada plano para después con otro algoritmo para poder determinar las tres componentes del campo de velocidades.

1.3.3 Hojas de luz paralelas

Con el uso de hojas de luz paralelas de diferentes colores, el movimiento de las partículas puede ser obtenido tras la separación de los colores en las imágenes [10]. También la distribución de intensidad a lo largo de la hoja de luz puede ser usada para determinar la posición al ser relacionada con el perfil de intensidades [11]. En el desarrollo de este trabajo se presenta un método que consiste en hacer el desplazamiento de la hoja de luz; en el cual se obtiene información en múltiples planos donde existen campos vectoriales que son integrados para formar campos de vectores en tercera dimensión.

2 Diseño de la instrumentación para la medición de velocidad en volumen dentro de un túnel de viento.

El objetivo del presente trabajo fue medir velocidad en un volumen dentro de un túnel de viento, para eso fue necesario diseñar y construir todos los elementos del arreglo experimental, los cuales son: túnel de viento, dosificación de partículas y la corredera para hacer desplazamiento transversal del túnel.

La propuesta para medir velocidad en un volumen se basa en medir en múltiples planos paralelos con un sistema PIV tradicional. La forma de hacer esto es desplazar la hoja de luz transversalmente a lo ancho del volumen a medir. Esta tarea es sumamente compleja debido a los problemas que existen al mantener siempre una misma alineación del láser y de las lentes cilíndricas, por esta razón se optó por desplazar completamente el túnel de viento con un mecanismo controlado electrónicamente.

De esta forma se hicieron múltiples adquisiciones a lo largo del volumen a medir, para integrar el conjunto de información que es necesaria para obtener una medición volumétrica. Es de suma importancia mencionar que el resultado final del volumen medido está compuesto por el campo vectorial promedio en cada plano.

2.1 Diseño de un túnel de viento de baja velocidad

Uno de los objetivos de esta tesis fue el desarrollo de un prototipo de un túnel de viento de baja velocidad en base a las necesidades y al espacio disponible en el Laboratorio de Pruebas Ópticas No Destructivas (LPOND).

La técnica de velocimetría por imágenes de partículas puede ser aplicada a cualquier flujo en cualquier régimen de velocidad, evidentemente el nivel de dificultad y el costo para su implementación se incrementa con la velocidad. Por esta razón fue diseñado un túnel de viento para baja velocidad, lo cual cumple con el objetivo fundamental de este trabajo que es hacer instrumentación óptica.

Las dimensiones geométricas fueron especificadas de acuerdo al máximo espacio disponible y el máximo tamaño de objeto de estudio que puede ser analizado en la sección de trabajo. La velocidad máxima de operación fue elegida considerando el tamaño del motor

necesario para llegar a la velocidad especificada. La hoja de datos de los motores extractores que se pueden usar para diversas aplicaciones se encuentra en el Apéndice A Figura 1.

El motor seleccionado por las razones ya mencionadas tiene un caudal de 420 pies cúbicos por minuto (Figura 2.9). Con la ecuación (4) se estimó la velocidad máxima del túnel de viento de acuerdo a un área transversal de 20x20 cm. Donde v_1 , A_1 son la velocidad y el área de la sección de trabajo respectivamente, Q es el caudal del motor extractor.

$$Q = v_1 A_1 \quad (4)$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{\left(420 \frac{ft^3}{min}\right) \left(\frac{1 m}{3.28 ft}\right)^3 \left(\frac{1 min}{60 s}\right)}{0.20 m * 0.20 m} = 4.96 \frac{m}{s}$$

Con el cálculo anterior se estimó que la velocidad máxima alcanzada en la sección de trabajo es de 4.96 m/s. El túnel de viento está compuesto por cuatro etapas: cono de contracción, sección de trabajo, difusor y motor extractor [12,13] como se observa en la Figura 2.1. La longitud total del túnel de viento es de 175 cm, las dimensiones de sus elementos de forma genérica son enlistadas en la Tabla 2.1 mientras que las dimensiones de forma específica son mostrados en los en los planos los cuales encontrados en el Apéndice A Figura 2-15.

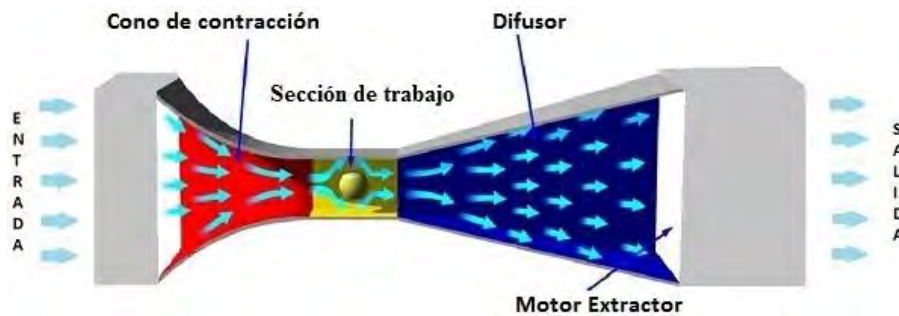


Figura 2.1. Elementos de un túnel de viento.

Tabla 2.1. Dimensiones de los componentes del túnel de viento.

| Elemento | Longitud (cm) | Dimensión especificada (cm) |
|----------------------------|---------------|---|
| Cono de contracción | 52.33 | Sección de entrada 56x56, Sección de salida 20x20 |
| Sección de trabajo | 51.2 | Sección constante de 20x20 |
| Difusor | 52.67 | Sección de entrada 20x20, sección de salida 33.32x33.32 |
| Motor extractor | 19.05 | Diámetro 20.32 |

El cono de contracción y el difusor fueron hechos de un material llamado mampara que es un tipo de unicel de alta densidad (Figura 2.2 – 2.5), este material es muy ligero y fácil de trabajar. Estas dos partes fueron unidas a la cámara de pruebas mediante bridas de madera.

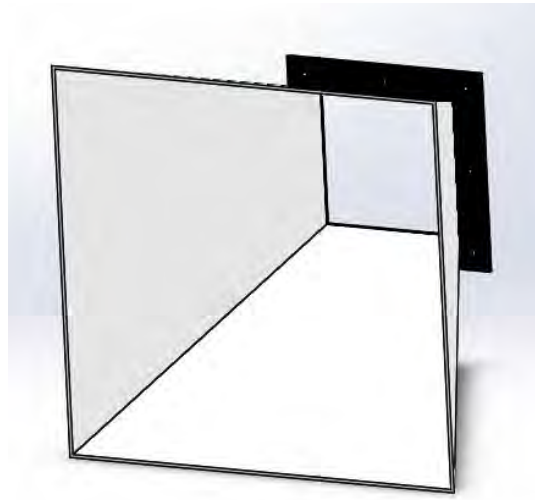


Figura 2.2. Vista isométrica frontal del cono de contracción.

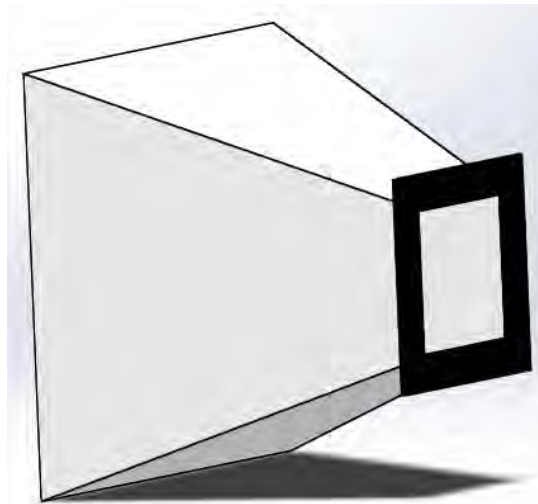


Figura 2.3 Vista isométrica trasera del cono de contracción.



Figura 2.4. Vista isométrica frontal del difusor.

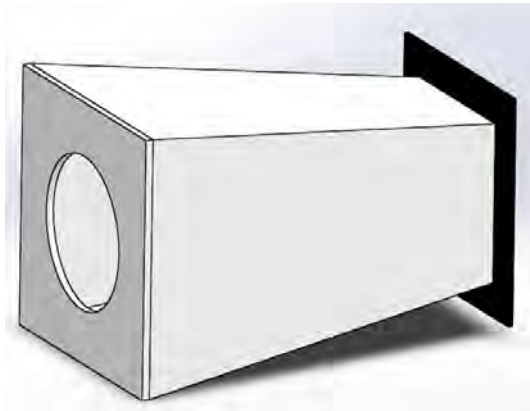


Figura 2.5. Vista isométrica lateral del difusor.

La sección de trabajo (Figura 2.6) es de acrílico de 6mm de espesor, fue cortada con láser y pegada con pegamento para acrílico. Esta sección se diseñó con dos puertas para tener fácil acceso al objeto de trabajo. Además se hicieron tres pares de puertas con perforaciones de diferentes diámetros con el objetivo de ingresar objetos de estudio de diferentes tamaños o incluso para montar accesorios de medición de fuerzas aerodinámicas. Un elemento muy importante de esta sección es la rejilla que elimina las componentes de velocidad que no son paralelas a la dirección del flujo (Figura 2.7), esta fue hecha de una lámina de policarbonato. Este elemento debe ser ensamblado a la sección de trabajo como se observa en la Figura 2.8.

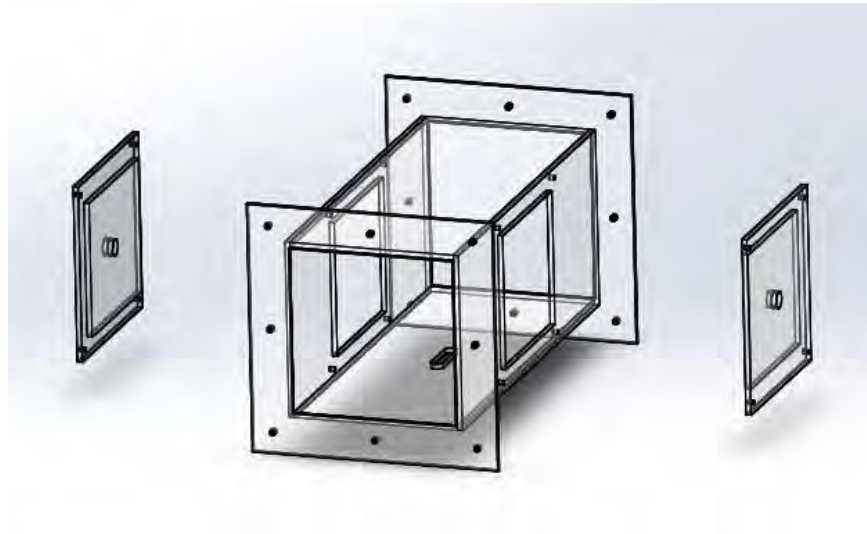


Figura 2.6. Sección de trabajo.

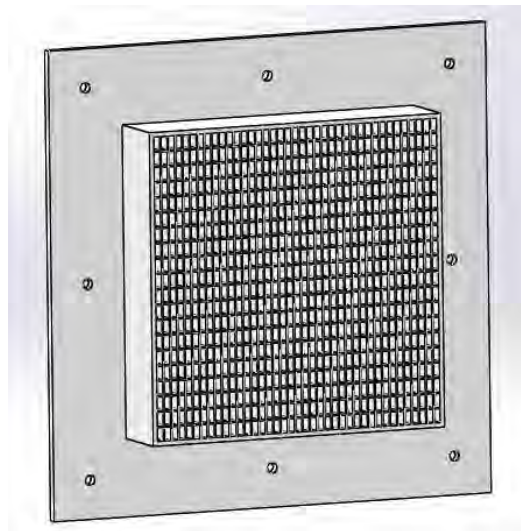


Figura 2.7. Rejilla para la eliminación de componentes de velocidad que no son paralelos a la dirección del flujo.

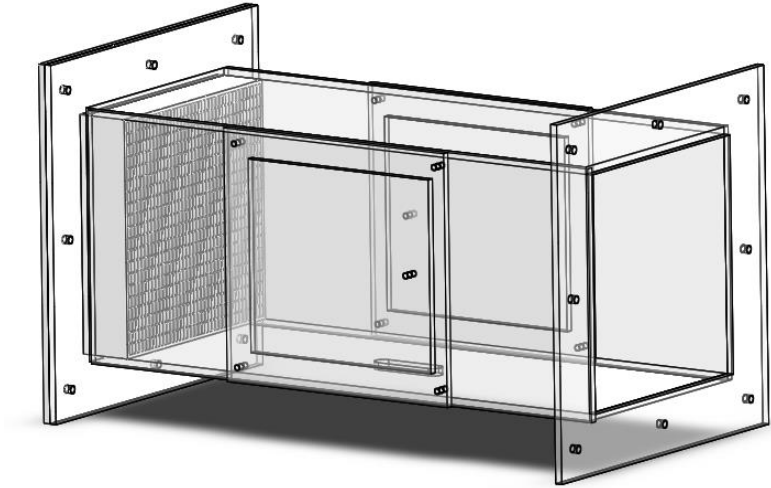


Figura 2.8. Ensamble de la sección de pruebas con la rejilla de eliminación de componentes de velocidad no deseadas.

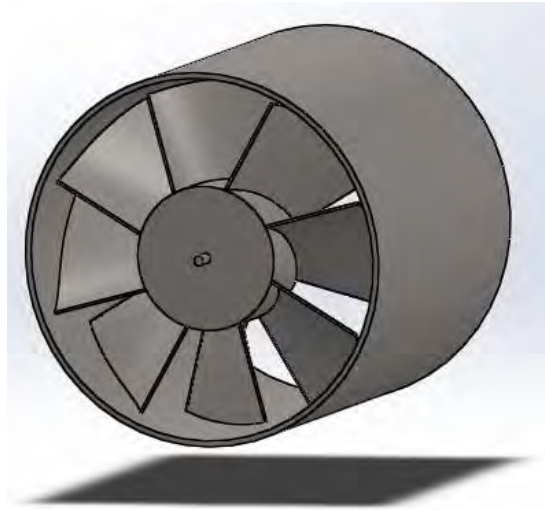


Figura 2.9. Motor extractor del túnel de viento.

Todos los elementos del túnel de viento fueron ensamblados en una mesa de sujeción que fue diseñada especialmente para soportar el túnel de viento como se observa en la Figura 2.10. El túnel de viento puede alcanzar una velocidad máxima de 4.96 m/s sin embargo en la siguiente sección se hablará del control de velocidad que se hizo para obtener velocidades intermedias con la intención de tener diferentes números de Reynolds en la sección de trabajo.

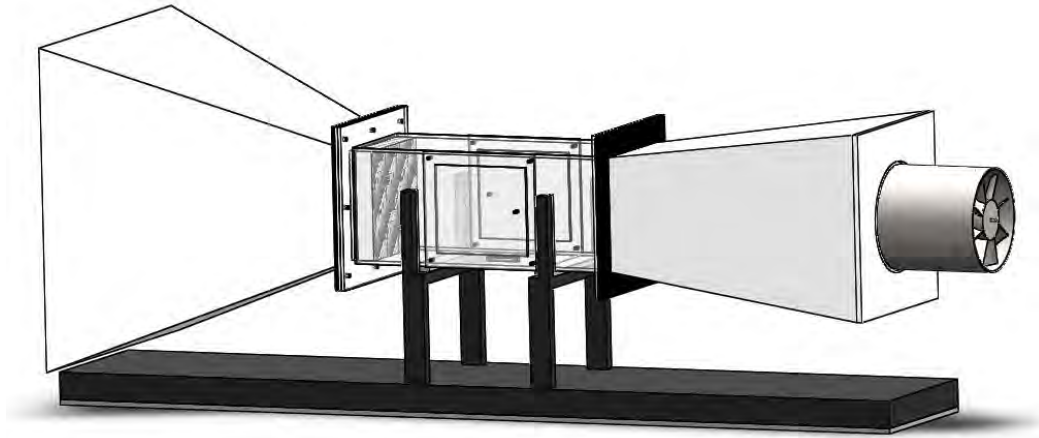


Figura 2.10. Túnel de viento

2.1.1 Control de velocidad del túnel de viento

Como se mencionó anteriormente, la velocidad en el túnel de viento puede ser variada desde un mínimo hasta la máxima velocidad estimada que es 4.96 m/s. Esto fue posible al controlar la velocidad de giro de las aspas del motor extractor. Uno de los métodos que se pueden usar para esto es hacer uso de un variador de frecuencia. Esto es lo más óptimo debido que la eficiencia del motor no se ve afectada, pero el costo de un variador de frecuencia es elevado. Es este motivo se implementó una técnica para variar la velocidad del motor que consiste en variación del voltaje RMS o voltaje eficaz de alimentación del motor, a pesar que la eficiencia del motor disminuye (consume mayor potencia) es muy efectiva y económica ya que los componentes electrónicos requeridos son de bajo costo y la dificultad de implementación es menor.

El voltaje eficaz [14] es calculado con la ecuación (5) que significa determinar el valor de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados, en otras palabras es el promedio del área al cuadrado como se ejemplifica con la ecuación (6) de tal manera que si el área de la señal de voltaje es modificada, el voltaje eficaz también. Por ende la corriente eléctrica suministrada de cualquier componente electrónico varía de acuerdo a la modificación hecha en la señal de alimentación. Esto tiene impacto en el trabajo hecho por el componente eléctrico, por ejemplo; en una lámpara (resistencia eléctrica) el efecto es la variación de la intensidad de la luz mientras que el efecto en un motor es la velocidad de giro del rotor.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (5)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\text{área}(V^2(t))}{T}} \quad (6)$$

Por lo anterior esta técnica fue usada para controlar la velocidad del motor extractor. La forma de controlar esta variable es recortando la onda sinusoidal de alimentación (Freq. 60 Hz) mediante el uso de un dispositivo semiconductor de la familia de los tiristores (triac), este es un tríodo bidireccional de corriente alterna que permite conducir la corriente en cualquier momento bajo la estimulación de voltaje en sus compuertas llamada GATE [14]. Esto permite modificar la onda sinusoidal al recortar o alargar el ciclo útil de trabajo mediante la variable de control T_1 que es el tiempo transcurrido desde el cruce por cero hasta el disparo del triac; como se puede observar en la Figura 2.11.

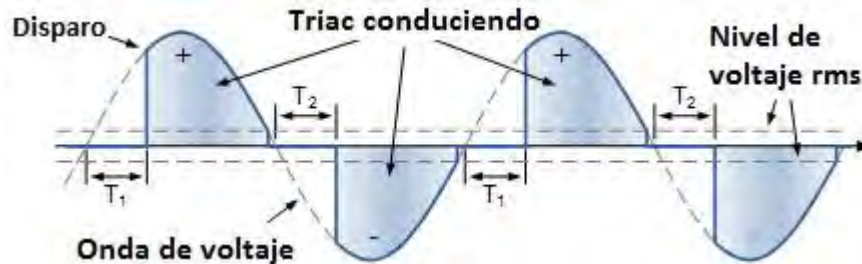


Figura 2.11. Conducción de la onda de voltaje de un triac.

Para implementar lo anterior en una tarjeta electrónica fue necesario realizar un circuito electrónico de tres etapas. La primera es la detección de cruce por cero, que a grosso modo tiene como salida un voltaje en alto cada vez que la onda eléctrica tiene cero volts (recuadro rojo de la Figura 2.12). El recuadro azul de la Figura 2.12 corresponde a la etapa de potencia con la cual se dispara el triac para el control del motor; esta necesita un pulso de activación para que el triac conduzca.

La tercera etapa consta de un microcontrolador Atmega-328 [15], el cual tiene como entrada digital el pulso de detección por cero y como salida digital un pulso que es necesario para disparo del triac. Es por eso que en el diagrama electrónico existen dos terminales aisladas. Lo importante para controlar el motor fue programado en un microcontrolador, a grandes rasgos el programa detecta el momento en el que la señal eléctrica tiene cero volts (con ayuda del pulso detector por cero) y espera un tiempo T_1 para disparar el triac. Este tiempo puede variar entre 0 segundos y menos que 8.33 milisegundos dependiendo de la velocidad que se quiera tener en el motor extractor. Cuando el triac se dispara inmediatamente después del cruce por cero, la velocidad es la máxima debido a que se tiene la mayor área útil de la señal eléctrica. El máximo tiempo de espera para disparar el triac es de 8.33 milisegundos porque esto dura el ciclo medio de una señal eléctrica a 60 Hz.

Este sistema de control es de lazo abierto porque la velocidad de giro del motor es establecida con un potenciómetro leído por el microcontrolador (Modo maestro), el cuál asigna el tiempo mínimo y máximo de acuerdo a la lectura. En la tarjeta electrónica también es posible establecer la velocidad de giro mediante una señal de entrada PWM a 60 Hz (Modo esclavo), esto para poder controlar el motor del túnel de viento con una tarjeta electrónica maestra que solo administre o sincronice los recursos de este y otros sistemas electrónicos.

Una ventaja de haber implementado el control del motor en un microcontrolador es que a futuro es posible hacer un controlador de lazo cerrado con tan solo un sensor de retroalimentación. Este sensor puede ser de velocidad de giro del rotor o preferentemente un tubo de pitot dentro del túnel de viento. Con este último se podría realizar un sistema de control más robusto donde la variable a controlar sería la velocidad de la corriente de aire en la sección de pruebas.

La idea del control del motor fue plasmada en palabras y con un sólo diagrama electrónico con la intención explicar de la forma más sencilla lo que se hizo, ya que este tema se resumió bastante por la razón que el control de velocidad fue solo una de las muchas cosas que se hicieron para mejorar las condiciones del arreglo experimental de PIV, que en conjunto contribuyeron al objetivo final de este trabajo. No obstante el código de programación, el diagrama electrónico, los componentes usados y el PCB quedan documentados en el Apéndice A Figura 16-26.

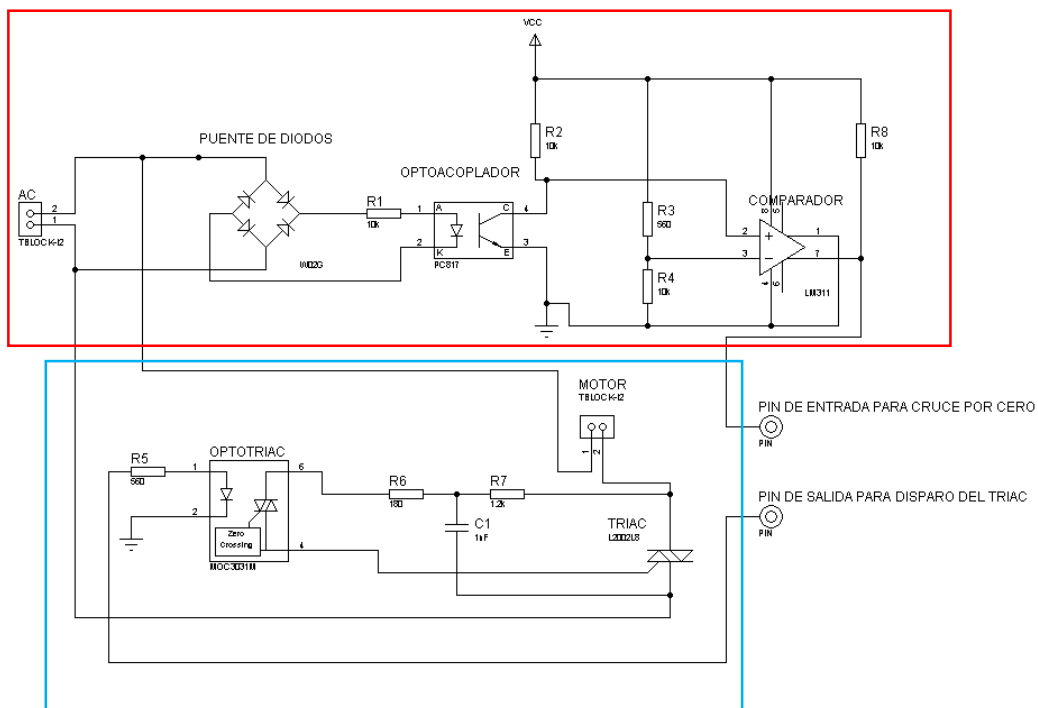


Figura 2.12. Diagrama electrónico para el control del motor extractor.

2.2 Dosificación de partículas

En este trabajo la dosificación de partículas fue de vital importancia para la obtención imágenes de buena calidad. El uso de partículas de manera homogénea en fluidos en estado gaseoso se vuelve un tema difícil de solucionar por la complejidad que implica tener un concentrado de partículas perfectamente uniforme. Sin embargo, se desarrolló un sistema

para que la dosificación de partículas trazadoras se mantuviera constante por periodos largos de tiempo, esto para poder hacer múltiples adquisiciones. Dicho sistema consiste en una máquina generadora de humo, una cámara de concentración y un ventilador para la expulsión de las partículas de forma controlada. Cada uno de estos elementos cuenta con detalles importantes que ayudan a obtener niveles de concentración homogéneos de partículas, estos son explicados en los siguientes apartados.

2.2.1 Máquina generadora de humo.

La máquina generadora de humo cuenta con parámetros controlados electrónicamente que favorecen el flujo de partículas. Las partículas que se generan se producen quemando aceite. El dispositivo que realiza esta función fue diseñado para poder variar la temperatura y el caudal del líquido de humo que es quemado. La máquina generadora de humo consta de un serpentín de cobre y una resistencia tubular (1/2X8") de 127 V a 600 W como los que se muestran en la Figura 2.13. Para hacer un disparo de humo, el serpentín debe ser calentado por la resistencia a aproximadamente 200°C para después bombear por el conducto interno el líquido para generar humo. La composición de líquido que se usa para generar humo es: 40% glicerina, 40% agua destilada y 20% Alcohol. De esta manera el líquido es quemado y se generan diminutas partículas. Durante este proceso el líquido de humo enfría el serpentín, esto hace que se tenga que volver a precalentar para hacer otro disparo. La temperatura de precalentado tiene que estar entre un rango de 100°C hasta los 300°C, la variación de la temperatura hace que el tiempo de disparo sea más corto o más largo.

Cambiando la temperatura del serpentín se tiene control del máximo tiempo de generación de humo, pero también al dosificar el caudal del líquido bombeado se tiene el control del líquido que se convierte en partículas trazadoras de flujo.

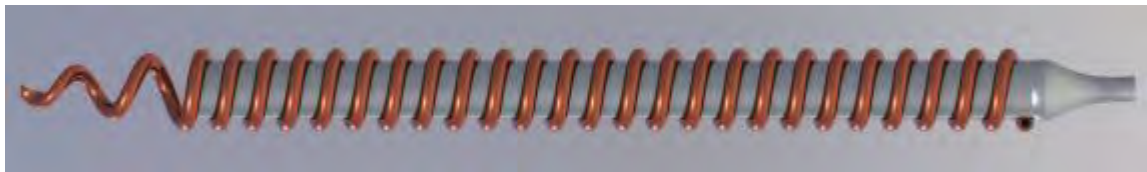


Figura 2.13. Serpentín y resistencia tubular de la máquina de humo.

Para controlar la temperatura del serpentín y el caudal de líquido de humo se implementó un arreglo electrónico que consta de dos partes: la primera es una bomba de agua con un motor de corriente directa, donde una señal PWM a 1kHz controla la velocidad de rotación. Esta señal modula el ancho de pulso de 1 a 100% para variar el caudal de líquido bombeado. La segunda parte es un sistema para el control de la temperatura del serpentín que consta de un sensor para la medición y un relevador para el calentado de la resistencia. Todo esto fue hecho en tres módulos. Siendo estos; 1-Etapa de potencia para el relevador de la resistencia y la bomba de humo. 2-Relevador de la resistencia del serpentín. 3-Tarjeta de conexiones entre los módulos, sensores y microcontrolador. Los diagramas electrónicos y el código para el control se encuentran en el Apéndice A Figura 27.

2.2.2 Cámara de concentración con ventilador de expulsión

La concentración de partículas en un depósito tiene el objetivo de acumular gran cantidad de ellas para mantener por periodos largos la expulsión hacia el túnel de viento. Incluso también sirve para hacer que el humo tenga densidad constante en todas sus regiones, lo cual favorece significativamente a la dosificación de partículas en el arreglo de PIV. En la Figura 2.14 se observa esta cámara de concentración que consta del recipiente, un ducto y un ventilador. El ducto tiene la finalidad de acercar la expulsión de partículas a la entrada del túnel de viento, es por ello que tiene grandes dimensiones (Las dimensiones se muestran en Apéndice A Figura 36).

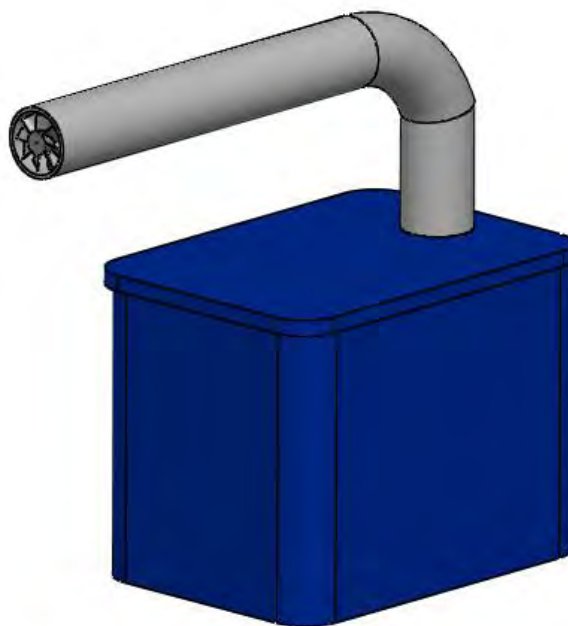


Figura 2.14. Cámara de concentración, ducto y ventilador expulsor de humo.

Para tener una mejor dosificación de partículas se implementó un regulador de la velocidad que usa el mismo circuito electrónico que controla la bomba de la máquina de humo. Es por ello que circuito y el programa se omiten en los anexos.

Con todo lo anterior la dosificación de humo es más fácil de manejar ya que las tres variables de control (temperatura del serpentín, caudal de líquido de humo y velocidad del ventilador en la cámara de concentración) permiten tener una amplia libertad en la dosificación de las partículas (variable controlada) para mejorar el contraste en las imágenes adquiridas por la cámara de alta velocidad.

2.3 Sistema de extracción de partículas

La máquina de humo suministra al túnel de viento un gran volumen de partículas que son necesarias para adquirir imágenes durante varios segundos. El túnel de viento no tiene retroalimentación de flujo es por eso que un sistema de extracción fue requerido. Esto evita

que las partículas de aceite dañen componentes, instrumentos, lentes o inclusive laboratorios vecinos.

A groso modo el sistema de extracción es un ducto de acero (Figura 2.15) con dimensiones suficientes (Apéndice A Figura 37) para conectar el motor del túnel de viento a una campana de extracción instalada en el laboratorio. Dentro del ducto hay un motor extractor igual al que se instaló en el túnel de viento. Esto porque en el primer momento en que se comenzaron a hacer pruebas de PIV, se detectó que la velocidad en la cámara de pruebas disminuyó por la conexión del tubo de extracción. Esto fue como haber conectado más carga al motor. Con el motor agregado dentro del ducto se logró recuperar la velocidad en la sección de pruebas del túnel, para mayor versatilidad este también tiene implementado un controlador de velocidad igual al del túnel de viento. Es importante mencionar que la velocidad del túnel de viento sin el sistema de extracción fue medida con un tubo de pitot y coincide a la perfección con la velocidad máxima del diseño.



Figura 2.15. Ducto de extracción de partículas.

2.4 Mecanismo de corredera para el desplazamiento del túnel de viento para medición de velocidad volumétrica.

La técnica utilizada para medición de velocidad en un volumen se basa en el desplazamiento de la hoja de luz para la obtención de imágenes en planos paralelos dentro de la sección de trabajo del túnel de viento. Para esto fue necesario implementar un mecanismo de corredera que mueve el túnel de viento completamente. El tener la hoja de luz en un plano fijo permitió desplazar en cualquier dirección el túnel de viento y así obtener cualquier posición dentro del volumen a medir. En la Figura 2.16 se observa el mecanismo de desplazamiento con un grado de libertad, el cuál consiste en una base con ruedas que se desplaza sobre una mesa lisa mediante un motor a pasos que esta conectado con una banda de transmisión de potencia a un tornillo con rosca ACME. Este sistema de desplazamiento permite el movimiento libre en una sola dirección como se ejemplifica en la Figura 2.17. La resolución de desplazamiento depende del motor a pasos y de la rosca del tornillo. El tornillo

acme tiene un desplazamiento de 2.54 milímetros por revolución y el motor a pasos tiene 200 pasos por giro, por lo tanto, el mínimo desplazamiento posible es de 12.7 micras, esto considerando que el motor gira con paso completo pero también puede girar con medio paso.

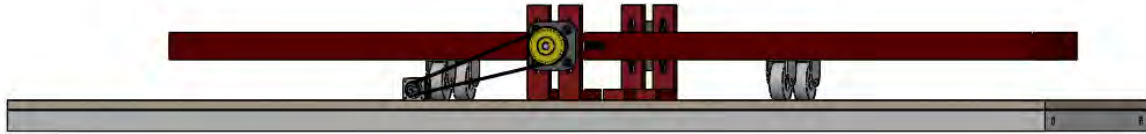


Figura 2.16. Mecanismo de desplazamiento del túnel de viento.

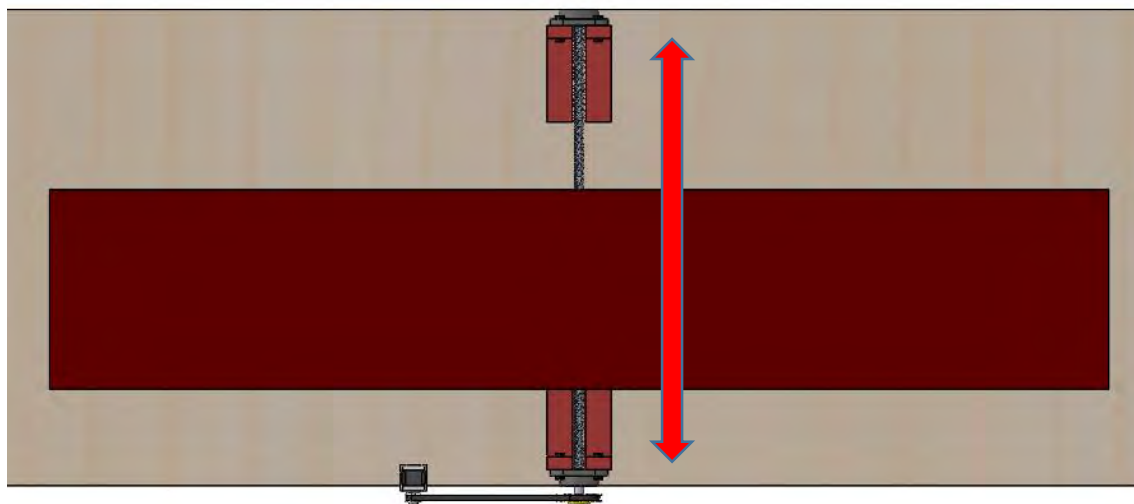


Figura 2.17. Mecanismo de desplazamiento en una sola dirección mediante un motor a pasos conectado con una banda de transmisión a un tornillo con rosca ACME.

El desplazamiento del túnel de viento fue controlado por una tarjeta electrónica y una interface de usuario que permiten hacer el desplazamiento de dos formas. La primera es ingresando como parámetros el número de divisiones, del desplazamiento entre divisiones, esto para facilitar la adquisición de imágenes de PIV en planos diferentes. La segunda es especificando la carrera total y el número el número de divisiones de la carrera, a estas dos configuraciones se les agrega un tiempo de esperar entre desplazamientos para permitir a la

cámara hacer adquisiciones de las imágenes de PIV en cada plano. El mecanismo de desplazamiento con el túnel de viento es ilustrado en la Figura 2.18.

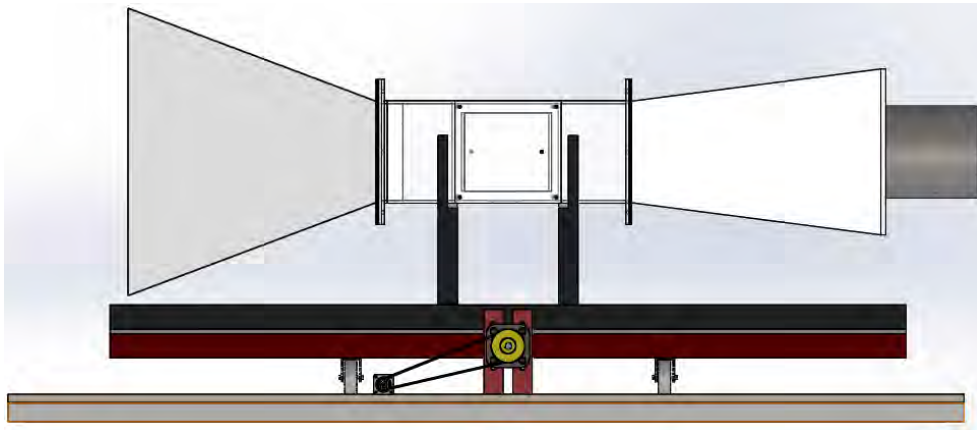


Figura 2.18. Mecanismo de desplazamiento con el túnel de viento.

3 Procedimiento experimental para medir velocidad.

En el capítulo anterior se explicaron los elementos necesarios para la instrumentación en el arreglo experimental para medir campos de velocidad flujos de fluidos, también se describieron algunos sistemas para el mejoramiento de la condiciones del arreglo de PIV con múltiples planos paralelos. En este capítulo se desarrolla la parte técnica de la elaboración del arreglo y el procedimiento que se siguió para la obtención de imágenes. Además se explica el manejo de una cámara digital de alta velocidad, de un láser de alta potencia, la elaboración de la hoja de luz y los parámetros que contribuyen la obtención de las imágenes de PIV con buena calidad.

3.1 Cámara digital de alta velocidad

La frecuencia de muestreo, el tiempo de exposición y la sensibilidad de la cámara rápida son parámetros muy importantes para que las imágenes registradas tengan un buen contraste de partículas. Adicional a esto, el flujo con las partículas trazadoras debe estar lo suficientemente muestreado para que exista correlación entre imágenes que son adquiridas consecutivamente. El balance entre; la configuración de la cámara, la potencia del láser y el esparcimiento de las partículas son vitales para extraer de las imágenes la información de la velocidad de las partículas que sigue el flujo.

La cámara de alta velocidad utilizada en los experimentos es de la serie Y7-3S1-M-8GB-PIV de la marca IDT [2]. Esta cámara tiene las características de la Tabla 3.1. La frecuencia de muestreo, el tiempo de exposición y la sensibilidad de la cámara son configurados mediante la interfaz gráfica de la cámara (Motion Studio). En el menú de la Figura 3.1 (a) es posible cambiar la sensibilidad del sensor (con valores de 1, 1.4 y 2), la frecuencia de muestreo (desde 30 hasta 5,300 Hz), el tiempo de exposición (el cual está en

función de la frecuencia de muestreo) y otros parámetros. En el menú la Figura 3.1 (b) se puede configurar; el número de imágenes que se desean adquirir y el modo de grabación de la cámara. En el menú de la Figura 3.1 (c) es posible hacer modificaciones de; contraste, acentuar y brillo de las imágenes que son adquiridas.

Existen tres modos de grabado de la cámara Y7-3S1-M-8GB-PIV, los cuales son explicados a continuación:

- **Normal.** Esta forma de operación esencialmente crea una sola sección de memoria, en la cual se adquiere el número de imágenes especificadas, y cada vez que se requiere hacer una nueva adquisición, las imágenes anteriores son borradas para liberar la memoria. Este modo de operación no es el más indicado para el arreglo de PIV propuesto.
- **Circular.** Esta forma de registro crea una sección inicial para almacenar imágenes y posteriormente de usar ese espacio de memoria. Es posible crear más secciones de una en una con una configuración igual o diferente a la anterior. Las nuevas secciones no afectan a las imágenes que se encuentran en la memoria, aun con esa ventaja este modo de operación tampoco es el mejor para la técnica implementada en este trabajo.
- **BROC.** En el grabado de ráfaga por comando por sus siglas en inglés, el usuario divide la memoria en un número de segmentos y especifica la cantidad de imágenes a guardar en cada sección. Una vez que se comienza el registro de la primera sección de imágenes tras un disparo interno (Trigger), la cámara está disponible para adquirir la siguiente sección con otra señal de disparo, y así sucesivamente hasta terminar con todas las secciones pre-configuradas. Las características de este modo de registro permiten hacer adquisiciones en varias posiciones del objeto de estudio de una forma más eficiente. Ya que en cada plano de medición, se debe registrar un número de imágenes. Con los otros modos de operación también es posible pero con el BROC se tiene un ahorro de tiempo, porque en menos de treinta segundos es posible hacer un barrido y registrar cada plano iluminado por la hoja de luz. El ahorro de tiempo no solo se debe a lo anterior, sino que también se debe a la transferencia de la información, porque en el modo **Normal** se tiene que guardar las imágenes antes de iniciar otra adquisición, y esto demora bastantes minutos. Una desventaja del modo **Circular** que en el modo **BROC** no se tiene, es que en el modo **Circular** se pierde mucho tiempo para iniciar una nueva adquisición de cada sección porque siempre se tiene que crear la siguiente sección en memoria, esto trae como consecuencia un decaimiento en la concentración de partículas. Para la técnica de medición propuesta esto no es eficiente porque es difícil mantener la misma concentración de partículas por periodos muy prolongados a pesar de todas las variables controladas en sistema de dosificación de partículas.

Tabla 3.1. Características de la cámara de alta velocidad.

| Cámara Y7-3S1-M-8GB-PIV | |
|--------------------------------|-----------------------|
| Máxima resolución espacial | 1,920 x 1,080 píxeles |

| | |
|--|---------------------------|
| Máxima resolución temporal con la máxima resolución espacial (1,920 x 1,080) | 5,300 FPS |
| Almacenamiento máximo de imágenes en máxima resolución espacial | 10,908 imágenes |
| Máximo resolución temporal centrado en una región de interés de 1,920x8 | 13,000 FPS |
| Mínimo tiempo de exposición | 1 microsegundo |
| Características del sensor de la cámara | |
| Sensor | CMOS |
| Sensibilidad | 6,000 ISO |
| Canales | Monocromática |
| Profundidad en bits | 10 bits |
| Tamaño del sensor | 13.9 x 7.8 mm |
| Tamaño de un píxel | 7.24 x 7.24 μm |

En la Tabla 3.1 hay tan solo algunas de las características de la cámara de alta velocidad usada en este trabajo pero en el Apéndice A Figura 38 se encuentran más detalladas.



Figura 3.1. Interface de Motion Studio que controla los parámetros de la cámara Y7-S1

La frecuencia de muestreo y el tiempo de exposición pueden ser cambiados en base al máximo gradiente de velocidad del flujo y el esparcimiento de las partículas que se registra

en el sensor de la cámara. Si el gradiente de velocidad es muy alto, basta con incrementar la frecuencia de muestreo, desafortunadamente esto tiene impacto en el tiempo de exposición. A menor tiempo de exposición se tiene menos luz de esparcimiento integrado por el sensor de la cámara y por ende el contraste de las partículas en la imagen es de mala calidad. En el caso contrario; el tiempo de exposición es lo suficientemente largo para que la luz esparcida registre las partículas con alto contraste, pero el movimiento de las partículas es muy rápido que ocasiona que las partículas estén corridas o simplemente que en el cálculo de los vectores de velocidad no exista correlación entre los pares de imágenes registradas en tiempos consecutivos.

Evidentemente hay un compromiso entre la frecuencia de muestreo y el tiempo de exposición. Cuando los límites de estos no permiten tener un buen contraste en las imágenes registradas, se pueden modificar otras variables del arreglo experimental, estas son explicadas en los siguientes apartados.

La frecuencia de muestreo de la cámara tiene una relación directa con la resolución temporal del arreglo PIV. El flujo de aire a través de un cilindro es un evento continuo en el tiempo, por las características de la cámara y del láser fue posible registrar la evolución del flujo entre instantes de tiempo muy cortos. La capacidad de la cámara de adquirir cientos de imágenes por segundo permitió conocer la evolución dinámica del flujo que se pasa a través del cilindro, lo cual explica el motivo del uso de una cámara de alta velocidad y de un láser en modo continuo.

Otra característica importante en el arreglo PIV es la resolución espacial, esta se encuentra definida por factores como; la resolución del sensor la cámara, el objetivo de la cámara, el campo de visión (amplificación), el tamaño de las partículas trazadoras y la ventana de interrogación (en el pos-procesamiento). Todas estas variables determinan la resolución espacial pero hablando específicamente de la cámara de alta velocidad; la resolución del sensor limita la cantidad y localización de los vectores de velocidad que obtienen de la correlación, ya que por cada ventana en el proceso de interrogación obtiene un vector de desplazamiento. Entre mayor sea el número de píxeles del sensor, pueden existir mayor número de ventanas de interrogación y por ende se obtiene una mayor resolución espacial del campo vectorial medido. Por otra parte, si el tamaño de la ventana de correlación es más grande se reduce la cantidad de vectores representados en el campo vectorial.

Aunque parezca que no hay una relación directa entre la resolución espacial y la resolución temporal del sistema PIV, si la existe, y está se encuentra determinada por capacidades técnicas de la cámara rápida, además esta es inversamente proporcional. Por lo que entre más resolución espacial se quiera conseguir, menos resolución temporal se obtiene. Y en el caso inverso; entre más resolución temporal se quiera, menos resolución espacial se tiene. Esto por el hecho que al convertidor analógico a digital de la cámara le toma más tiempo registrar mayor número de píxeles. Por este motivo la resolución temporal puede ser incrementada al centrar la adquisición en una región de interés, en el caso de ser requerido

3.2 Láser

El láser desempeña un papel muy importante en el arreglo PIV ya que este proporciona la luz que esparcen las partículas trazadoras, para que de esta manera sea posible registrar el trazo del flujo de las partículas. Una de las partes importantes en este trabajo es que con el láser en modo continuo usado fue posible conocer la evolución del flujo en el tiempo durante periodos relativamente largos (limitado por la memoria de la cámara), lo cual no pudiera haber sido posible con un láser pulsado porque este tipo de láseres emiten dos pulsos altamente energéticos con un tiempo de separación muy corto. La desventaja de esto es que el próximo par de pulsos demora más tiempo lo cual ocasiona que no sea posible resolver un flujo temporalmente sino únicamente conocer el comportamiento del flujo en ciertos instantes de tiempo.

Agregando otra ventaja de un láser con modo continuo sobre uno pulsado es que el láser continuo no necesita ser sincronizado con la cámara de adquisición, a diferencia de un láser pulsado, este requiere forzosamente un mecanismo de sincronización. La desventaja del láser continuo es que la potencia emitida es menor que en una sola emisión de un láser pulsado, lo cual ocasiona que el esparcimiento de las partículas registrado por el sensor sea menor. Aun con este inconveniente es posible cambiar otras variables que mejoren el esparcimiento de las partículas cuando se utiliza un láser continuo. Sin embargo es muy complejo igualar el esparcimiento generado por un láser pulsado, por lo cual un sistema PIV con un láser pulsado puede medir gradientes de velocidad de mayor magnitud.

Aprovechando las ventajas del láser continuo y enfocándose al objetivo final del presente trabajo que es resolver temporal y espacial el flujo a través de un cilindro; se realizó la experimentación con un láser con modo continuo MILLENIA EDGE de la marca SPECTRA PHYSICS (ver Figura 3.2), este es un láser semiconductor con las características que aparecen en la Tabla 3.2. Las especificaciones mostradas en esta tabla son las más importantes de un láser para un arreglo PIV porque influyen directamente a los elementos del arreglo y a la calidad de las imágenes adquiridas. Brevemente se explica su efecto en el arreglo experimental.

Tabla 3.2. Características del láser semiconductor Millenia Edge.

| Característica | Especificación |
|-----------------------|-----------------------|
| Potencia del salida | 300mW a 10 W |
| Longitud de onda | 532 nm |
| Modo espacial | TEM ₀₀ |
| Diámetro del haz | 2.3 mm |
| Divergencia del haz | 0.5 mrad |



Figura 3.2. Láser semiconductor Millennium Edge

La potencia de salida es la característica más importante del láser porque beneficia directamente al esparcimiento de las partículas y al límite máximo de velocidad que se puede medir, entre más potencia se tenga mejores imágenes se registran, además se puede medir mayor rango de velocidades. En el desarrollo de este trabajo siempre se buscó incrementar el contraste de las partículas al modificar otras variables, y el parámetro de potencia se dejó como la última opción para mejorar la calidad en las imágenes. Por esto se trabajó con el láser a una potencia mínima. Ya que entre más potencia se le solicite al láser, el arreglo experimental se vuelve más peligroso. Cuando el láser emite a muy alta potencia puede quemar plástico, dañar componentes ópticos, e incluso ocasionar un daño permanente a la persona que opera en el arreglo experimental.

La longitud de onda tiene efecto en la difracción de la partícula. Esta es directamente proporcional al diámetro del patrón de difracción de la partícula, como se observa en la ecuación (7). Esta característica del láser difícilmente es utilizada para modificar el tamaño del patrón de difracción que es registrado en el plano imagen, porque generalmente los láseres usados en PIV son de una sola longitud de onda. Lo que se debe cuidar es que la longitud de onda debe ser seleccionada para que el sensor de la cámara tenga la mayor sensibilidad.

$$d_{dif} = 2.44f_{\#}(M + 1)\lambda \quad (7)$$

La distribución de intensidad gaussiana del haz láser (TM_{00}) un inconveniente que debe ser tomado en cuenta. El haz de luz láser diverge cuando pasa por una lente cilíndrica negativa, pero esta distribución es modificada en una sola dirección mientras que en la otra permanece sin sufrir deformación. En pocas palabras se tiene un perfil de intensidad elíptico-gaussiano, sin embargo esta deformación no es la causante del problema. Lo que en realidad afecta es la misma naturaleza del perfil gaussiano, ya que las partículas en los bordes de la imagen generan menor esparcimiento que las partículas de la zona central de la imagen. Esto es claramente visible y explica la razón por la cual las partículas del centro de la imagen se están mejor definidas. Una forma de evitar esto es trabajar solo con la zona de mayor intensidad y dejar fuera del campo de visión los extremos del perfil gaussiano. A veces esto

no es lo más indicado porque para abarcar el mismo campo de visión, la hoja de luz tiene que abrir con un ángulo más grande lo cual ocasiona un incremento en la potencial del láser.

El diámetro del haz tiene relación directa con el espesor de la hoja de luz, por lo cual es un parámetro importante en el arreglo PIV. Cuando se tiene una lente cilíndrica negativa para la generación de la hoja de luz. El espesor de la hoja de luz se mantiene constante (misma dimensión del diámetro del haz) después de cruzar la lente cilíndrica que abre el haz. Lo cual indica que entre menor diámetro del haz se tenga, más delgada puede ser la hoja de luz. Tener una hoja de luz muy delgada mejora el esparcimiento de las partículas y el enfoque de estas en el plano de medición. Lo deseable es que la hoja de luz tenga un espesor menor o igual a la profundidad de campo del objetivo de la cámara.

El ángulo de divergencia del haz no es un factor que modifique las condiciones PIV durante la experimentación. Únicamente modifica el sistema óptico que expande, adelgaza y colima la hoja de luz. Por lo cual un sistema óptico de hoja de luz específicamente diseñado para un haz con un ángulo de divergencia no funciona para otro láser que tenga un ángulo de divergencia diferente.

3.3 Sistema óptico de la hoja de luz

Para una mejor optimización en el arreglo PIV fue necesario diseñar un sistema óptico con tres especificaciones muy importantes. La primera es que la hoja de luz debe abrir lo suficiente para iluminar todo el campo de visión de la cámara, la segunda la hoja de luz tiene que ser mucho más delgada que el diámetro del haz láser ($t < 2r_0$), y la tercera que la hoja de luz debe tener el espesor colimado. El motivo por el cual la hoja de luz tiene que ser muy delgada es porque el espesor de la hoja de luz debe ser menor que la profundidad de campo del objetivo de la cámara.

Con una sola lente cilíndrica positiva es posible adelgazar la hoja de luz, pero esto produce un problema; La lente positiva crea una línea muy delgada en su distancia focal, pero después de esto comienza a divergir. Esto no es bueno porque no existe uniformidad en el plano de iluminación del arreglo PIV. La solución de este inconveniente es agregar otra lente que en conjunto con la segunda adelgace y colime el espesor la hoja de luz.

Para colimar y adelgazar el espesor de la hoja de luz se diseñó el sistema de lentes cilíndricas de la Figura 1.6 contenida en el capítulo 1. Este sistema consta de tres lentes cilíndricas como se muestra en la Figura 3.3, la primera lente es para expandir el haz de forma que parezca una hoja de luz. La segunda y la tercera son usadas para adelgazar y colimar la el espesor de la hoja de luz. Para que estas dos últimas lentes tengan efecto en el grosor de la hoja de luz, su curvatura debe estar rotada 90° respecto a la curvatura de la primera lente.

Los parámetros de diseño a determinar fueron las distancias focales de las tres lentes cilíndricas. Aplicando óptica geométrica en el diagrama de la Figura 3.3 se hicieron algunas aproximaciones para el cálculo de las distancias focales de las lentes. Primeramente se plantearon las consideraciones de la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Nomenclatura, consideraciones y explicación del sistema de la hoja de luz.

| Nomenclatura | | |
|--------------|---|--|
| | f_1 | Distancia focal de la lente 1 |
| | f_2 | Distancia focal de la lente 2 |
| | f_3 | Distancia focal de la lente 3 |
| | a | Distancia entre la lente 1 y la lente 2 |
| | b | Distancia entre la lente 3 y la posición z donde la hoja de luz abre una longitud L |
| | D_1 | Diámetro de la lente 1 |
| | D_2 | Diámetro de la lente 2 |
| | D_3 | Diámetro de la lente 3 |
| | r_0 | Diámetro del haz láser |
| | z | Distancia donde la hoja de luz abre L |
| | L | Distancia de apertura de la hoja de luz |
| | t | Espesor de la hoja de luz |
| | Consideración | Explicación |
| 1 | El haz láser no tiene ángulo de divergencia | Es más sencillo hacer esta consideración durante la primera aproximación |
| 2 | $L(z = a) \ll D_2$ | La longitud L en la distancia $z=a$ debe ser mucho menor que D_2 para los rayos pasen sin salirse de la lente 2. |
| 3 | $L(z = a + f_2 + f_3 + b) \leq D_3$ | La longitud L en la distancia $z = a + f_2 + f_3 + b$ debe ser menor o igual que D_3 para los rayos pasen sin salirse de la lente 3. |
| 4 | $D_2 \geq D_3$ | Si $D_2 \geq D_3$ entonces la segunda consideración se cumple por efecto si la tercera consideración se cumple. |
| 5 | $f_2 \geq f_3$ | Eso es para asegurar que la hoja de luz sea más delgada |

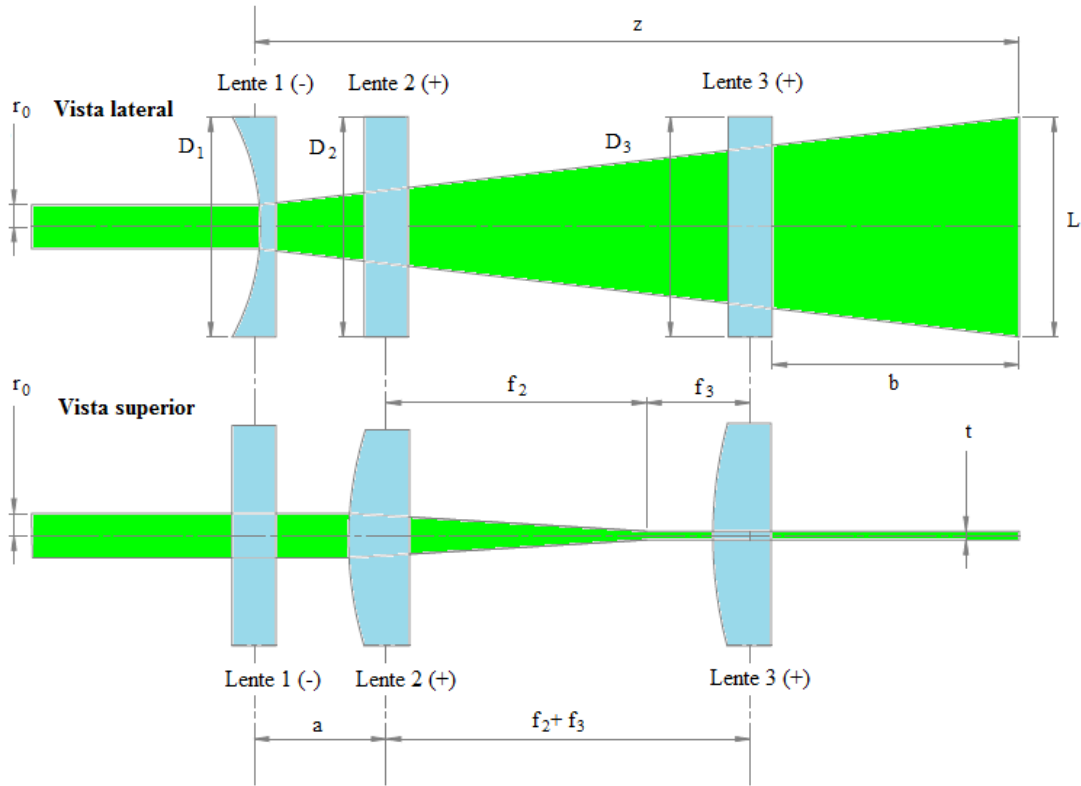


Figura 3.3. Diagrama del sistema óptico de la hoja de luz.

Las primeras dos consideraciones son para garantizar que el haz de luz cruce por todas las superficies ópticas. Con este planteamiento se determina la distancia focal de la primera lente, la cual es obtenida mediante la evaluación de la tercera consideración de la Tabla 3.3 en la ecuación (1) dada en el capítulo 1. Después de evaluar esta condición se soluciona la ecuación para f_1 y se obtiene la ecuación (8).

$$f_1 \geq \frac{a + f_2 + f_3 + b}{\frac{D}{2r_0} - 1} \quad (8)$$

Las lentes 2 y 3 que adelgazan y coliman el espesor de la hoja de luz, constituyen un sistema óptico bifocal. Por lo que el espesor de la hoja de luz es directamente proporcional a la amplificación del sistema multiplicado por el diámetro del haz láser como se expresa en la ecuación (9).

$$t \propto 2r_0 \left(\frac{f_3}{f_2} \right) \quad (9)$$

Las distancias focales f_2 y f_3 deben ser elegidas teniendo la mejor relación $f_2/f_3 < 1$ que permita adelgazar la hoja de luz. La distancia a preferentemente debe ser muy corta, incluso puede tener a cero. El caso contrario, el parámetro b conviene que sea mayor mucho mayor que cero, inclusive para no dejarlo a un valor arbitrario se puede decir que $b \geq D_3$.

Con lo anterior fue posible hacer la aproximación de una hoja de luz con las características establecidas. Sin embargo, el diseño no concluyó con el uso de las ecuaciones mencionadas anteriormente, únicamente eso fue una aproximación de diseño. La razón de esto es que el haz láser tiene un ángulo de divergencia. Esto afecta el sistema porque al incidir el haz en la primera superficie, esta expande el haz más de lo estimado. No obstante para corregir este problema de una forma muy sencilla se debe incrementar la distancia b a dos o tres veces el valor de D (dependiendo del grado de divergencia). Para ser un poco más preciso es posible utilizar un programa de trazo de rayos exactos como OSLO, en el cual es mucho más fácil introducir todos estos factores.

Al sustituir los valores de la Tabla 3.4 en la ecuación (8) se obtuvo que el valor absoluto de f_1 debe ser mayor o igual que 15.94 mm, es decir puede tomar valores como $f_1 = -15.94 \text{ mm}$, $f_1 = -18 \text{ mm}$ y $f_1 = -25 \text{ mm}$. La desventaja de escoger una distancia focal negativa más larga es que iluminará menor campo de visión, esto inclusive puede ser corregido al agregar una cuarta lente cilíndrica negativa en la orientación de la expansión del haz cuidando que todos los rayos crucen por esta. Lo anterior no afecta el espesor de la hoja de luz.

Tabla 3.4. Parámetros de diseño de la hoja de luz.

| Parámetro | (mm) |
|------------------|-------------|
| f3 | 12.7 |
| f2 | 60 |
| D2 | 30 |
| D3 | 20 |
| A | 30 |
| B | 20 |
| r0 | 1.15 |

Algo importante a mencionar del diseño es que la hoja de luz no está perfectamente colimada, esto se debe a la aberración esférica de las lentes cilíndricas del sistema bifocal. A pesar de lo anterior fue posible obtener una hoja de luz muy delgada (1 mm) con espesor constante durante al menos un metro de distancia medido desde la última superficie óptica en adelante.

Todo lo anterior fue hecho para que la hoja de luz cubriera todo el campo de visión de la cámara, y que su espesor fuera menor que la profundidad de campo del objetivo. Pero además de eso existe otra variable que afecta directamente al arreglo PIV. La dimensión L de la hoja de luz (cuanto abre el haz de luz a una distancia z) tiene relación con el esparcimiento de las partículas. Si la hoja de luz está muy abierta es decir L es muy grande,

la intensidad de luz es distribuida en un área mayor, por lo tanto las partículas tienen menos luz para esparcir, esto implica una disminución de contraste en las imágenes registradas. El caso opuesto es que la hoja de luz es distribuida en un área menor lo que ocasiona que el esparcimiento sea mayor y que incrementa el contraste de las imágenes sin necesidad de subir la potencia del láser. El mismo principio se aplica para el espesor de la hoja de luz.

Producto del cálculo anterior se seleccionaron las lentes cilíndricas a usar en el experimento. Estas lentes fueron colocadas en soportes que se desplazan sobre rieles para ajustar de una manera sencilla las distancias de separación de los cálculos realizados. Este sistema se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Sistema óptico de la hoja de luz en soportes.

3.4 Objetivo de la cámara

El objetivo de la cámara fue seleccionado en base a las siguientes características; la amplificación, el diámetro de la lente, la apertura del diafragma ($f_{\#}$) y la distancia focal. Estos parámetros en conjunto tienen efecto en el campo de visión, la cantidad de luz esparcida que registra el sensor y la máxima velocidad medible del flujo de fluido. Específicamente el campo de visión y la cantidad de luz esparcida que registra el sensor, son las variables que influyen en la calidad de imagen de las partículas.

La apertura del objetivo forma un patrón de difracción en el plano imagen el cual tiene diferente dimensión dependiendo del diámetro de la apertura. Además la partícula difracta luz lo cual hace que el patrón de difracción tenga una forma de múltiples anillos concéntricos. Este patrón causado por los dos efectos es conocido como el disco de Airy, por todo lo anterior se dice que las imágenes están limitadas por efectos de difracción.

El tamaño de partícula que registra el sensor de la cámara no es exactamente el diámetro de la partícula multiplicado por la amplificación del objetivo, Es más bien una

cuadratura dado por la imagen geométrica y el diámetro del patrón de difracción. Como se expresa en la ecuación (10)

$$d_T = \sqrt{(Md_p)^2 + d_{dif}^2} \quad (10)$$

La intensidad máxima del esparcimiento de la partícula por unidad de área es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula, tal como se muestra en la ecuación (11). Esto explica porque no es posible compensar la insuficiencia de potencial del láser al incrementar el diámetro de la partícula [1].

$$I_{max} \sim \frac{1}{d_T^2} \quad (11)$$

Para no incrementar la potencia del láser lo más conveniente es tener una partícula más brillante lo que implica reducir su tamaño. Pero sin olvidar que para que la partícula pueda estar mínimamente definida en el sensor de la cámara, el diámetro de esta tiene que ser al menos dos veces el tamaño del píxel como se expresa en la ecuación (12).

$$d_T \geq 2S_{pix} \quad (12)$$

Al sustituir la ecuación (7) en la ecuación (12) se obtiene la ecuación (13)

$$d_T = \sqrt{(Md_p)^2 + (2.44 \lambda f_{\#}(M + 1))^2} \quad (13)$$

El número $f_{\#}$, la profundidad de campo y la amplificación son parámetros del objetivo de la cámara. Si la amplificación incrementa la velocidad a medir en el arreglo PIV se reduce, si el número $f_{\#}$ es pequeño se tendrá mayor cantidad de luz captada en el sensor y la partícula será más brillante, consecuentemente la partícula estará mejor definida siempre y cuando no salga del plano no enfoque.

Para poder reducir al máximo el número $f_{\#}$ sin causar que las partículas estén fuera del plano de enfoque, se toma en cuenta la profundidad de campo del objetivo. Esta debe ser mayor que el espesor de la hoja de luz. La profundidad de campo puede ser calculada mediante la ecuación (14).

$$\delta_z = \frac{2f_{\#}d_{diff}(M + 1)}{M^2} \quad (14)$$

Para saber cuál es el objetivo más adecuado es necesario conocer la amplificación necesaria de acuerdo al tamaño de la partícula. Esto se puede estimar al resolver la ecuación (13) para la amplificación M .

$$M = \frac{-(2.44 \lambda f_{\#})^2 \pm \sqrt{(2.44 \lambda f_{\#})^4 - 4(d_p^2 + (2.44 \lambda f_{\#})^2)((2.44 \lambda f_{\#})^2 - 4S_p^2)}}{2(d_p^2 + (2.44 \lambda f_{\#})^2)} \quad (15)$$

Como se observa en la ecuación (15) la amplificación del objetivo está en función del número $f_{\#}$, la longitud de onda del láser, del tamaño de la partícula trazadora y del tamaño del píxel del sensor. Los tres últimos son valores conocidos y se encuentran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros conocidos del arreglo PIV.

| Parámetro | Valor |
|-----------|---------|
| λ | 532 nm |
| d_p | 20 μm |
| S_p | 7.24 μm |
| H' | 13.9 mm |

La amplificación es la relación entre el campo de visión H y el tamaño del sensor H' (ambos a lo ancho) como se expresa en la ecuación (16).

$$M = \frac{H'}{H} \quad (16)$$

A menor número $f_{\#}$ mayor amplificación, a mayor amplificación menor campo de visión, esto se visualiza en los valores de la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Comportamiento del número f respecto a la amplificación y al campo de visión.

| $f_{\#}$ | M | $H(mm)$ |
|----------|--------|----------|
| 1 | 0.7175 | 19.3735 |
| 1.4 | 0.7112 | 19.5432 |
| 2 | 0.6981 | 19.91 |
| 2.8 | 0.6737 | 20.6315 |
| 4 | 0.6234 | 22.2987 |
| 5.6 | 0.5330 | 26.0773 |
| 8 | 0.3540 | 39.2623 |
| 11 | 0.0235 | 528.1702 |

Al incrementar el número $f_{\#}$ se obtiene un mayor campo de visión, pero la desventaja de esto es que la potencia requerida al láser debe ser mayor. Por lo tanto, seleccionar un objetivo es sumamente complicado ya que debe ser un objetivo con una apertura de

diafragma grande (número $f_{\#}$ bajo) y además debe tener buena amplificación. Un objetivo macro es una buena opción para ser usado en el arreglo PIV, generalmente este tipo de objetivos tiene una profundidad de campo muy corta, lo cual pudiera llegar a ser significativo si es menor al espesor de la hoja de luz láser. Por todo lo que se mencionó anteriormente se eligió trabajar con un objetivo macro con una distancia focal fija de 60 mm, el cual puede variar la amplificación desde 1 hasta 0.1, y el número $f_{\#}$ desde 2.8 hasta 32.



Figura 3.5. Objetivo macro con distancia focal de 60 mm

3.5 Arreglo experimental

La propuesta experimental para medir velocidad en volumen está compuesta por los elementos de la Figura 3.6, en la cual se observa; el túnel de viento, el sistema de dosificación de partículas, el sistema de corredera del túnel de viento, el sistema óptico para la hoja de luz y el sistema de extracción de partículas. Este arreglo mide a lo largo aproximadamente 5 metros. Brevemente se explica la integración de todos sus elementos.

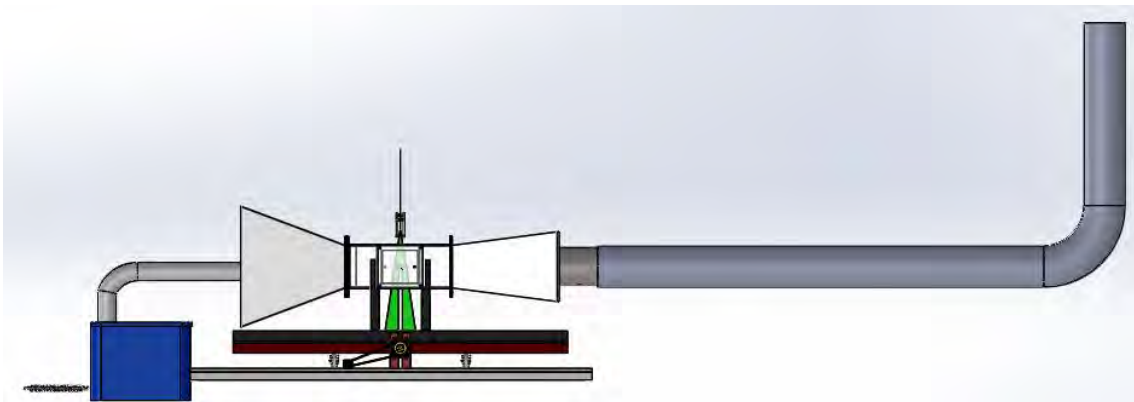


Figura 3.6. Arreglo experimental para la medición de velocidad en un volumen.

El sistema de dosificación de partículas debe generar humo e introducir al túnel de viento una masa de partículas constante y homogénea. Para que estas puedan ser iluminadas por la hoja de luz láser. Por lo anterior el ducto de este sistema debe estar muy cercano al

cono de contracción del túnel de viento como se observa en la Figura 3.7. La secuencia que sigue este sistema para su correcto funcionamiento es la siguiente:

- El serpentín es calentado por la resistencia hasta 200°C.
- Cuando la temperatura es la óptima, se bombea líquido de humo controlado electrónicamente para producir partículas en grandes o pequeños volúmenes.
- Todo el volumen de partículas es introducido a la cámara de concentración para tener una concentración homogénea.
- Finalmente, las partículas son bombeadas por un ventilador hacia el cono de contracción del túnel de viento.

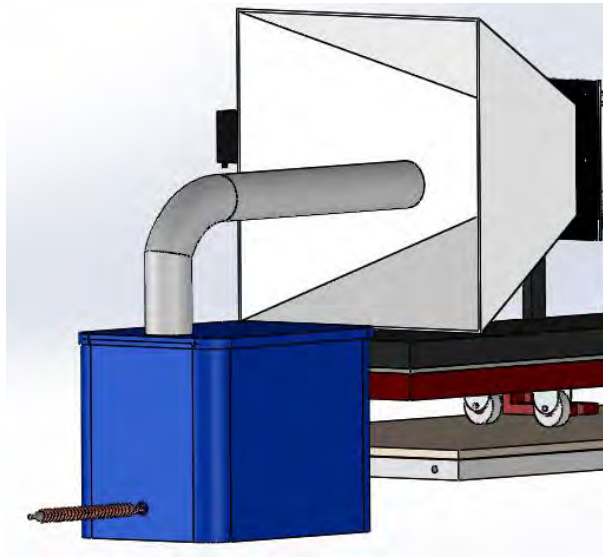


Figura 3.7. Ducto del sistema de dosificación de partículas cercano a la entrada del túnel de viento.

En la iluminación; el haz láser es guiado por varios espejos hacia el sistema óptico de la hoja de luz, que es colocado como se ilustra en la Figura 3.8. Este sistema debe ser puesto lo mejor alineado posible para que el haz cruce por todas las lentes, además la hoja de luz debe estar completamente vertical para que la cámara rápida enfoque todo el plano que es iluminado. También es importante que la hoja de luz incida en el objeto de estudio dependiendo del campo de visión requerido. La cámara es puesta en una montura X, Y, Z para poder ajustar el enfoque y el campo de visión y así poder ajustar la amplificación deseada.

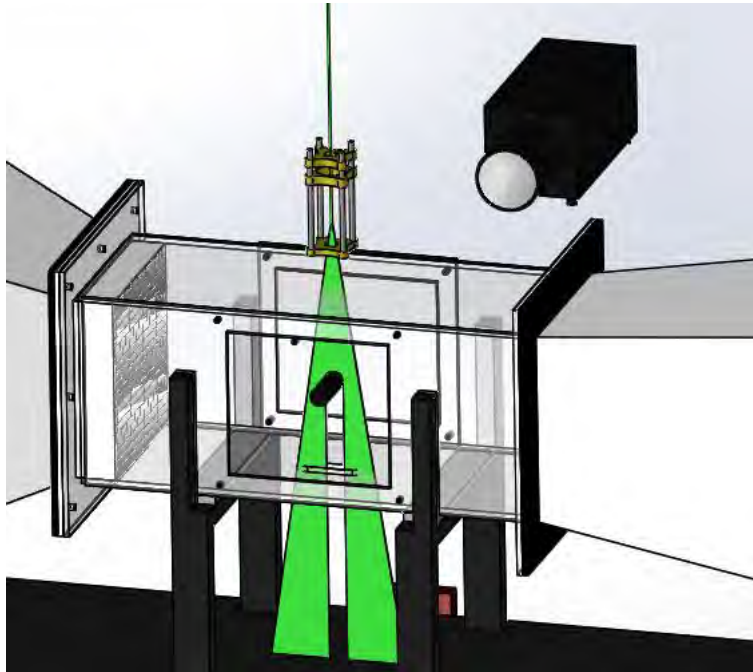


Figura 3.8. Colocación del sistema óptico para la hoja de luz

El sistema de corredera del túnel de viento que se muestra en la Figura 3.9, tiene como objetivo crear múltiples posiciones de la hoja de luz a lo ancho del objeto de estudio. Esto se logra desplazando todo el túnel de viento controlado por un motor a pasos. Lo más importante de este sistema es que la hoja de luz se mantiene fija sin ser afectada por el desplazamiento del túnel de viento, lo cual permite que la cámara enfoque el mismo plano de la hoja de luz. De esta forma, es posible hacer un barrido sobre el objeto de estudio para obtener información del flujo en un volumen.

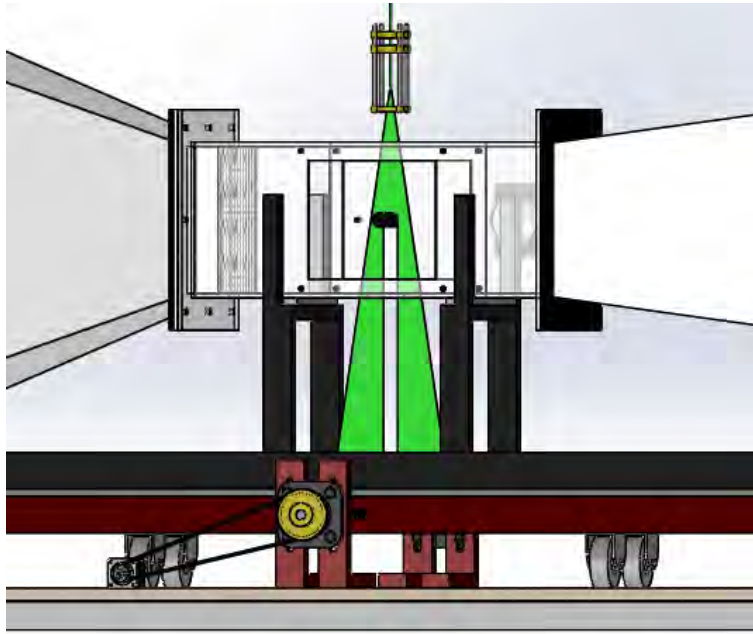


Figura 3.9. Desplazamiento del túnel de viento para obtener múltiples hojas paralelas.

Por último, el sistema de extracción conectado al túnel de viento (Figura 3.10) desemboca en la campana de extracción para la expulsión de las partículas generadas durante la experimentación. Este sistema fue muy efectivo porque en ningún momento hubo acumulación de humo dentro del laboratorio.

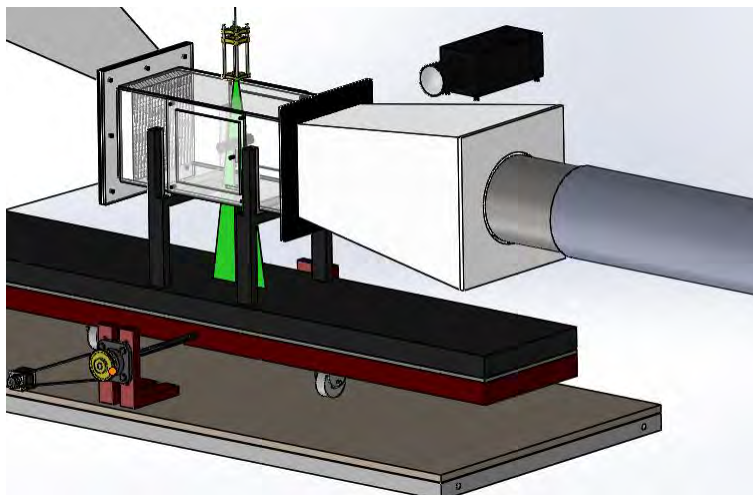


Figura 3.10. Sistema de extracción acoplado al túnel de viento.

Todos los componentes del arreglo experimental son importantes para la obtención de imágenes con un buen contraste de partículas. En la Figura 3.11 se observa el arreglo experimental real para medición de velocidad en un volumen. En esta fotografía se está haciendo la adquisición para la medición del flujo que pasa a través de un cilindro de 10.2 milímetros. A diferencia de los bosquejos anteriores, el arreglo experimental de la fotografía

tiene soportes para; la cámara rápida, el sistema de extracción, la hoja de luz y el sistema de dosificación de partículas.

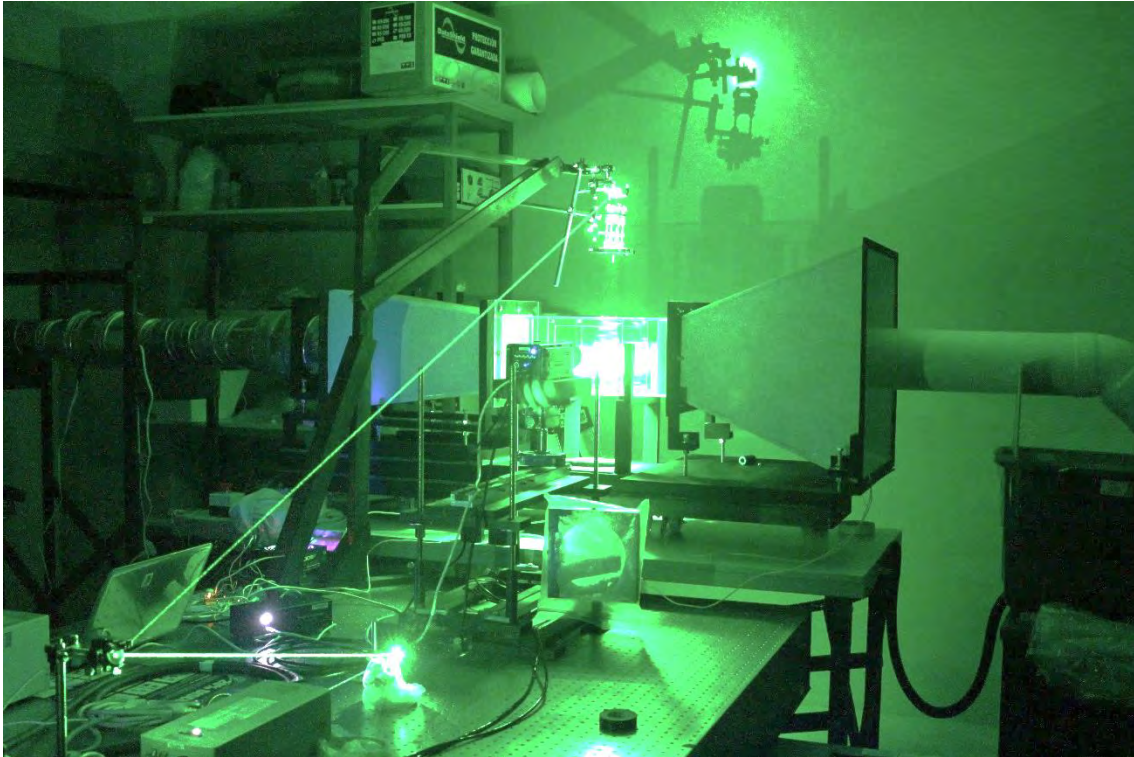


Figura 3.11. Fotografía del arreglo de PIV para medición de velocidad en volumen.

3.6 Metodología para la adquisición de imágenes en el arreglo experimental

La medición de velocidad en un volumen consistió en adquirir secuencias de imágenes con un sistema PIV tradicional en múltiples planos que son paralelos entre ellos, por lo que fue necesario desplazar la hoja de luz en diferentes posiciones a lo ancho del objeto en estudio. Para el análisis experimental se utilizó un cilindro con un diámetro de 10.2 milímetros, en el cual se usó la técnica presentada en este trabajo para medir el flujo que cruza el objeto dentro de un volumen con dimensiones $l=39.2$ mm, $h=22$ mm y $w=10$ mm. Donde h y l definen el campo de visión y w es el desplazamiento total de 10 planos de medición separados 1mm entre ellos.

Para que la adquisición de las imágenes fuera lo más efectiva se procedió a seguir una metodología experimental que consta de cuatro partes.

Parte 1: Definición de parámetros preestablecidos

1. **Objeto de estudio.** Se preparó el objeto en estudio de tal manera que fuera adecuado para el tamaño de la sección de trabajo. Además se recubrió con un plástico negro para que el objeto no generara reflexiones. El objeto de estudio fue un cilindro con un diámetro de 10.2 milímetros.

2. **Campo de visión.** Se definió el campo de visión de acuerdo al área de interés deseada, esta área cubrió la zona de entrada del flujo y la estela que se genera por detrás del cilindro. Esta área es de 39.2 mm x 22 mm en la cual se tomó en cuenta que el área por debajo del cilindro no puede ser medida por la sombra que genera el mismo.
3. **Barrido de la hoja de luz.** Se especificó obtener 10 planos de medición con separación de 1 milímetro.
4. **Velocidad.** Con el control de velocidad del túnel se seleccionó una velocidad intermedia, la cual permitirá hacer ajustes en caso de que las partículas en las imágenes no estén bien definidas.

Parte 2. Definición de condiciones del arreglo PIV.

1. **Apertura de la hoja de luz.** Se puso la hoja de luz de tal manera que cubriera sin excederse toda la región de interés, esto para no elevar la potencia del láser a sus límites.
2. **Número $f_{\#}$.** Este valor fue fijado al mínimo posible en el objetivo ($f_{\#} = 2.8$) para obtener la mayor cantidad de luz y así compensar la insuficiencia de potencia.
3. **Dosificación de partículas.** Se colocó el sistema de dosificación de partículas a una distancia en la cual se obtuviera una concentración alta de partículas, esto se logró controlando la velocidad de la bomba de expulsión de partículas y la cantidad de líquido quemado por el serpentín.
4. **Potencia del láser.** Se estableció la potencia del láser a 1 Watt.
5. **Frecuencia de muestreo de la cámara, y tiempo de exposición.** Se comenzaron a hacer pruebas de visualización con diferentes frecuencias de muestreo: 300 Hz, 500 Hz, 800 Hz, 1000 Hz y 1500 Hz, correspondiéndoles un tiempo de exposición de; 3,333 μ , 1,998 μ , 1,248 μ , 998 μ y 664 μ respectivamente, que es el máximo permitido por la frecuencia de muestreo. Con estos parámetros se observó que la mejor frecuencia de muestreo para las condiciones preestablecidas fue de 1000 Hz.

Parte 3. Evaluación de las condiciones.

1. **Adquisición.** Se hizo una adquisición con los parámetros anteriores para ver la calidad de las imágenes. Lo que se notó es que la calidad aun no era lo suficientemente para el pos-procesamiento.

2. **Cambio de potencia del láser.** Se incrementó la potencia del láser hasta 3 Watts y se redujo a la mínima velocidad del túnel de viento, con esto se obtuvo un incremento en el contraste de las imágenes.
3. **Prueba del pos-procesamiento.** Con el programa de cálculo de vectores se probó la existencia de correlación de las imágenes.

Parte 4. Adquisición de todos los planos de medición.

1. Con los parámetros bien establecidos se adquirieron 10 secciones de 1,000 imágenes en cada plano para obtener información del flujo que cruza el volumen.
2. Se adquirió una imagen de la rejilla de calibración, esto para poder relacionar los píxeles con unidades reales del plano de visión.

3.7 Datos obtenidos en la experimentación.

Siguiendo la metodología anterior, después de múltiples intentos y muchas horas de trabajo en el laboratorio se logró obtener los mejores parámetros para las condiciones iniciales en el arreglo PIV, estos valores son resumidos en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros utilizados en el arreglo PIV.

| | Nombre del parámetro | Valor |
|----------|---|-----------------|
| f_s | Frecuencia de muestreo | 1,000 Hz |
| t_e | Tiempo de exposición | 998 μ s |
| P | Potencia del láser | 3 W |
| H | Campo de visión a lo ancho | 39.2 mm |
| H' | Resolución del sensor a lo ancho | 19.3 mm |
| $f_{\#}$ | Número f | 2.8 |
| M | Amplificación del objetivo | 0.3545 |
| N | Número de secciones en el volumen | 10 |
| dZ | Desplazamiento entre secciones | 1 mm |
| Z | Desplazamiento total en el volumen | 10 mm |
| ρ | Densidad de partículas | Muy alta |
| n | Número de imágenes por sección | 1000 imágenes |
| n_t | Número total de imágenes del análisis | 10,000 imágenes |
| L | Distancia de apertura de la hoja de luz medido en el centro del campo de visión | 50 mm |

Siguiendo la metodología anterior se adquirieron 1,000 imágenes en cada plano de medición, lo cual equivale a 10,000 imágenes que deben ser procesadas para construir el flujo dentro del volumen. La calidad de imagen obtenida durante la experimentación se muestra en la Figura 3.12. Esta imagen tiene muy alta concentración de partículas lo cual asemeja a

un patrón de moteado. Esto no complicó el cálculo de vectores de velocidad. Es importante mencionar que aun con una concentración alta de partículas trazadoras no fue posible llenar los huecos negros que aparecen detrás del cilindro. Estos huecos son zonas de separación de flujo que se deben a la vorticidad existente en un determinado número de Reynolds.

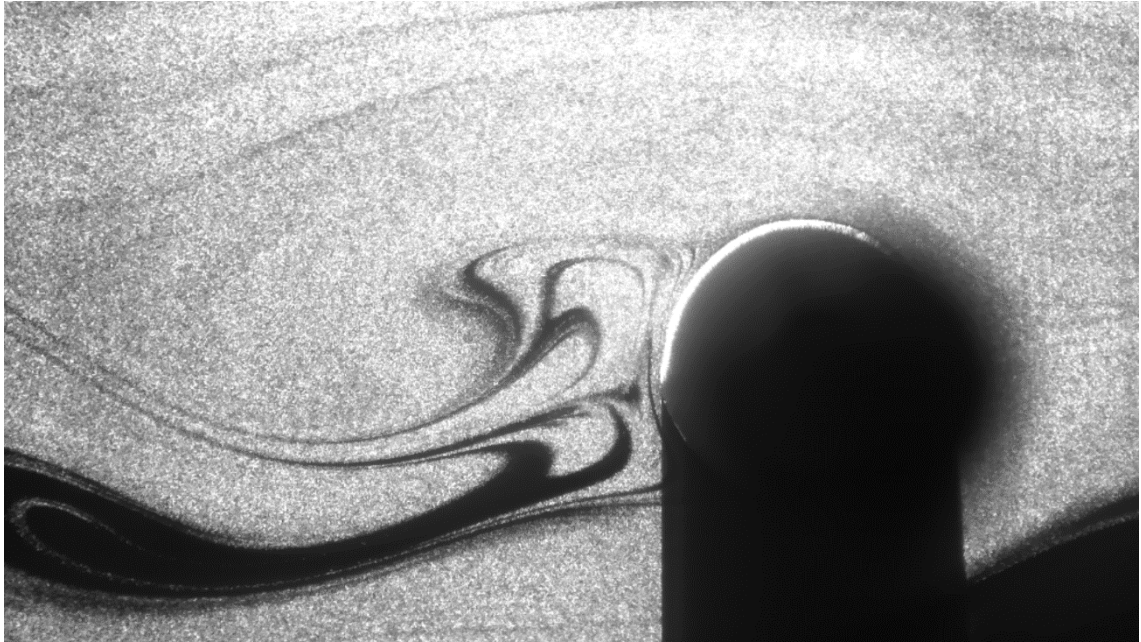


Figura 3.12. Imagen 1 de 10,000 adquirida en la experimentación para la medición del flujo de un cilindro que atraviesa un volumen.

4 Resultados experimentales y conclusiones.

En el capítulo anterior se explicaron a detalle los parámetros del arreglo experimental que son necesarios para obtener imágenes de PIV de calidad. En este capítulo se analizan las imágenes obtenidas con el arreglo experimental de PIV, para flujo de aire que pasa a través de un cilindro circular con un diámetro de 10.2 milímetros a un número de Reynolds de 90. Para realizar el análisis utilizó un software para PIV llamado proVISION. Este software, es un programa comercial distribuido por Integrated Design Tools, Inc. (IDT). En siguiente sección se describe el funcionamiento del mismo.

4.1 Análisis de las imágenes de PIV: el método de correlación cruzada.

Existen dos métodos para extraer los campos de vectores de las imágenes de PIV. La utilización de cada uno de ellos depende de la forma en que se registran las imágenes de las partículas de la técnica PIV. Para tal fin se puede usar correlación cruzada o autocorrelación.

La correlación cruzada es una medida de similitud entre dos señales la cual frecuentemente es usada para el reconocimiento de patrones ya que es posible identificar características relevantes de una señal.

Esta técnica es usada en PIV para conocer la dirección y magnitud en promedio de un conjunto de partículas que se desplazan dentro de una región. La correlación cruzada aplicada para PIV, hace uso de dos imágenes para el cálculo del vector de desplazamiento del grupo de partículas. La primera adquirida en un tiempo t_0 y la segunda en un tiempo $t_1 = t_0 + \Delta t$.

Por otro lado, la autocorrelación es un caso especial de la correlación cruzada porque la correlación se realiza con su misma función. Por lo cual, para PIV se hace uso de una sola imagen. Esta imagen debe ser de doble exposición para registrar el desplazamiento de un conjunto partículas. La desventaja de la autocorrelación es que es necesario otro algoritmo para identificar la dirección correcta del movimiento de las partículas, ya que este método produce como resultado el desplazamiento y con su conjugado. Además de esto, la autocorrelación es más susceptible al ruido en las imágenes, por lo cual se producen vectores de desplazamiento erróneos.

A pesar de la ambigüedad producida por la autocorrelación, este método de evaluación fue usado durante mucho tiempo en velocimetría por imágenes de partículas. La razón es porque las limitaciones técnicas del método de registro de las imágenes (cámara) y el láser, no permitían adquirir dos imágenes con una separación de tiempo de microsegundos. En la actualidad hay las características de los láseres y las cámaras de alta velocidad permiten obtener dos imágenes con una separación de microsegundos.

Como ya se mencionó anteriormente la correlación cruzada es la medida la similitud entre dos señales. En PIV, estas señales son dos ventanas de interrogación donde están registradas partículas en dos instantes de tiempo (t_0 y t_1). A partir de la correlación de las dos ventanas de interrogación se produce un pico de desplazamiento. La distancia desde el centro hasta el pico de máxima correlación, proporciona la magnitud y dirección del vector de movimiento de las partículas (ver Figura 4.1).

La correlación cruzada determina el desplazamiento promedio del conjunto de partículas que se mueven dentro de la ventana de interrogación. El número de partículas dentro de la ventana de interrogación varía cuando alguna partícula abandona el plano de iluminación o la ventana de interrogación. Por esto la densidad de partículas es muy importante, ya que a pesar de que exista pérdida de partículas, es posible calcular el pico de correlación con las partículas restantes. La correlación cruzada es un método de evaluación muy robusto que es usado en la mayoría las aplicaciones de PIV.



Figura 4.1. Correlación cruzada de dos ventanas de interrogación.

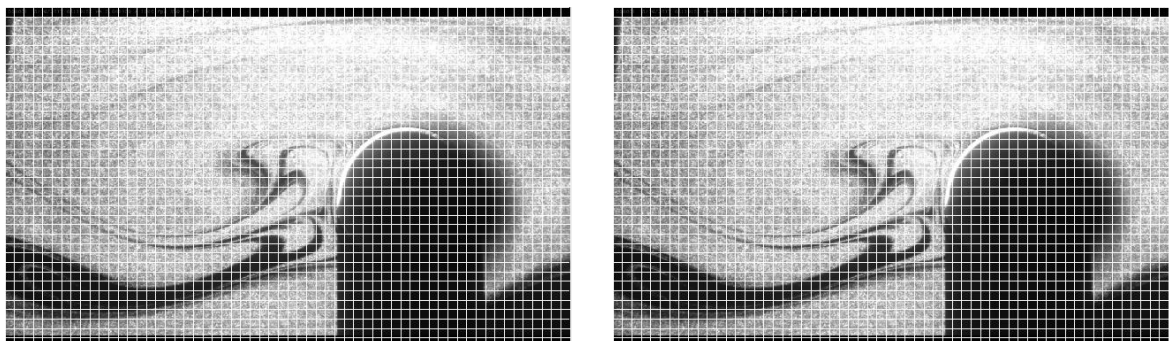
El procedimiento para obtener vectores de desplazamiento en toda la imagen parte de aplicar correlación cruzada a dos imágenes. Para hacer esto se subdivide cada imagen (t_0 y t_1) en múltiples ventanas de correlación del mismo tamaño (en píxeles) como se observa en la Figura 4.2. La primera ventana de interrogación de la imagen en t_0 se correlaciona con la primera ventana de interrogación de la imagen en t_1 , la segunda ventana en t_0 se correlaciona con la segunda ventana en t_1 y esto hasta completar la correlación de la n -ésima ventana de interrogación en t_0 con la n -ésima ventana en t_1 .

Por cada ventana de interrogación correlacionada se genera un vector de desplazamiento, lo cual indica que entre mayor número de ventanas mayor número de vectores en el plano de medición y viceversa. El tamaño de la ventana de correlación en píxeles depende del tamaño de la partícula, de la amplificación del objetivo utilizado y de la máxima velocidad del flujo a medir. Cuando el tamaño de la ventana de correlación es muy grande se pierde exactitud debido a que el comportamiento del fluido deja de ser local, en el caso contrario cuando el tamaño de ventana de correlación es muy pequeño es posible que no exista correlación. Comúnmente se utilizan tamaños de ventanas de interrogación de: 12x12, 24x24, 32x32 y 48x48. Para este trabajo se usó un tamaño de ventana de correlación de 24x24, este tamaño es el valor por defecto del programa proVISION, el cual es el más apropiado para el tamaño de partículas usadas.

Al tener registrado una secuencia de cientos de imágenes se puede obtener campos de desplazamiento por cada par de imágenes. La forma de correlacionar las imágenes cuando se utiliza un láser continuo es: la imagen 1 con la imagen 2, la imagen 2 con la imagen 3, la imagen 3 con la imagen 4 y la imagen i con la imagen $i+1$, donde i es el número de imagen.

La forma de correlacionar las imágenes cuando se utiliza un láser pulsado es: la imagen 1 con la imagen 2, la imagen 3 con la imagen 4, la imagen 5 con la imagen y y la imagen $i+1$ con la imagen $i+2$. Esta manera de correlacionar las imágenes también puede ser usada con

un láser con modo continuo pero se pierde información al obtener menor número de correlaciones.



a) imagen en t_0

b) imagen en t_1

Figura 4.2. Segmentación de las imágenes a y b en múltiples ventanas de interrogación.

Para convertir de píxeles a unidades reales (en nuestro caso metros), se debe hacer la correspondiente calibración de la cámara e introducir la equivalencia a los datos arrojados por las correlaciones, o inclusive esta conversión puede ser hecha antes de la correlación de las imágenes.

Después de haber obtenido múltiples correlaciones entre los pares de imágenes, se obtienen los vectores de velocidad al dividir los vectores de desplazamiento entre el tiempo de separación de las imágenes. La manera de obtener los campos vectoriales de velocidad de un flujo es un procedimiento largo que además conlleva muchos recursos computacionales. En este trabajo se utilizó el software proVISION que simplifica la tarea de la obtención de los mapas de velocidad, ya que es un programa muy robusto que cuenta con diversas herramientas de PIV. El funcionamiento de proVISION para la obtención de campos vectoriales de velocidad de un flujo que pasa por un cilindro de 10.2 milímetros es explicado brevemente en la siguiente sección.

4.2 Obtención de campos de velocidad en múltiples planos paralelos del flujo que pasa a través de un cilindro

ProVISION es un software de alto rendimiento que utiliza correlación cruzada para el cálculo de los mapas de velocidad. Este programa tiene herramientas que facilitan el trabajo de análisis de las imágenes de PIV. Como por ejemplo; Creación de bases de datos de imágenes, calibración de cámara, configuración de la correlación y procesamiento online. Su principal ventaja es su rapidez de procesamiento para cálculo de los vectores de las imágenes de PIV, el tiempo de procesamiento depende de los parámetros de malla y de correlación de las imágenes.

El tamaño de la ventana de correlación define el número de correlaciones realizadas entre un par de imágenes, mientras que el número de nodos en la malla definen la cantidad de vectores interpolados entre las correlaciones de sus alrededores.

Para hacer el análisis importaron en una base de datos del programa las 10,000 imágenes adquiridas en el arreglo experimental. Estas imágenes fueron almacenadas en carpetas diferentes en una base de datos, ya que corresponden a planos de medición diferentes. Con las imágenes ya importadas en proVISION, se procedió a configurar los parámetros de malla y correlación para el análisis.

En la Figura 4.3 se muestran los parámetros de correlación y de malla usados en el análisis. Existen dos modos de ventana de correlación; la estándar y la adaptiva. En la estándar se hace la correlación con el mismo tamaño de ventana en las dos imágenes (imagen en t_0 e imagen en t_1). Mientras que en la correlación adaptiva, esta es calculada en una subsección de los puntos de la malla usando un área de interrogación de al menos 24x24 píxeles. Esta configuración produce validación y predicción de vectores lo cuales son usados para crear corrimientos locales de la imagen en t_1 .

La malla establece los puntos donde se interpolan los vectores. Una malla más fina produce mayor cantidad de vectores interpolados, lo más conveniente para no producir error en el cálculo y un exceso de vectores es que esta malla sea del mismo tamaño que la generada por las áreas de interrogación como se observa en la Figura 4.4, incluso puede ser el doble y sin generar algún error.

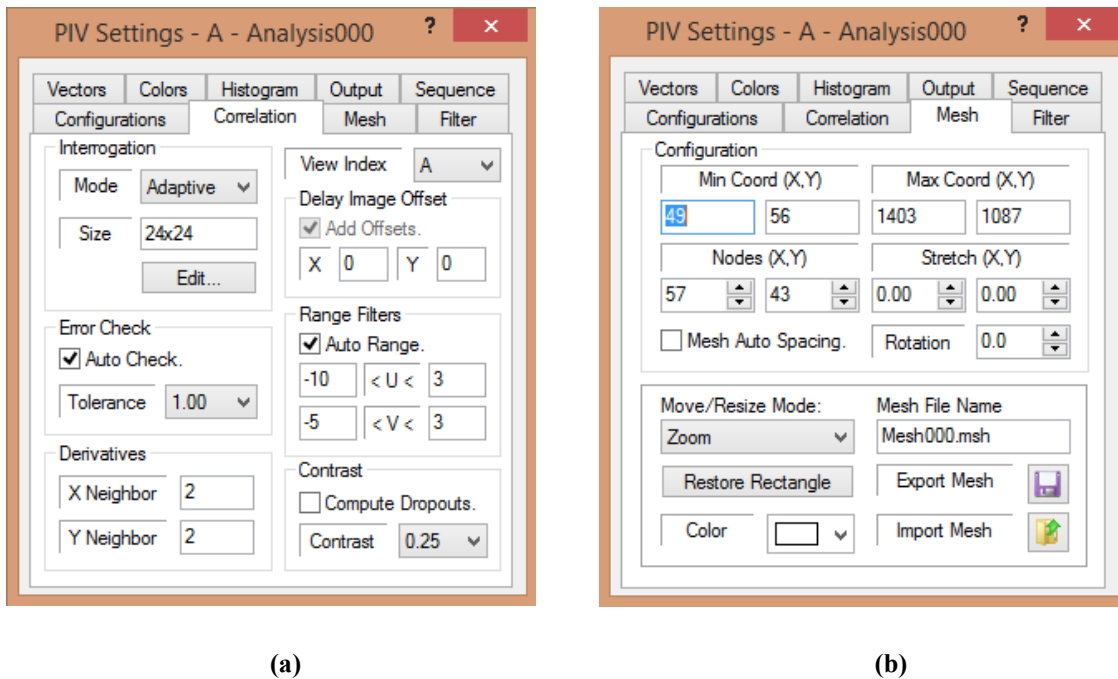


Figura 4.3. Parámetros de correlación y de malla del cálculo de vectores.

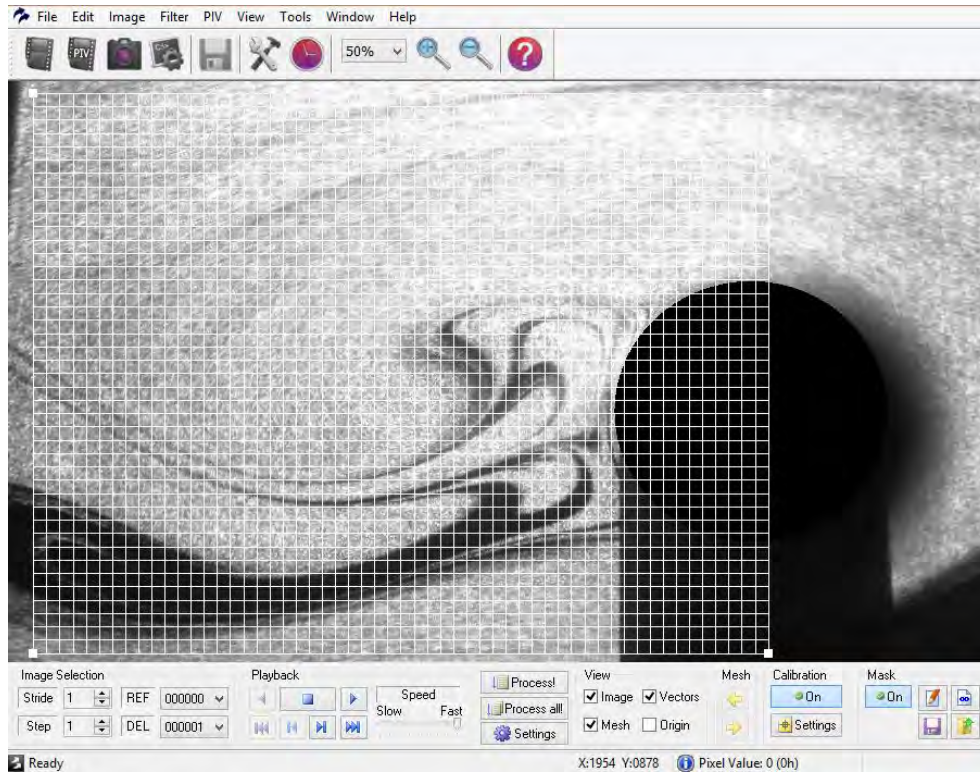


Figura 4.4. Malla del mismo tamaño que la generada por las áreas de interrogación.

Posteriormente se configuró proVISION para que la salida de la información se guardara en un archivo tipo ASCII, donde los datos son escritos en columnas con el siguiente orden: coordenadas (X, Y), vectores (U, V), y derivadas (U_x, U_y) (ver Figura 4.5).

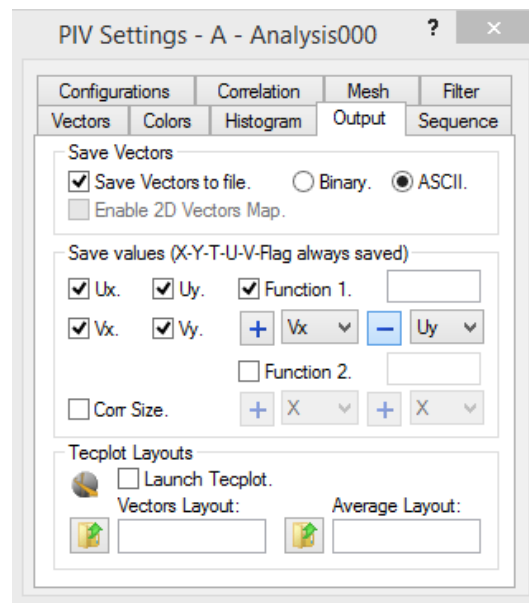


Figura 4.5. Configuración de los datos de salida de proVISION.

La separación de las imágenes en carpetas tuvo como objetivo hacer el análisis de cada plano de medición por separado, porque una característica importante del software es que no solo arroja los campos vectoriales de cada par de imágenes sino también el promedio de los vectores de todas las imágenes.

La última configuración antes del inicio del análisis fue ingresar la rejilla de calibración. El programa proVISION permite adjuntar una imagen de la rejilla de calibración y allí mismo escribir los parámetros de dicha malla (Figura 4.6). Esto permitió convertir de píxeles a coordenadas reales y así obtener los vectores de desplazamiento con unidades de metros. Un valor importante para que la magnitud del vector de velocidad este en metros por segundo; es la configuración de la frecuencia de muestreo (1,000 Hz) en la sesión del análisis, esta tuvo que ser indicada en el proceso de importación de las imágenes.

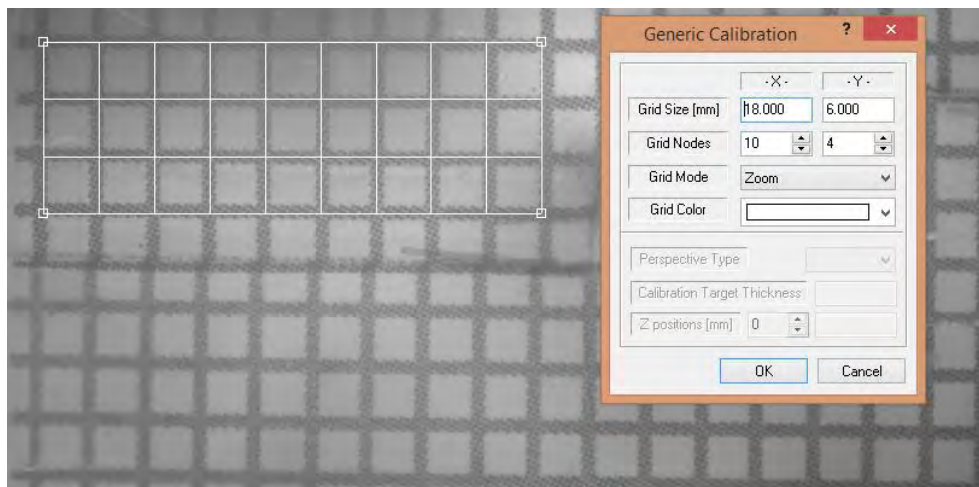


Figura 4.6. Rejilla de calibración del sistema PIV.

Con la configuración del análisis ya hecha se comenzó a resolver las 10,000 imágenes de las 10 secciones del volumen. Un mapa de velocidad es mostrado en la Figura 4.8 muestra que los vectores siguen el flujo lo cual es un indicativo de que el análisis de la imagen se llevó de manera correcta. En la Figura 4.8 se observa el mapa de vectores graficados sobre la imagen.

Del procesamiento de las 10,000 imágenes se obtuvieron 10 archivos ASCII. Cada archivo contiene el promedio del campo vectorial de 1,000 imágenes. Para juntar toda la información fue necesario realizar un programa en MATLAB de lectura de los archivos y de ordenamiento de los datos. Este programa se encuentra anexo en el Apéndice A Figura 40.

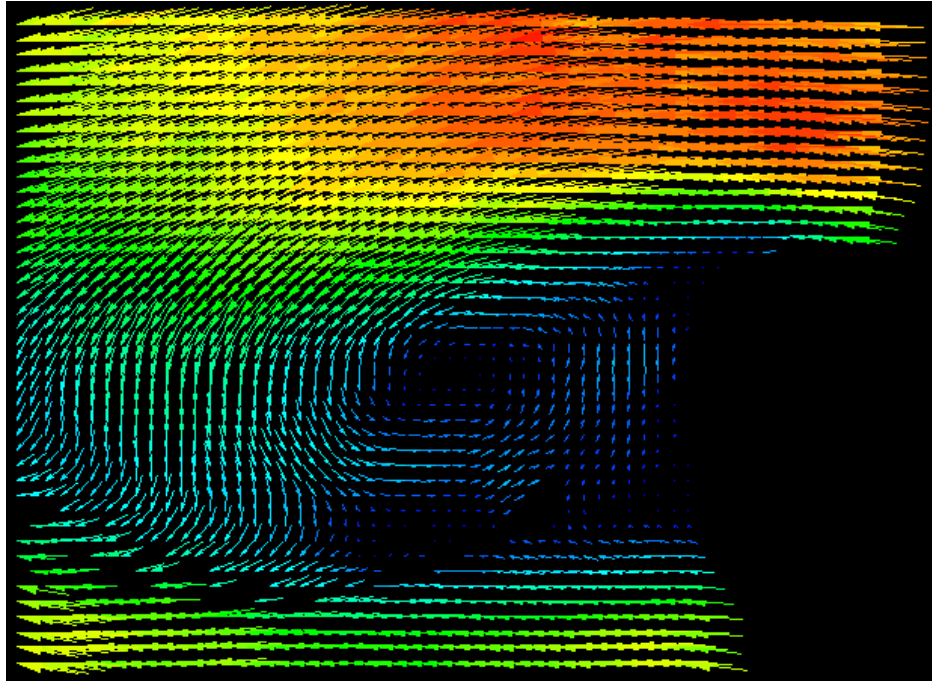


Figura 4.7. Mapa de vectores de la solución de primer par de imágenes del plano de medición 1

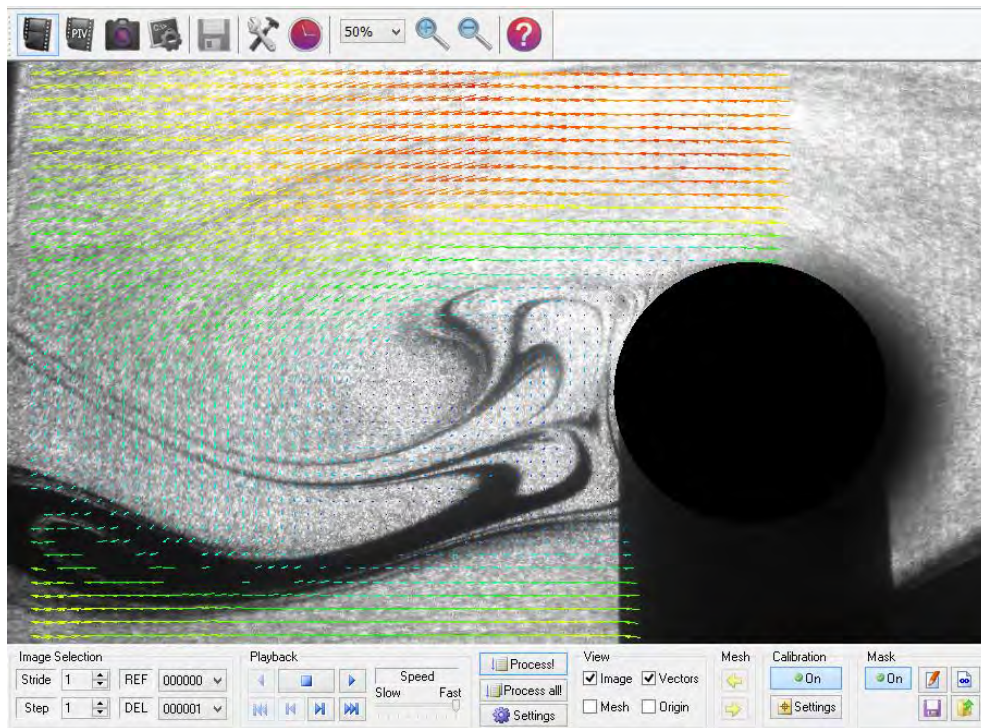


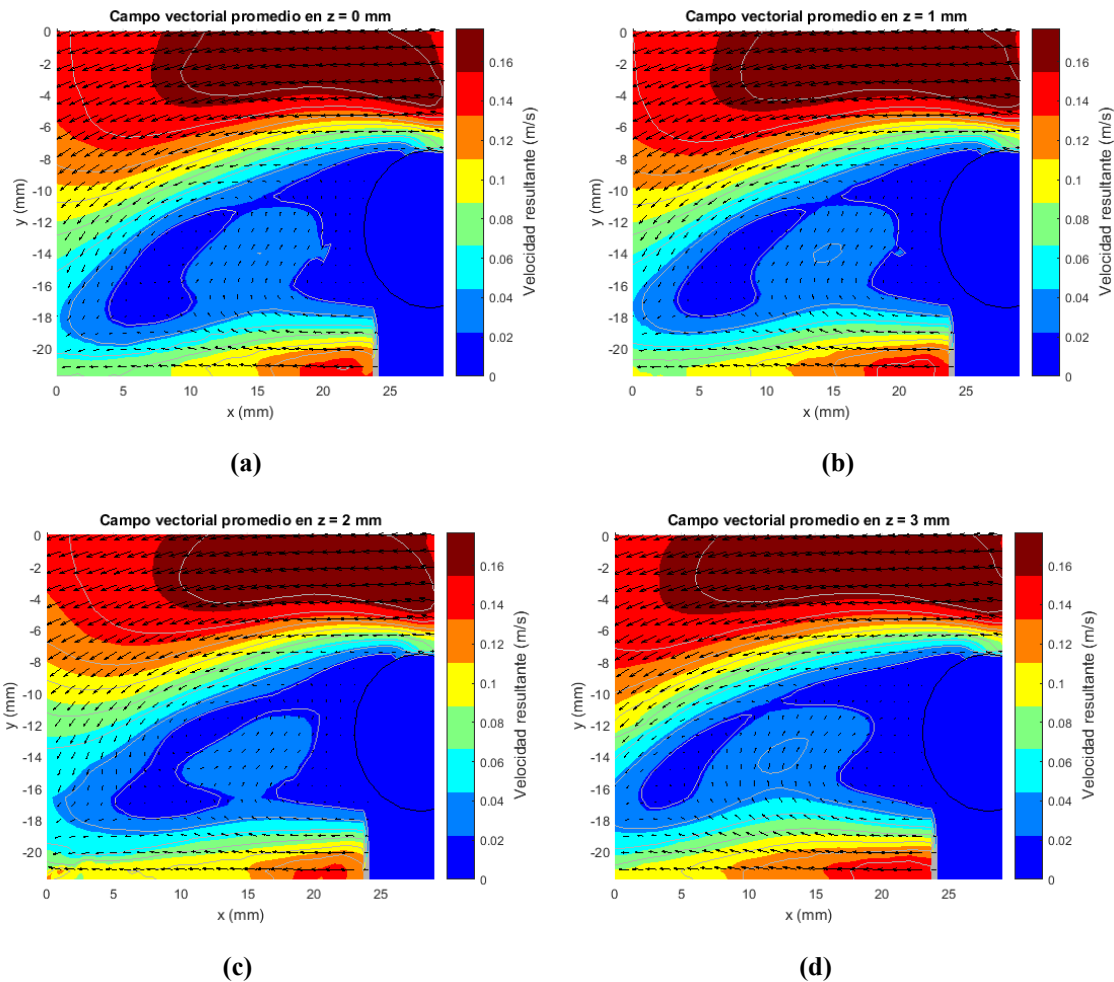
Figura 4.8. Mapa de vectores con imagen de la solución de primer par de imágenes del plano de medición 1 con imagen.

Con los datos del campo vectorial ya importados se graficó cada uno de los planos que conforman al flujo dentro del volumen. Estos campos vectoriales con desplazamiento cada milímetro son ilustrados en la Figura 4.9 con inciso a, al j.

En estos gráficos se observa el comportamiento típico de un flujo a número de Reynolds de 90 que pasa a través de un cilindro con un diámetro de 10.2 milímetros, también se aprecia con un mapa de colores la velocidad resultante de este campo de velocidades donde la velocidad máxima es 0.16 m/s. En general, todo flujo de fluido se caracteriza por el número de Reynolds (Re). El número de Reynolds se usa principalmente para describir los rangos del flujo de un fluido y nos dice que tan turbulento puede ser el flujo de fluido bajo condiciones específicas.

Las secciones muestran que los rangos de velocidad son los mismos pero tiene un comportamiento diferente que es ocasionado por el perfil parabólico de velocidad de la sección de pruebas. Al juntar todos los planos de medición se construyó el volumen del flujo que parece en la Figura 4.10.

Los resultados obtenidos permiten conocer el comportamiento espacial y el promedio temporal de la velocidad del flujo que cruza un objeto dentro de un volumen, con estos datos experimentales es posible hacer análisis de diferentes tipos; uno de ellos es el análisis de vorticidad que es presentado en la Figura 4.11 y Figura 4.12. Estos análisis son necesarios para la toma de decisiones de diseño de cuerpos aerodinámicos.



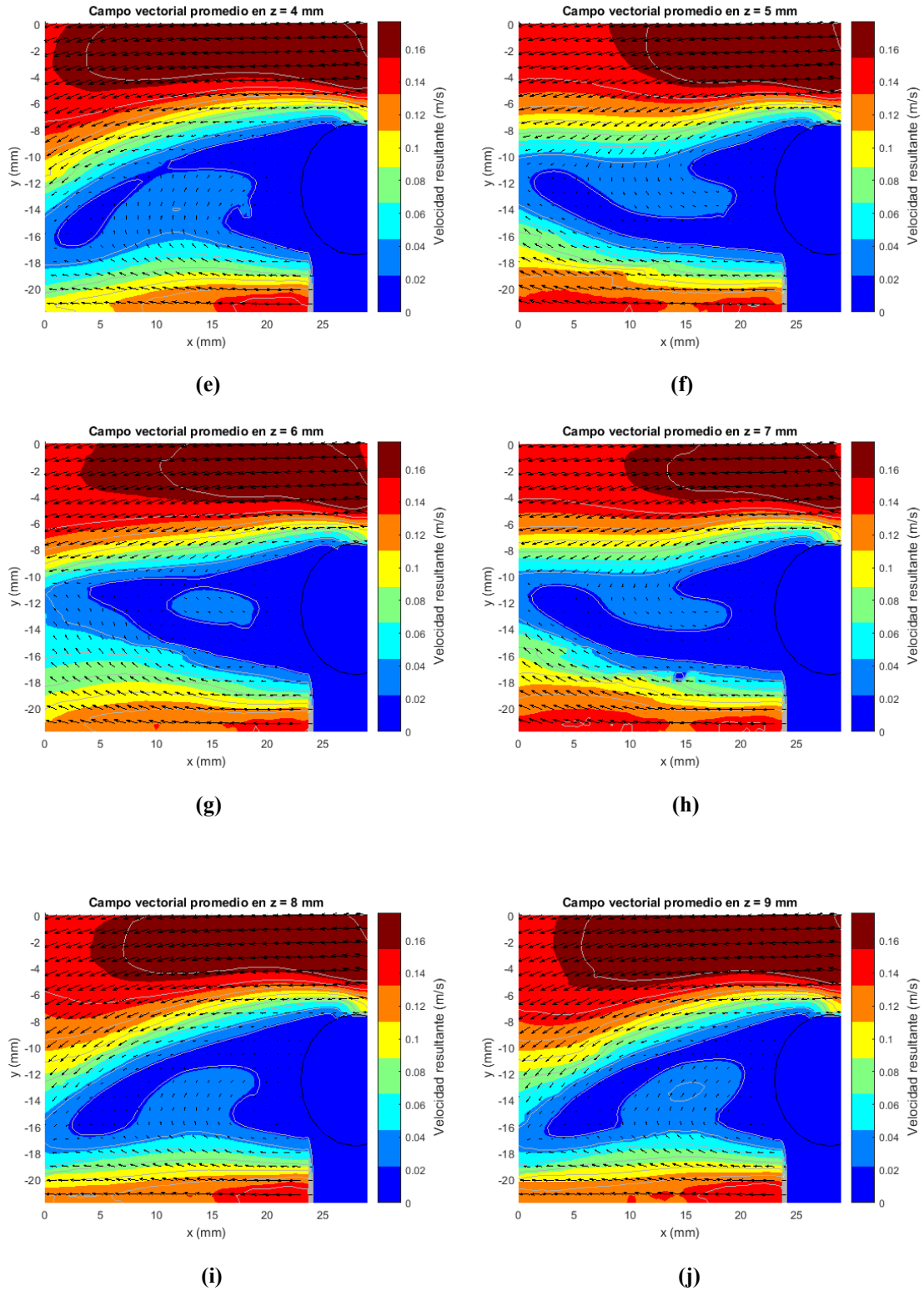


Figura 4.9. Campo vectorial y velocidad resultante de los 10 planos de medición de $z=0$ mm a $z=9$ mm.

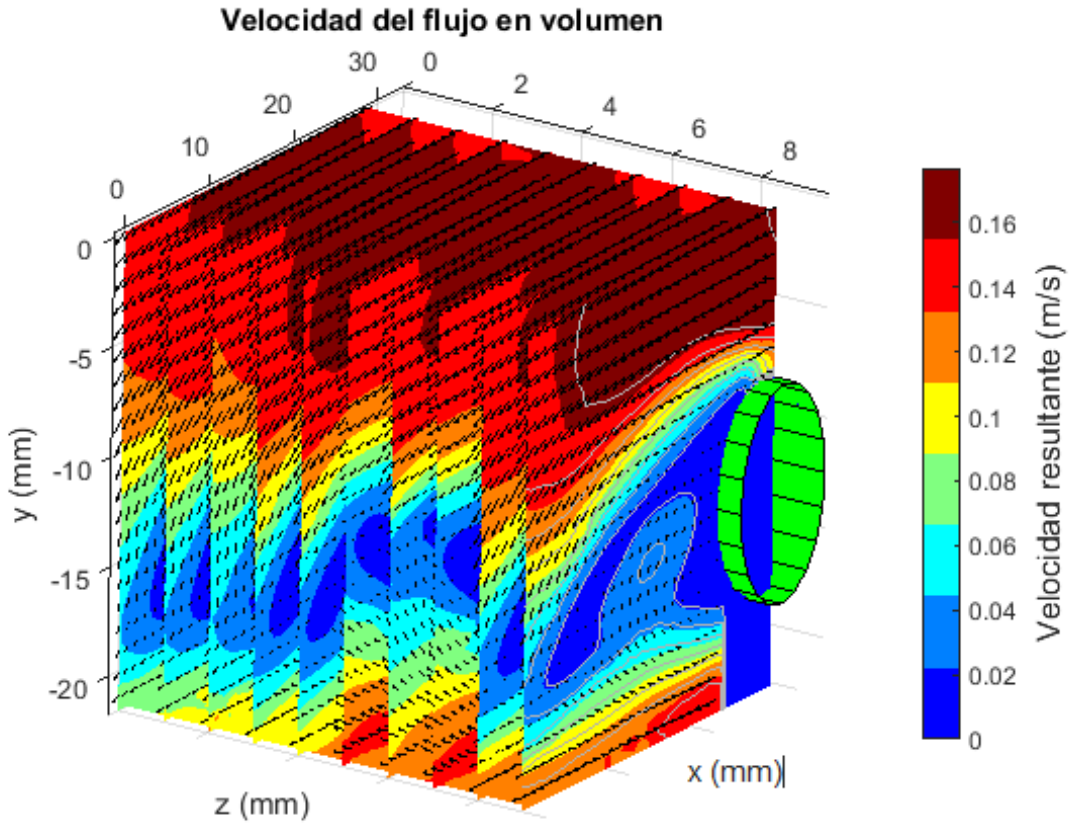
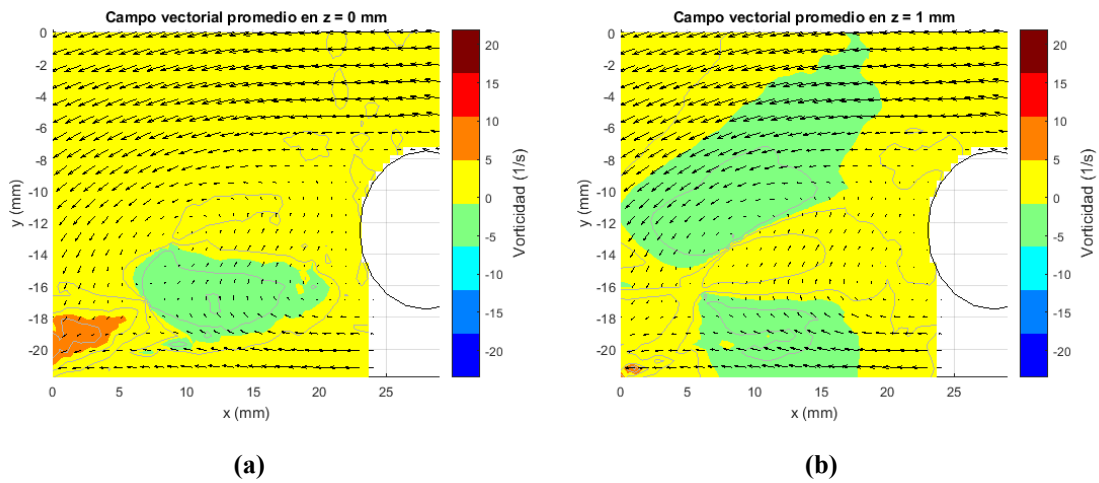
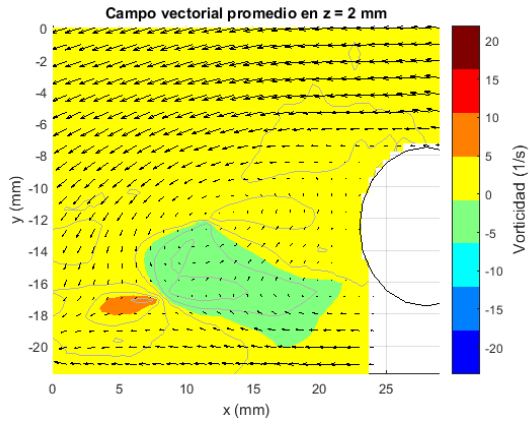
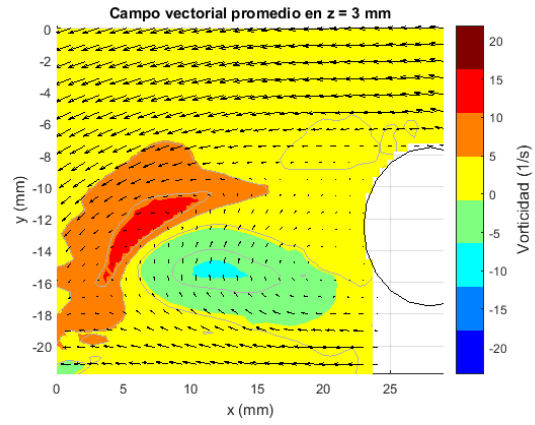


Figura 4.10. Planos de velocidad que construyen el flujo que atraviesa un cilindro dentro de un volumen.

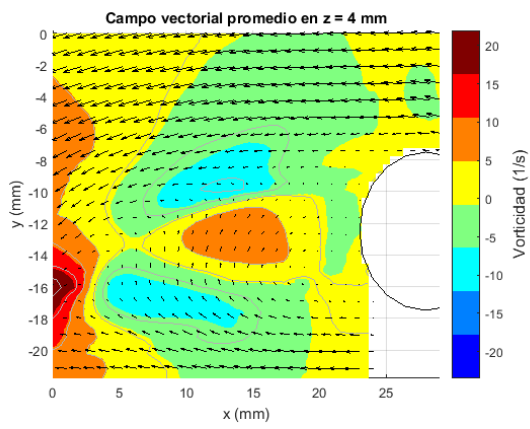




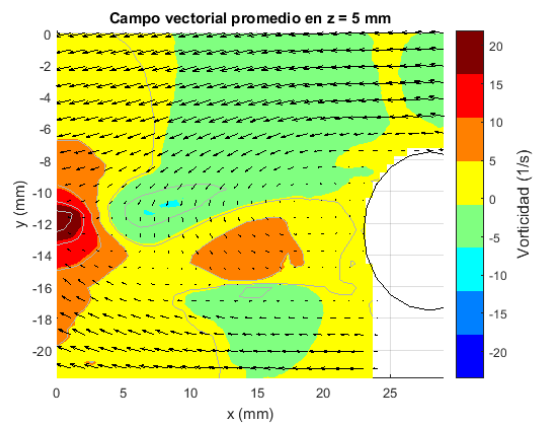
(c)



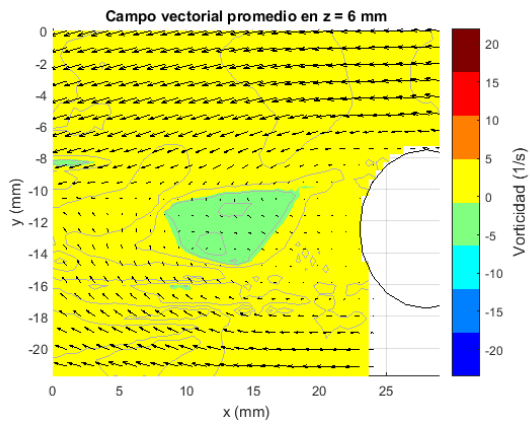
(d)



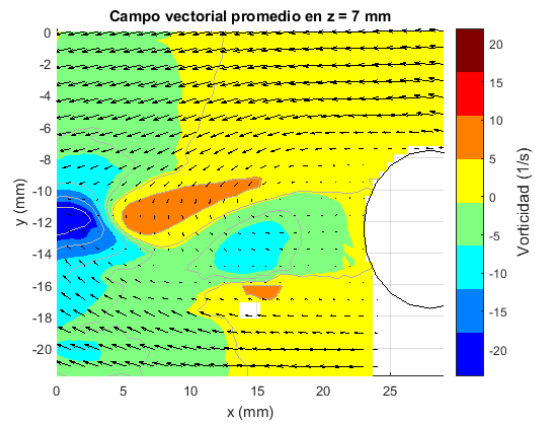
(e)



(f)



(g)



(h)

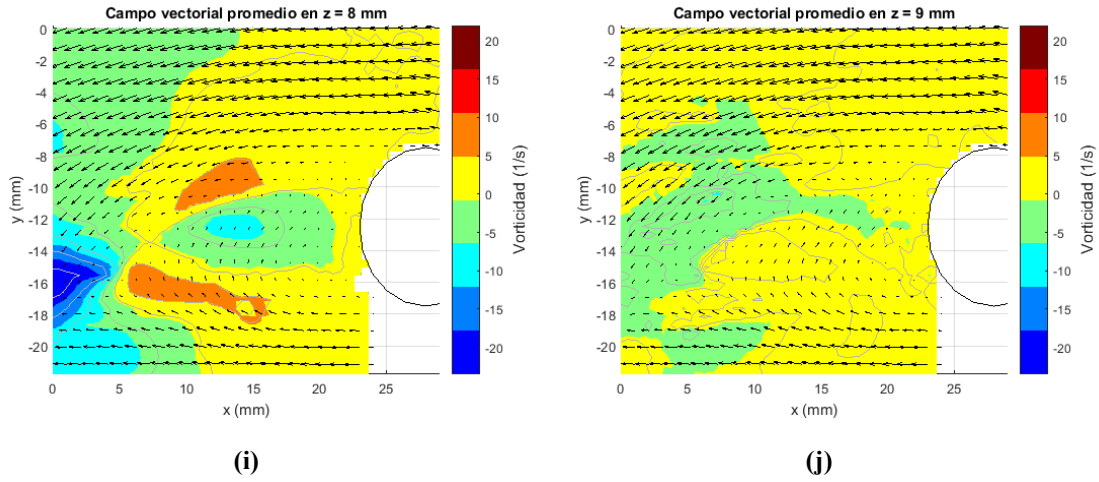


Figura 4.11. Campo vectorial y vorticidad de los 10 planos de medición de $z=0$ mm a $z=9$ mm.

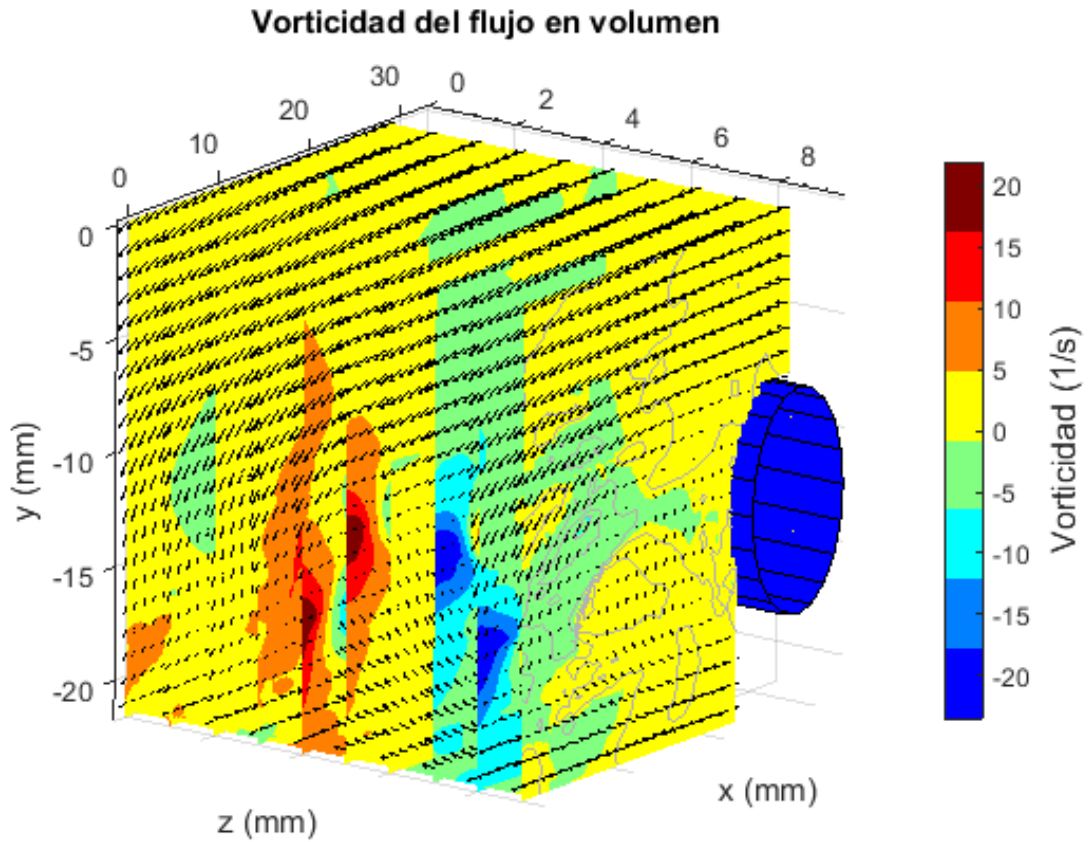


Figura 4.12. Planos de vorticidad que construyen el flujo que atraviesa un cilindro dentro de un volumen.

4.3 Conclusiones y trabajo futuro.

La técnica PIV fue implementada para la medición de velocidad en un volumen. Para aplicar esta técnica y determinar de la velocidad en flujo de fluido. Se construyó un túnel de viento de baja velocidad, controles para el movimiento lateral del túnel de viento, y la instrumentación para dosificar partículas al flujo de fluido. El túnel de viento fue diseñado de tal manera que se puede montar sobre una mesa óptica. También se desarrolló dentro del laboratorio un sistema para la extracción de partículas residuales de la experimentación con PIV.

La técnica PIV se aplicó con éxito al flujo que pasa través de un cilindro de 10.2 mm de diámetro. La velocidad del flujo fue establecida para tener un número Re de 90. Los resultados obtenidos permitieron conocer de manera experimental la aerodinámica de un flujo a través del cilindro. Además, estos resultados pueden ser utilizados para validar simulaciones numéricas relacionadas con dinámica de fluidos.

Todos los elementos del arreglo contribuyeron a la obtención de imágenes con buen contraste de partículas ya que la calidad de las imágenes fue un factor para la extracción de la información del flujo. En resumen, de acuerdo a lo esperado los resultados fueron satisfactorios. Sin embargo, existen mejoras que se le pueden hacer al sistema para obtener mejores resultados, estas mejoras se proponen como trabajo futuro y son enlistadas a continuación.

Mejoras técnicas relacionadas con el funcionamiento del túnel de viento:

- Mejorar el sistema de dosificación de partículas para que la región en donde se deposita el humo en el túnel de viento sea más grande y que la concentración de partículas sea más homogénea.
- Eliminar reflexiones en las lentes cilíndricas y en la sección de pruebas para aprovechar con eficiencia la intensidad de la potencia del láser
- Caracterizar el túnel de viento para conocer los rangos de velocidad y los niveles de turbulencia que se presentan en la sección de prueba.
- Diseñar una malla de supresión de componentes de velocidad no paralelas al flujo de fluido para que ayude a distribuir homogéneamente las partículas que son introducidas al túnel de viento.
- Sincronización del motor del túnel de viento con el motor de extracción para incrementar la velocidad en la sección de pruebas.

Mejoras relacionados con el análisis de las imágenes de PIV y extracción de información a partir de los campos de velocidad

- Procesamiento de los datos para a partir de los planos de la información se pueda calcular la tercera componente de velocidad del flujo.
- Hacer análisis de niveles de turbulencia en los objetos en estudio.
- Análisis de datos para extraer información relevante de los vórtices generados por los objetos en estudio.

- Implementación de otra técnica de medición del flujo en un volumen; como por ejemplo holografía digital.
- Aplicar control aerodinámico para la eliminación de elementos de vorticidad que no son deseables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Raffel, C. E. Willert, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry*. New York: Springer, 1998.
- [2] “Slow Motion High Speed Digital Cameras | Integrated Design Tools Inc.” [Online]. Available: <https://idtvision.com/>. [Accessed: 28-Aug-2017].
- [3] L. M. Lourenco, A. Krothapalli, and C. A. Smith, *Particle Image Velocimetry, in speckle metrology*. New York: R.S, 1989.
- [4] R. M., G. M., R. O., and K. J., *Feasibility study of three-dimensional PIV by correlating images of particles within parallel light sheet planes*. 1995.
- [5] Joseph T. Verdeyen, *Laser Electronics*, Third Edit. New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- [6] “Beam Shaping with Cylindrical Lenses.” [Online]. Available: <https://www.newport.com/n/beam-shaping-with-cylindrical-lenses>. [Accessed: 04-Sep-2017].
- [7] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*, Third. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- [8] D. M. Hernández, “High-accuracy particle positioning together with optimum data display for velocimetry applications,” Centro de Investigaciones en Optica A. C., 2000.
- [9] J. F. Delgado and M. L. Riethmuller, “Laser Speckle Velocimetry Three Dimensional Measurements,” Belgium, 1986.
- [10] A. Cenedense and A. Paglialunga, “New technique for the determination of the third velocity component with PIV,” 1988.
- [11] E. Dinkelacker, M. Schifer, W. Ketterle, and J. Wolfrum, “Determination of the third velocity component with PTA using an intensity graded light sheet,” *SPRINGER*, p. 3, 1992.
- [12] M. A. Gonzalez Hernandez, A. I. Moreno Lopez, A. A., J. M. Perales Perales, Y. Wu, and S. Xiaoxiao, “Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel,” *Wind Tunn. Des. Their Divers. Eng. Appl.*, pp. 3–28, 2013.
- [13] M. K. Panda and A. K. Samanta, “Design of low cost open circuit wind tunnel - A case study,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 30, pp. 1–7, 2016.
- [14] R. L. Boylestad, “Introducción al análisis de circuitos,” Decimosegu., PEARSON, 2011.
- [15] “Arduino Uno Rev3.” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Accessed: 16-Sep-2017].

APÉNDICE A

Apéndice A Figura 1. Hoja de datos de motores extractores.



AB

AERO BOOSTER

AERO EXTRACTOR - INYECTOR TUBULAR
LINEA COMERCIAL ECONOMICA

6", 8", 10", 12" y 14" DE DIÁMETRO

AERO EXTRACTOR - INYECTOR BOOSTER

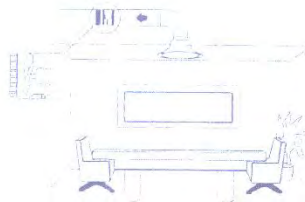
| MODELO | AB-6 | AB-8 | AB-10 | AB-12 | AB-14 |
|------------------------------------|-------------|-------------|------------|----------|----------|
| Diámetro | 6" | 8" | 10" | 12" | 14" |
| Caudal Máximo (cfm) | 240 | 420 | 650 | 1150 | 1500 |
| Dimensiones (Ø Booster x Longitud) | 6" X 7 1/2" | 8" X 7 1/2" | 10" X 8" | 12" X 9" | 14" X 9" |
| Ø Aspas X No. de alabes | 5 1/2" X 5 | 7" X 5 | 8 3/4" X 5 | 11" X 5 | 12" X 5 |
| Peso (lb.) | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| Potencia (HP) | 1/100 | 1/100 | 1/70 | 1/40 | 1/40 |
| Consumo Máximo (watts) | 38 | 38 | 35 | 71 | 71 |
| Amperaje Máximo (A) | 1.00 | 1.00 | 0.55 | 1.00 | 1.00 |
| R.P.M. | 3000 | 3000 | 1400 | 1550 | 1550 |
| Voltaje @ 60 hz | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Lubricación permanente | X | X | X | X | X |

APLICACIONES

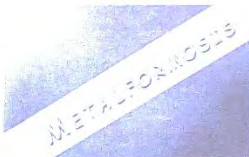
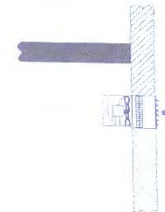
Mejora el flujo de aire en sistemas de ventilación y aire acondicionado.



Extracción ó inyección por conducto individual.



Reposición de aire fresco ó descarga directo a exterior.



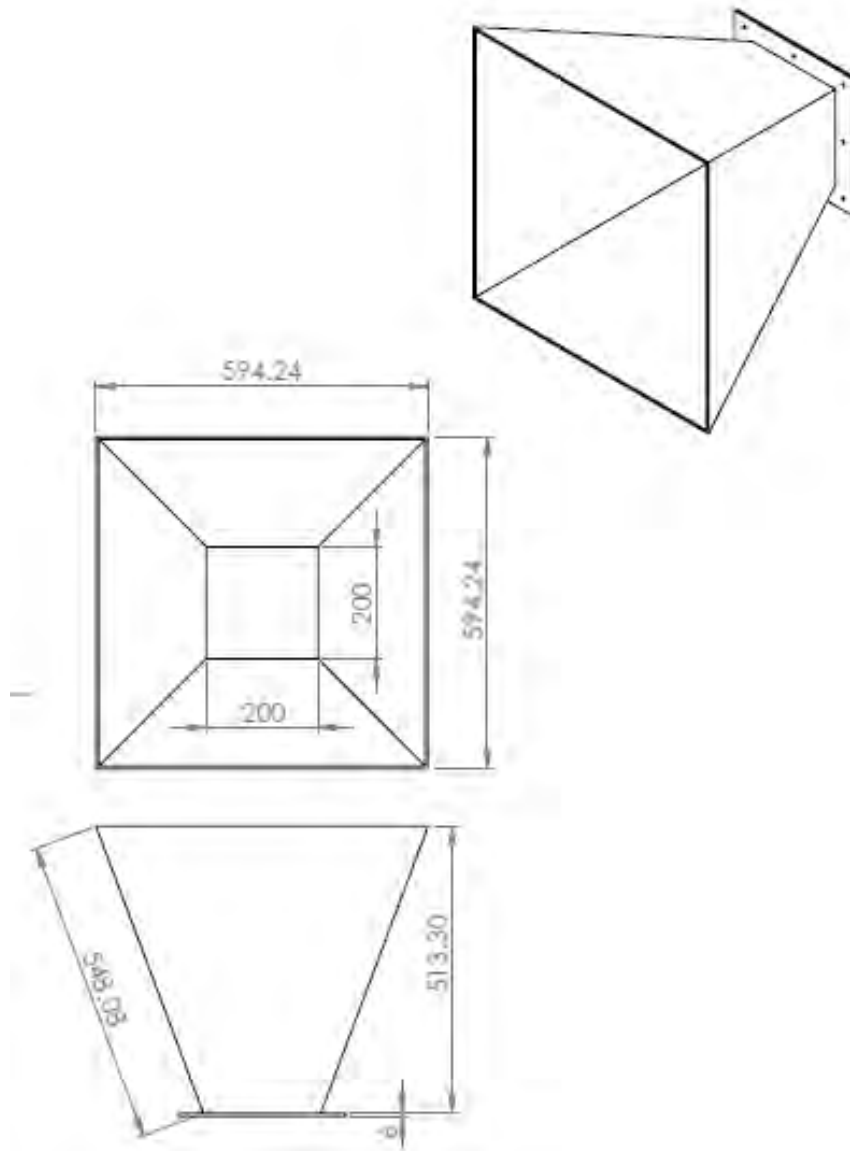
Oficinas:
Pradera, 703 A
Col. Manzanaras
León, Gto.

e-mail: metal_aire@hotmail.com
Tel. (477) 711 97 22 / (477) 711 70 58
ID 62*898118*1 / Nextel 326 04 42

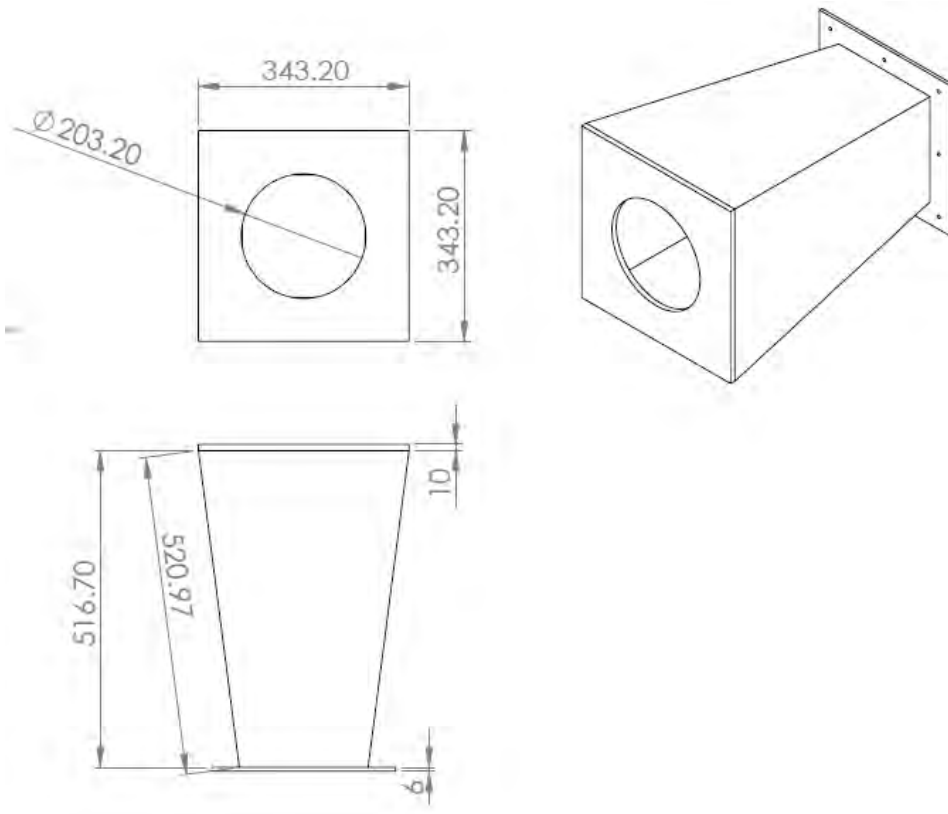
Metalformosis se reserva el derecho de modificación sin previo aviso

Distribuidor Autorizado:

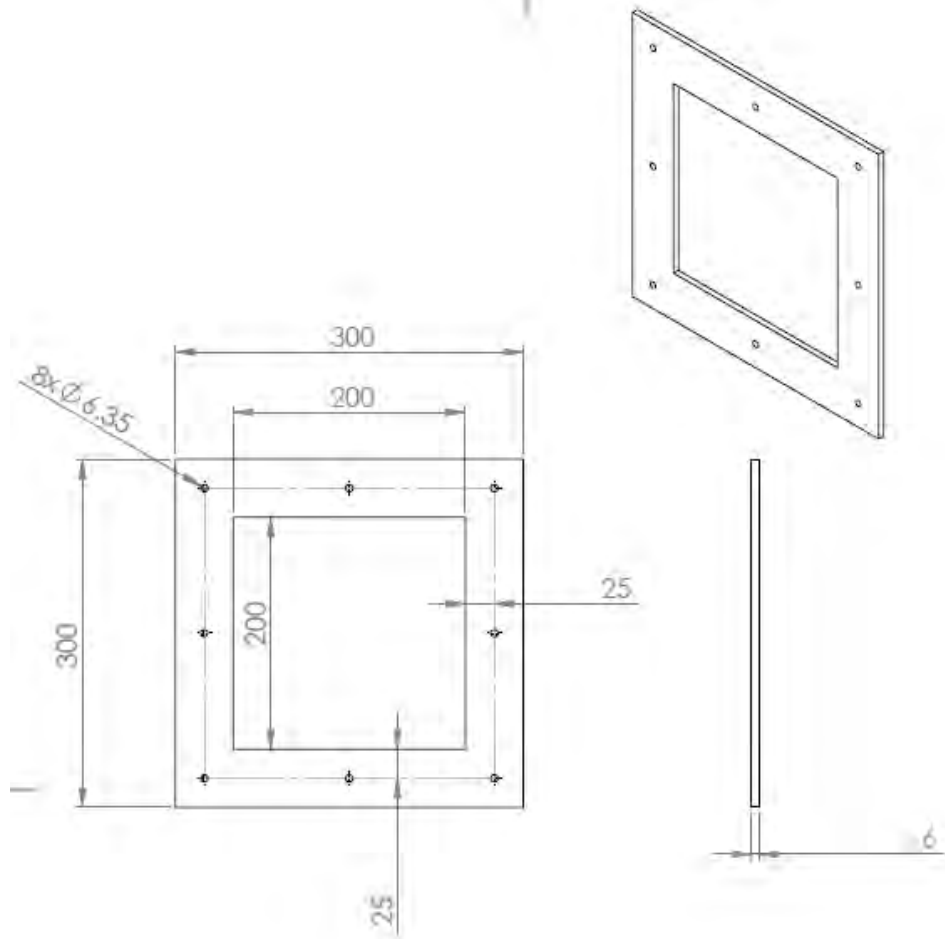
Apéndice A Figura 2. Dimensiones del cono de contracción con brida



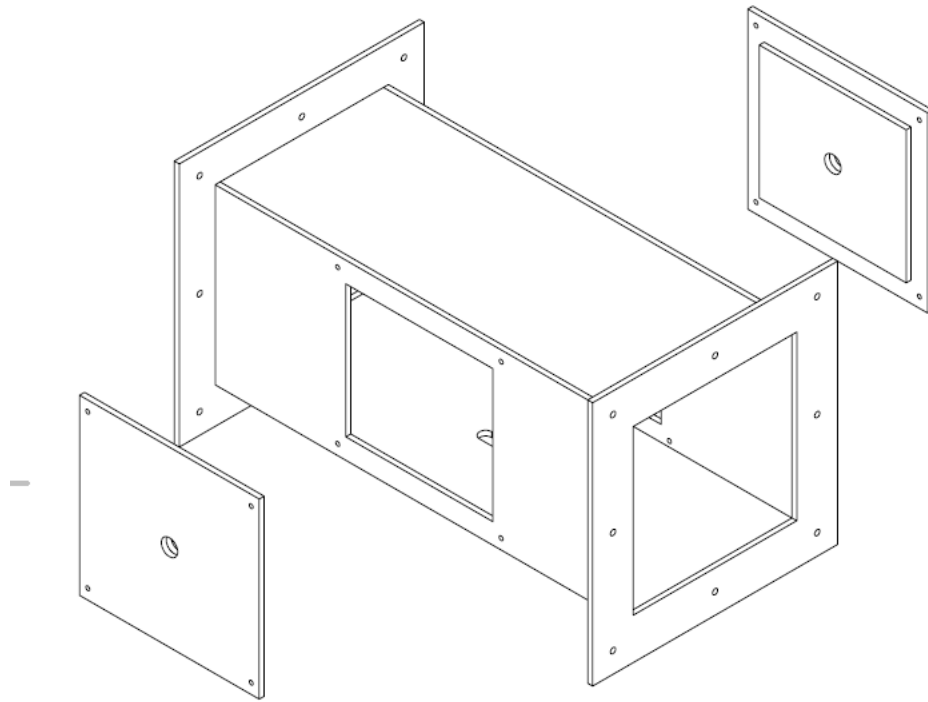
Apéndice A Figura 3. Dimensiones del difusor con brida



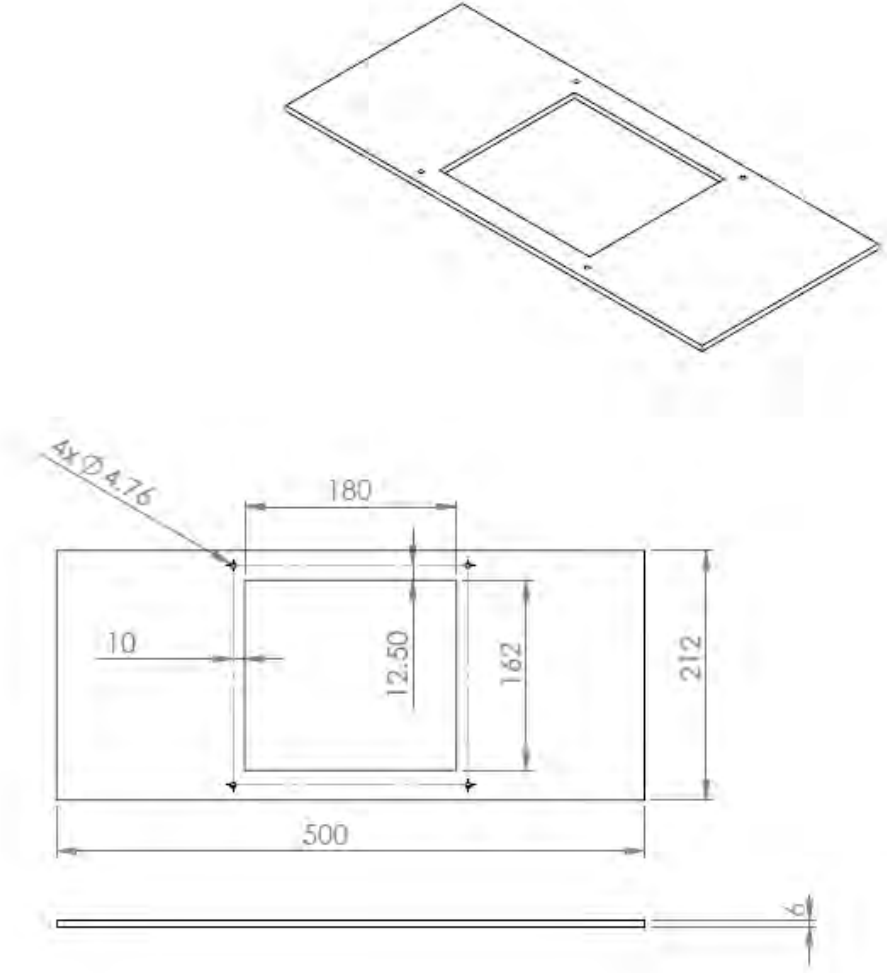
Apéndice A Figura 4. Dimensiones de la brida de la cámara de pruebas, difusor y cono de contracción.



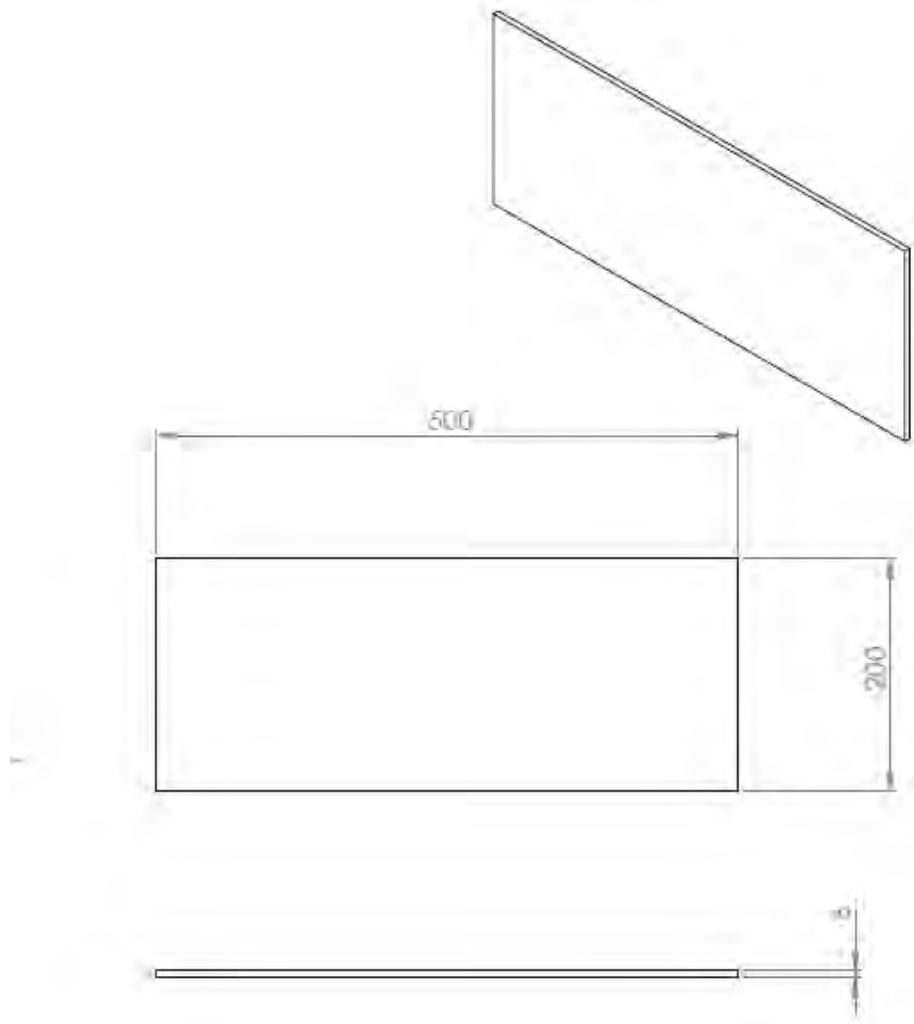
Apéndice A Figura 5. Ensamble de la cámara de pruebas



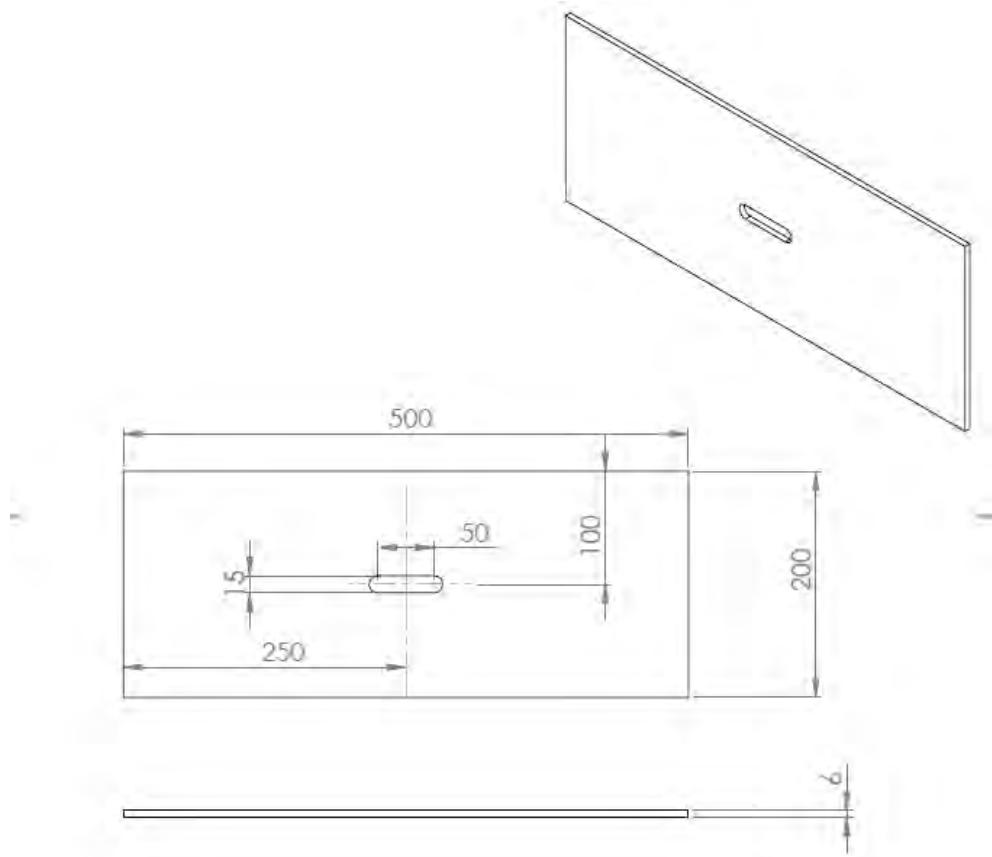
Apéndice A Figura 6. Dimensiones de las partes lateral izquierda y derecha de la cámara de pruebas.



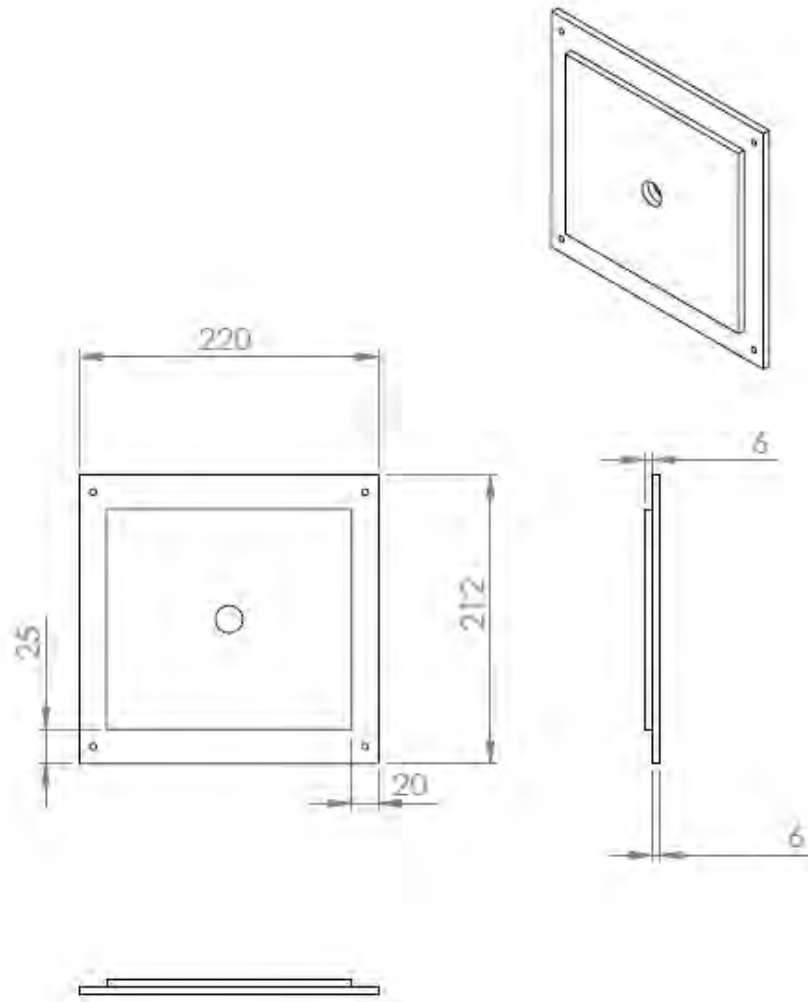
Apéndice A Figura 7. Dimensiones de la parte superior de la cámara de pruebas.



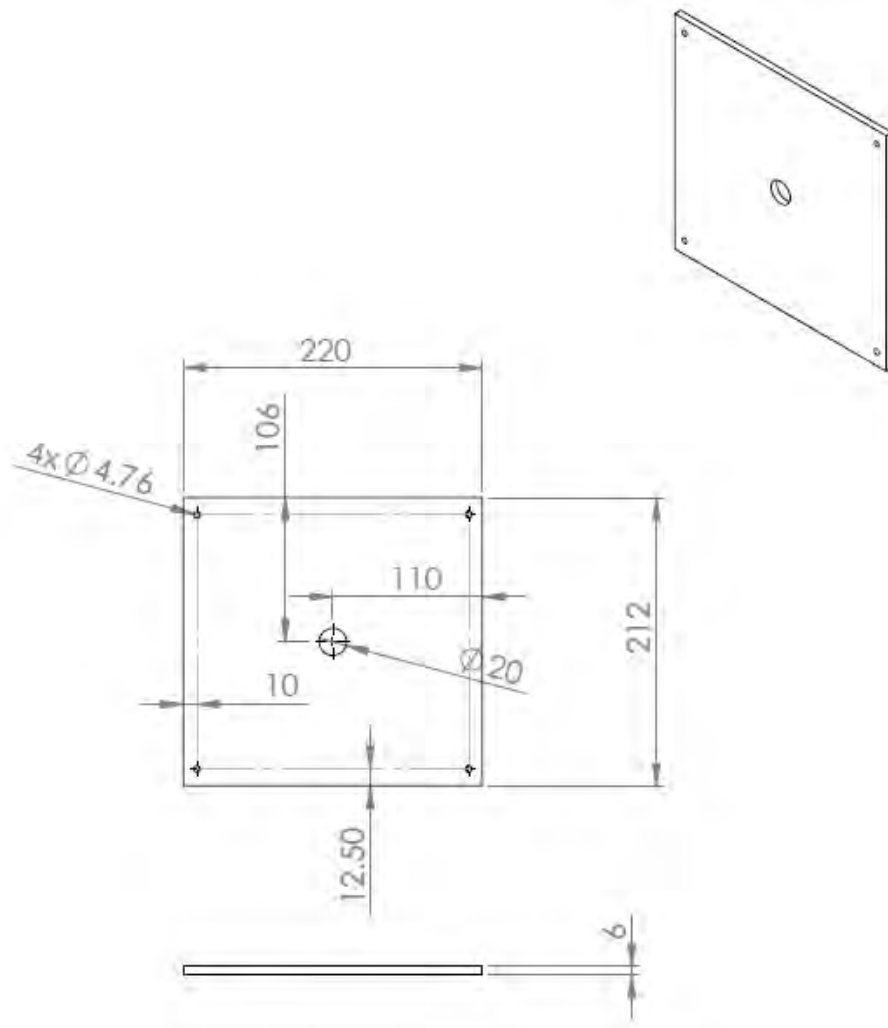
Apéndice A Figura 8. Dimensiones de la parte inferior de la cámara de pruebas.



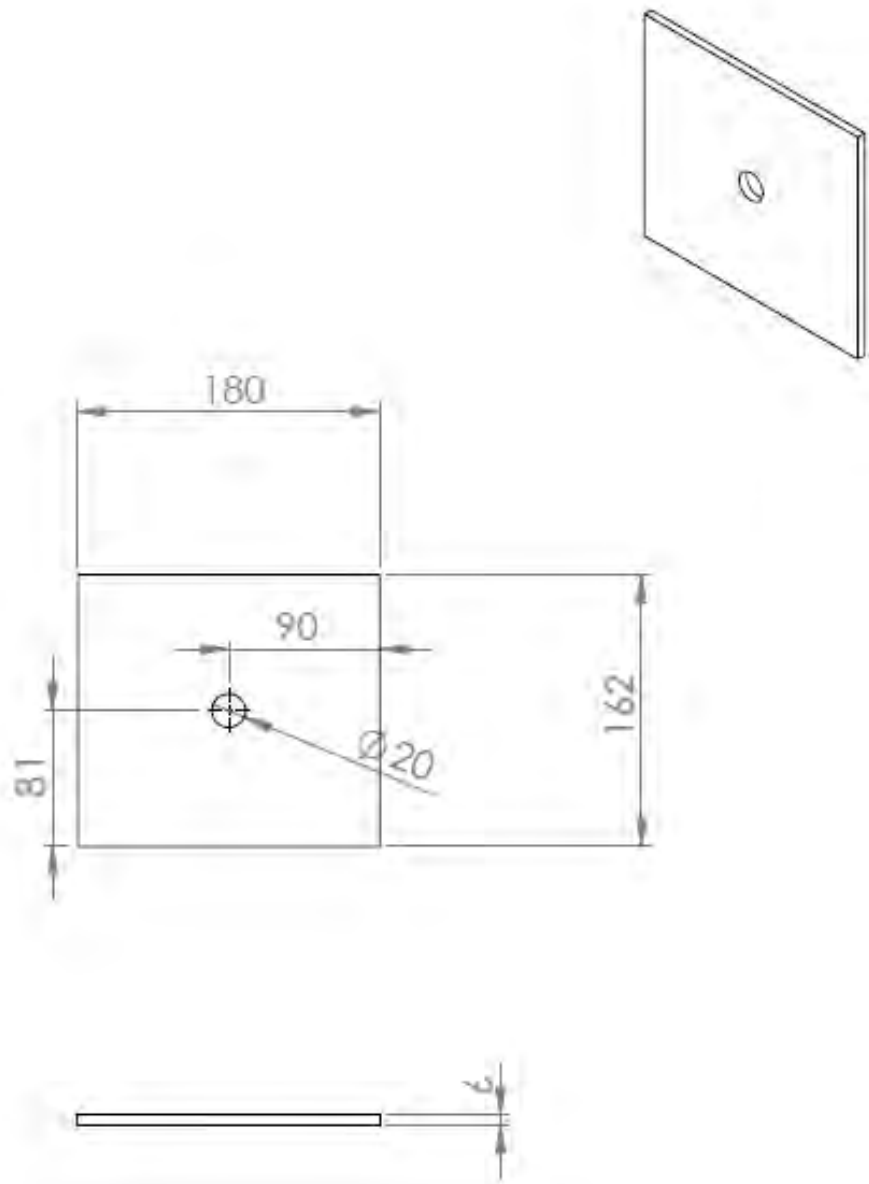
Apéndice A Figura 9. Dimensiones de puerta de la cámara de pruebas ya pegada, compuesta por la parte 1 y la parte 2.



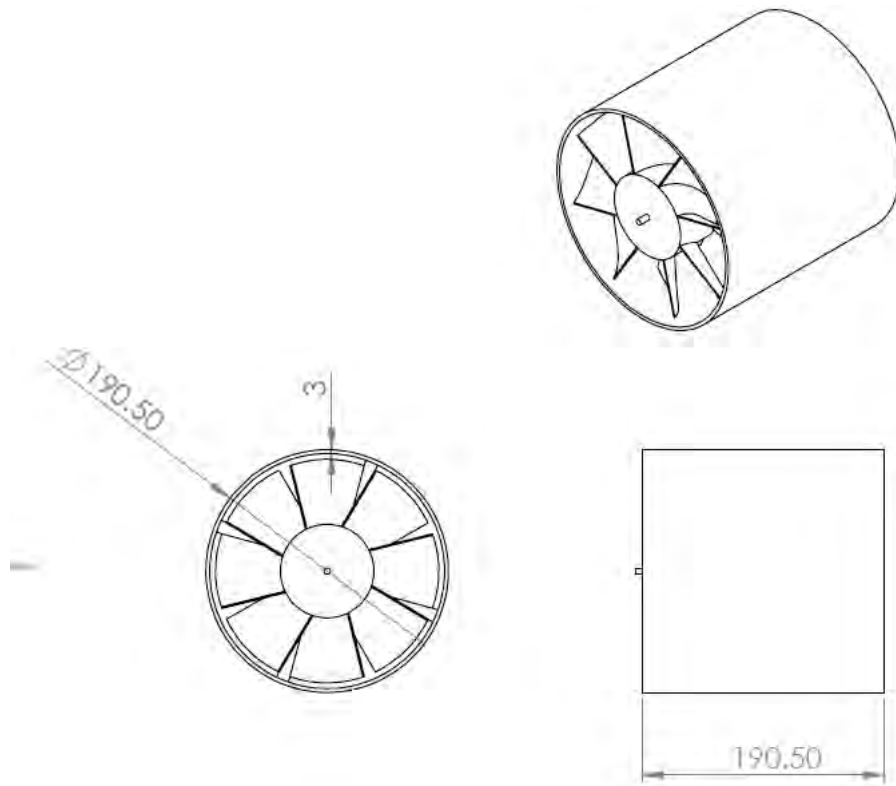
Apéndice A Figura 10. Dimensiones de la parte 1 de la puerta de la cámara de pruebas.



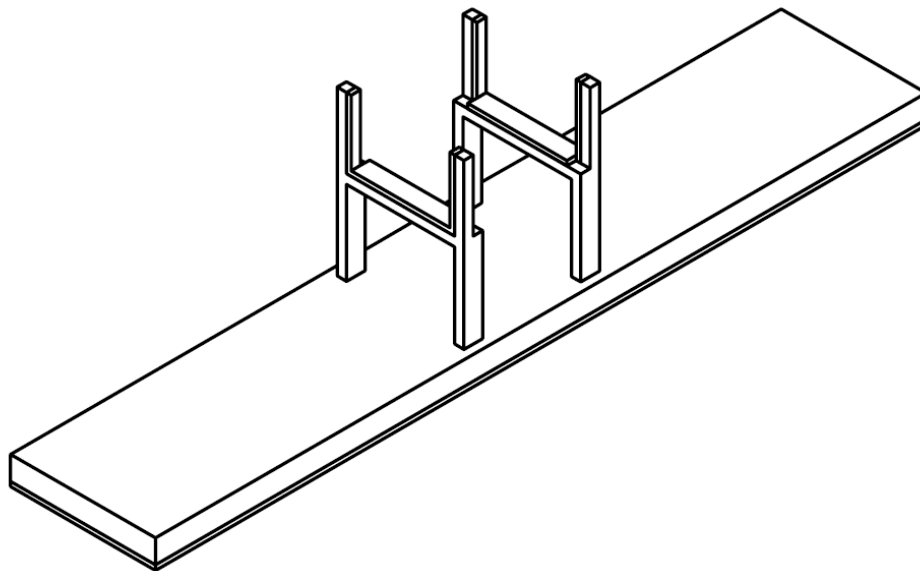
Apéndice A Figura 11. Dimensiones de la parte 2 de la puerta de la cámara de pruebas



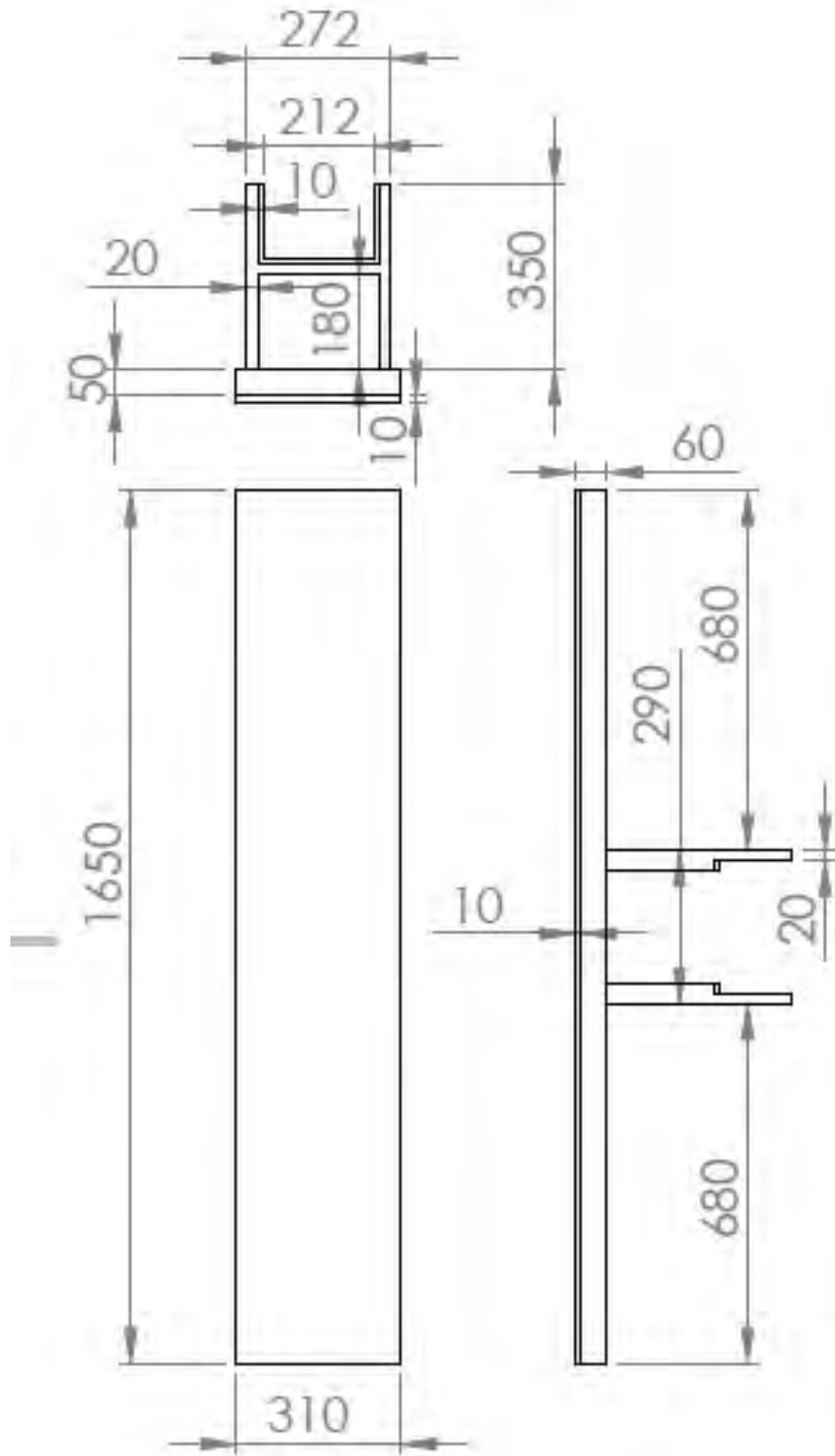
Apéndice A Figura 12. Dimensiones del Motor extractor del túnel de viento.



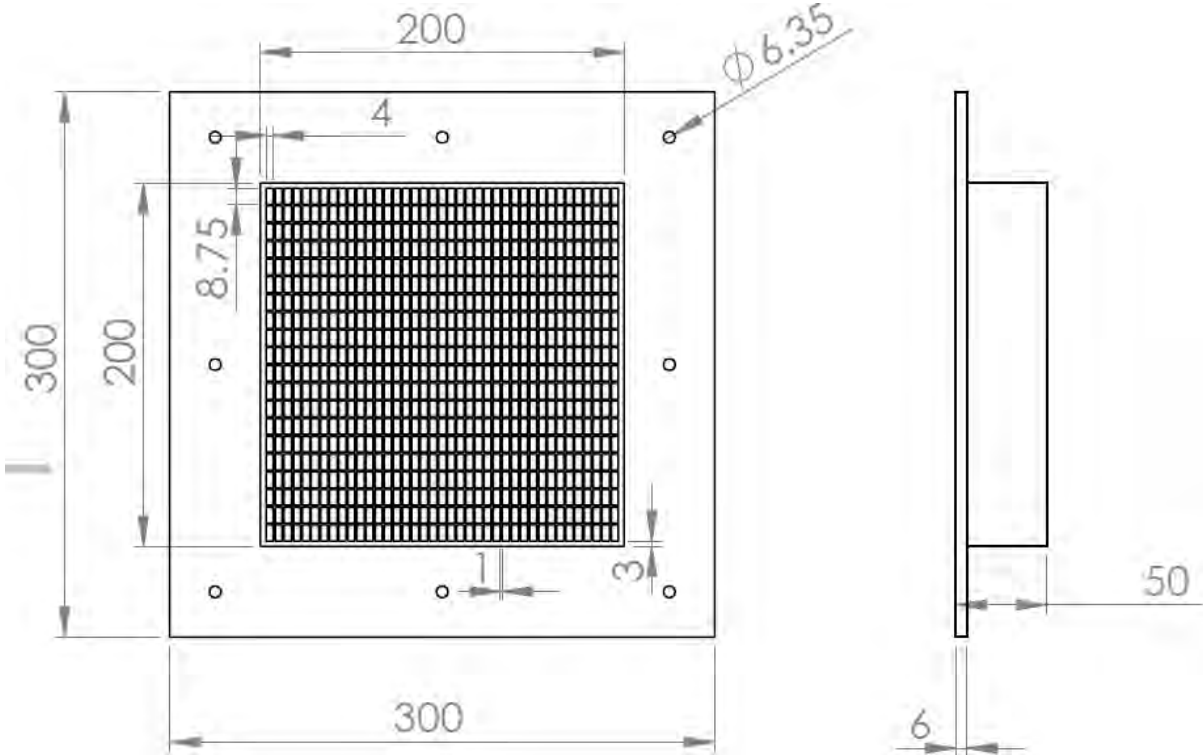
Apéndice A Figura 13. Soporte del túnel de viento.



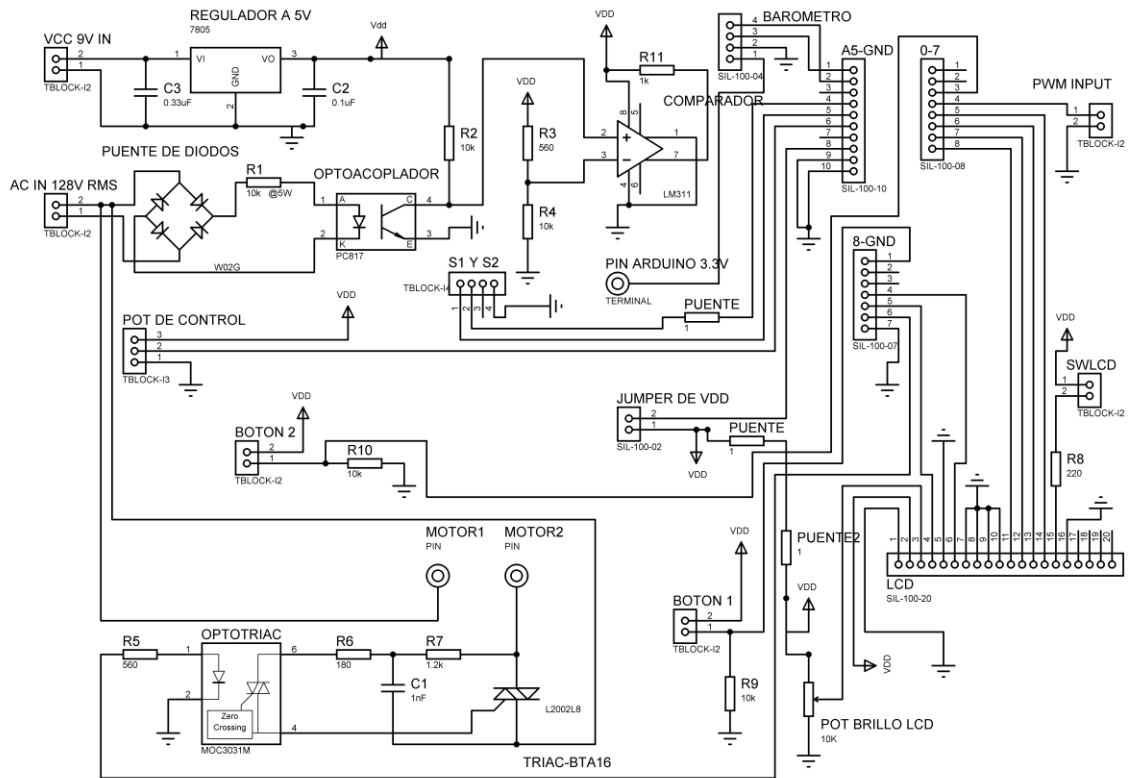
Apéndice A Figura 14. Dimensiones del soporte del túnel de viento.



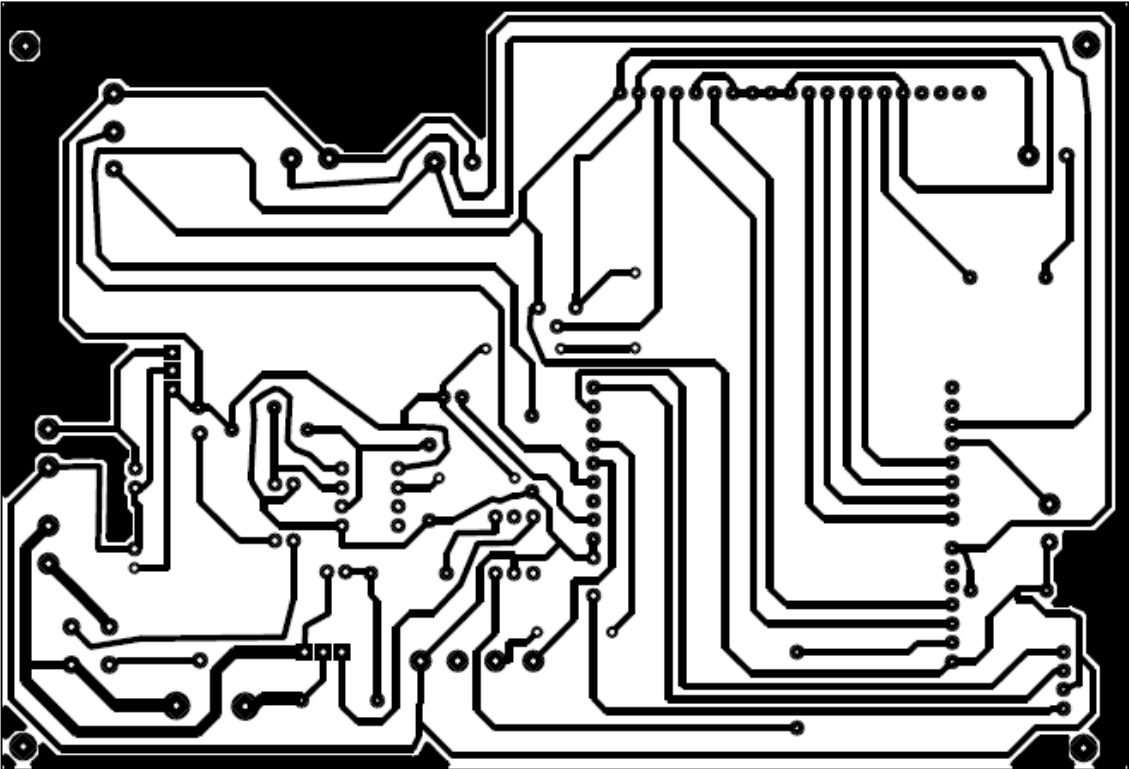
Apéndice A Figura 15. Rejilla de eliminación de componentes de velocidad no deseados.



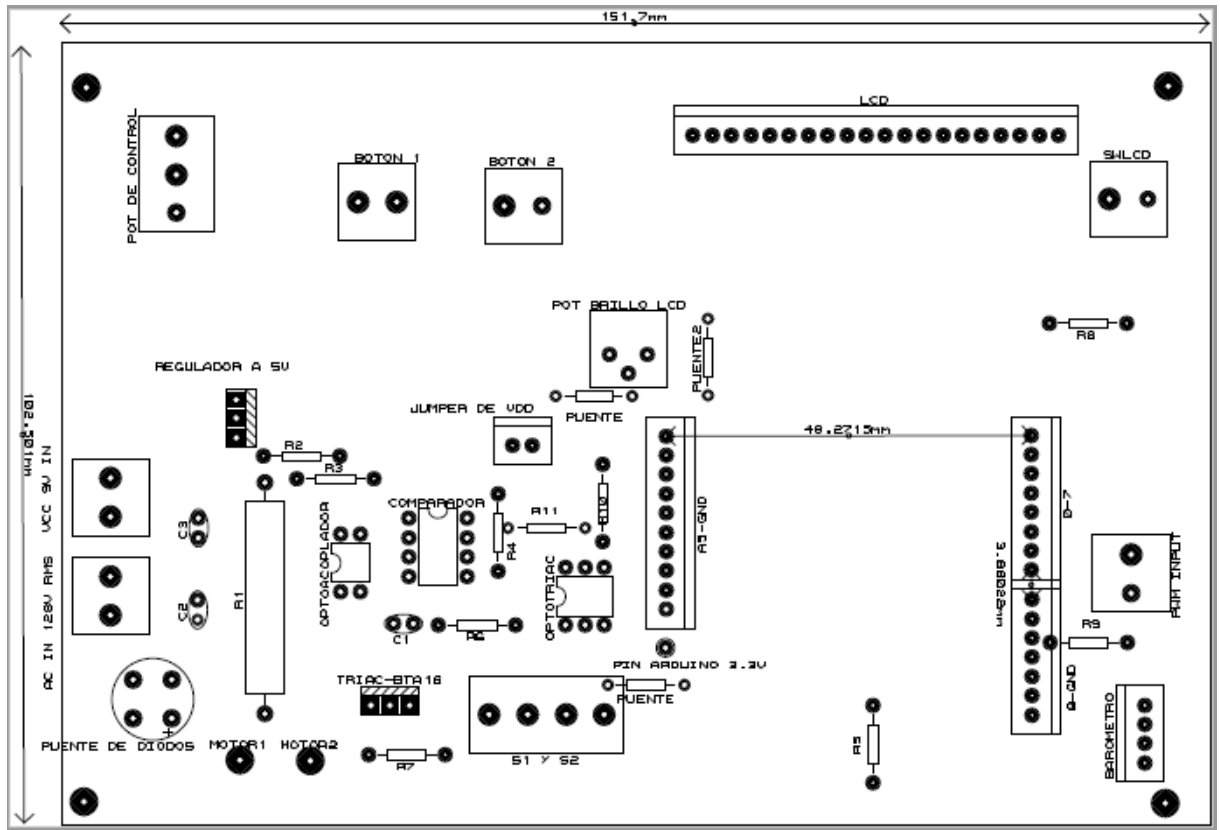
Apéndice A Figura 16. Diagrama completo de la tarjeta electrónica que controla al motor extractor.



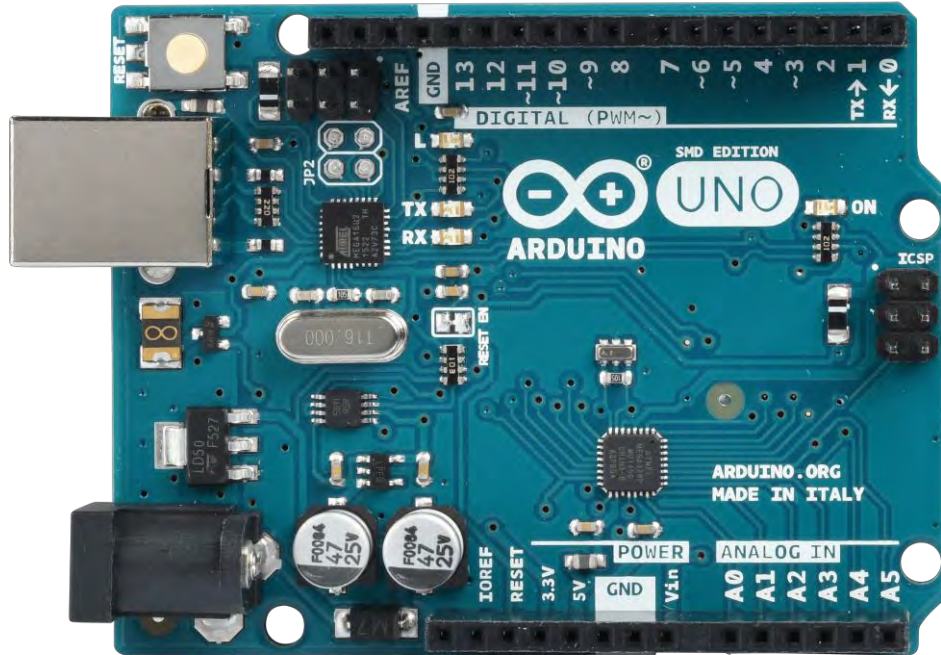
Apéndice A Figura 17. PCB de la parte de abajo de la tarjeta electrónica que controla al motor extractor.



Apéndice A Figura 18. PCB de la parte de arriba de la tarjeta electrónica que controla al motor extractor.



Apéndice A Figura 19. Diagrama de pines de la tarjeta Arduino Uno.



Apéndice A Figura 20. Diagrama de pines de la pantalla LCD 16x2 caracteres.



Apéndice A Figura 21. Código en Arduino para el control del motor parte 1.

```

1 #include "TimerOne.h"
2 #include <LiquidCrystal.h>
3 /*
4 The circuit:
5 * LCD RS pin to digital pin 12
6 * LCD Enable pin to digital pin 11
7 * LCD D4 pin to digital pin 7
8 * LCD D5 pin to digital pin 6
9 * LCD D6 pin to digital pin 5
10 * LCD D7 pin to digital pin 4
11 * LCD R/W pin to ground
12 * LCD VSS pin to ground
13 * LCD VCC pin to 5V
14 * 10K resistor:
15 * ends to +5V and ground
16 * wiper to LCD VO pin (pin 3)
17 */
18
19 LiquidCrystal lcd(12, 11, 7, 6, 5, 4); // Inicialización de la librería con los números de los pines descritos en la parte de arriba
20
21 //Constantes
22 const int zerodetector = 2; // Entrada pin 2- Detector de cruce por cero
23 const int mod = 8; // Entrada pin 8- Selección de modo (Esclavo o Maestro)
24 // La acción mecánica del boton pin 8 es: Cambia cuando se presiona. Interruptor de retención
25 const int inputpwm = 3; // Entrada pin 3- Pin usado para medir el ancho de pulso
26 const int outmotor = 13; // Salida pin 13- Pin usado para el detector de cruce por cero (Asociado a interrupción)
27 const int analogPin = A0; // Potenciómetro conectado al pin analógico A0

```

Apéndice A Figura 22. Código en Arduino para el control del motor parte 2.

```

28
29 //Variables
30 long val = 0; //Variable para verificar si está en la mínima velocidad
31 long pwm = 10000; //Variable de modulación de señal en modo maestro, valor inicial 10ms.
32 long pwm2 = 10000; //Variable de modulación de señal en modo esclavo, valor inicial 10ms.
33 float porcentaje=0; //Porcentaje de la velocidad
34 long ser = 10000; //Variable de modulación de señal, valor inicial 10ms.
35 int bandera=1; //Bandera para saber si el pin 13 esta en alto o en bajo
36 int modo=1; //Variable de selección de modo- 1 esclavo y 0 es Maestro.
37 int i=0; //Contador
38 int inState = 0; //Variable de estado para el pin de lectura del pwm (pin 3)
39 unsigned long time1=0,time2=0,dt=0; //variables usadas para la medición del pulso de pwm
40
41 //Declaración de las funciones
42 void contar();
43 void inpwm();
44 void ISR_Blink();
45
46 void setup() {
47 Timer1.initialize(50000); //50000us. 50ms. tiempo para que se configure
48 //Prescale Time per counter tick Max Period
49 //8 0.5 uS 65.536 mS
50 Timer1.attachInterrupt(ISR_Blink); // Activa la interrupcion y la asocia a la función ISR_Blink
51 pinMode(outmotor, OUTPUT); //Configuración de salida para el pin que dispara el optotriac
52 pinMode(zerodetector, INPUT); //Configuración de entrada para el pin detector de cruce por cero
53 pinMode(inputpwm, INPUT); //Configuración de entrada para el pin medidor del pwm

```

Apéndice A Figura 23. Código en Arduino para el control del motor parte 3.

```

54 pinMode(mod, INPUT); //Configuración de entrada para el pin de selección del modo de operación
55 attachInterrupt(0, contar, RISING); //interrupcion al pin 2 que corresponde al detector de cruce por cero (Flanco ascendente)
56 attachInterrupt(1, inpwm, CHANGE); //interrupcion al pin 3 que corresponde al medidor de pwm (Siempre que cambia el flanco para la medición de pwm)
57 bandera=0; //flanco acendente.
58 lcd.begin(16,2);
59 lcd.print("Control Motor");
60 }
61
62 void loop() {
63
64 //Empieza Sección 1-----
65 //La sección 1 se encarga de asignar el disparo del triac dependiendo del modo de operación del boton de entrada (Modo pin 8- Esclavo o Maestro)
66 if (digitalRead(mod)==LOW) { //LOW esModo Esclavo, control por pwm se asigna la variable pwm2 la medición del pwm de entrada cuidado que no exceda-
67 //de sus rangos permisibles
68 modo=0; //Modo esclavo, arduino recibe un pwm entre 1000us y 2000us de pulso de una tarjeta maestra
69 if (dt>=1000&dt<=2000) { //Validación para que la medición no este fuera de rango
70 pwm2 = map(dt,1000 ,2000, 2700,7500); //Mapeo para escalar la medición al tiempo de retardo de disparo del triac.
71 pwm=7500; //Reset de pwm para que inicie con la mínima potencia cuando se haga el cambio de modo.
72 }
73 else{
74 modo=1; //Si el modos es 1, control por arduino se asigna la variable pwm la medición del potenciómetro
75 val = analogRead(analogPin); //Lee el valor del potenciómetro
76 pwm = map(val,0,1014, 2700,5749); //Mapeo para escalar la medición al tiempo de retardo de disparo del triac.
77 if (val>1015) { //Condición que permite detener el motor completamente cuando el voltaje en el potenciómetro es minimo
78 pwm=7500; //Paro del motor
79 }
80 pwm2=7500; //Reset de pwm para que inicie con la mínima potencia cuando se haga el cambio de modo.

```

Apéndice A Figura 24. Código en Arduino para el control del motor parte 4.

```

81 }
82 //Termina Sección 1-----
83
84 //Empieza Sección 2-----
85 //Esta sección se ejecuta menos veces que la una debido a la condicional del contador-
86 //esto se hizo porque no tiene caso actualizar la pantalla LCD cada 20 milisegundos
87 if(i==50){ //Condicional para ejecutar seccion una cuando el contador este en 50
88     i=0; //Reinicia el contador cuando entra en la sentencia
89
90 if(modos==LOW){ //Si el modo es esclavo muestra en la patalla LCD dicho modo de operación con su lectura pwm de entrada
91     if(dt>=1000&&dt<=2000){
92         lcd.clear();
93         lcd.setCursor(0,0);
94         lcd.print("Mod.Esclavo");
95         lcd.setCursor(0,1);
96         lcd.print(pwm2); //Muestra el ancho de pulso medido
97     }
98     else{
99         porcentaje=map(pwm,5749,2700,1,100); //Mapea la lectura del pwm de 1 a 100% de velocidad
100         if (val>1015){
101             porcentaje=0; //Si se detecta velocidad mínima el porcentaje es 0 de velocidad
102         }
103         //Muestra los datos en la LCD del modo maestro
104         lcd.clear();
105         lcd.setCursor(0,0);
106         lcd.print("Mod.Maestro");
107         lcd.setCursor(0, 1);

```

Apéndice A Figura 25. Código en Arduino para el control del motor parte 5.

```

108     lcd.print(porcentaje);
109 }
110
111 }
112 i++; //Incrementa el contador
113 delay(20); //Retardo
114 //Termina Sección 2-----
115
116 }
117
118 //Definición de las funciones de interrupción
119
120 void contar() //Funcion de interrupción detector por cero
121 {
122     if(bandera==1){ //Si la bandera esta en alto asigna el valor de retardo del triac al Timer 1
123
124         if(modos==1){ //Si esta en modo esclavo asigna la variable pwm
125             Timer1.initialize(pwm); //Inicializa conteo del Timer 1
126         }
127         if(modos==0){ //Si esta en modo maestro asigna la variable pwm2
128             Timer1.initialize(pwm2); //Inicializa conteo del Timer 1
129         }
130     bandera=0; //Baja la bandera para indicar que el timer fue configurado para contar el tiempo indicado de disparo del triac
131     }
132 }
133

```

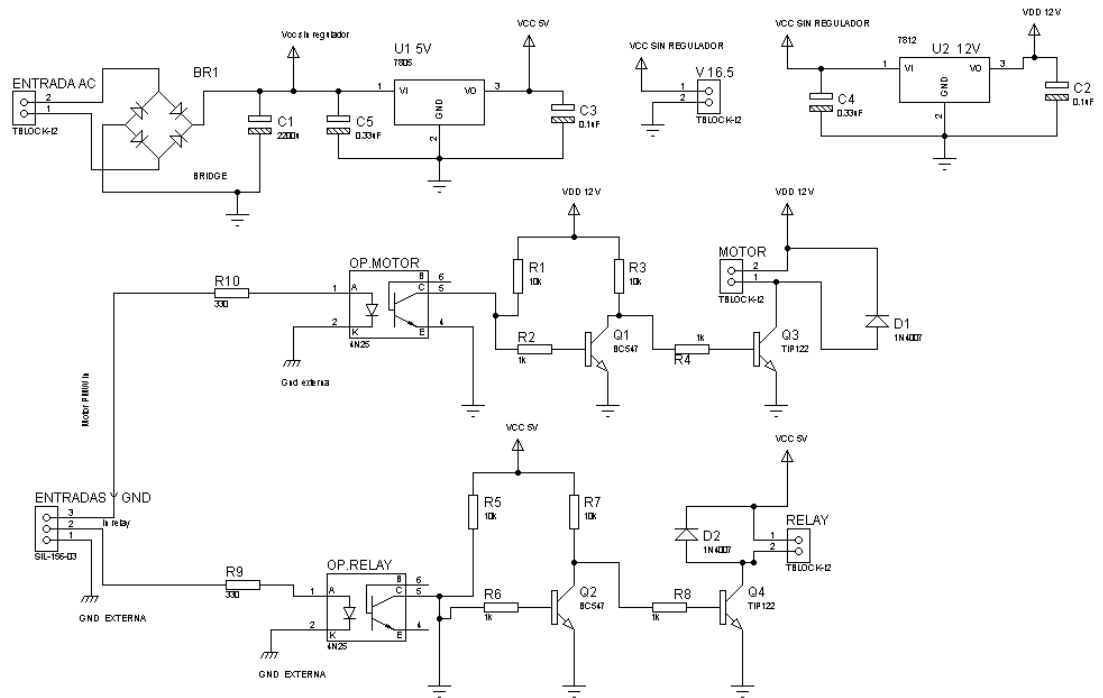
Apéndice A Figura 26. Código en Arduino para el control del motor parte 6.

```

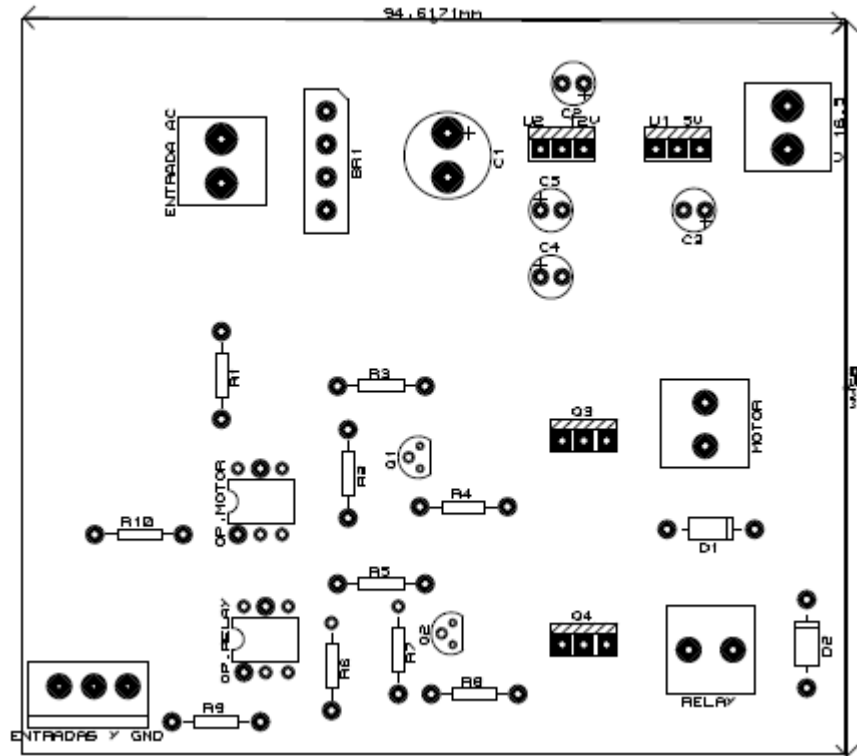
134 void ISR_Blink() //Función de interrupción del Timer 1, esta se ejecuta cuando el Timer 1 termina de contar el tiempo indicado.
135 {
136     Timer1.stop(); //Detiene el timer para evitar que se encadenen interrupciones del Timer 1
137     digitalWrite(outmotor, HIGH); //Pone el Pin 13 en alto para activar el TRIAC
138     delayMicroseconds(10); //Espera 10 microsegundos para que el TRIAC se quede activado
139     digitalWrite(outmotor, LOW); //Pone el Pin 13 en bajo porque no es necesario tenerlo encendido ya que el triac se quedó conduciendo.
140     bandera=1; //Levanta la bandera para indicar a la interrupción de cruce por cero que en la próxima iteración debe-
141     //establecer el tiempo de conteo y arracar el Timer 1
142 }
143
144 void inpwm() //Funcion de interrupción para la medición del pulso pwm que recibe de la tarjeta maestra.
145 {
146     inState = digitalRead(inputpwm); //Lee el estado para saber si es flanco de subida o de bajada
147     if (inState == HIGH) { //Si es alto entonces toma la lectura del timer interno del micro y la asigna a time1
148         time1=micros();
149     }
150
151     if (inState == LOW) { //Si es bajo entonces toma la lectura del timer interno del micro y la signa al tiime2
152         time2=micros();
153     }
154
155     if(time2>time1){ //Validación para verificar que no exista tiempo negativo debido al desborde del timer interno
156         dt=time2-time1; //Hace la resta para determinar la duración del ancho del pulso del pwm de la tarjeta maestra
157     }
158 }

```

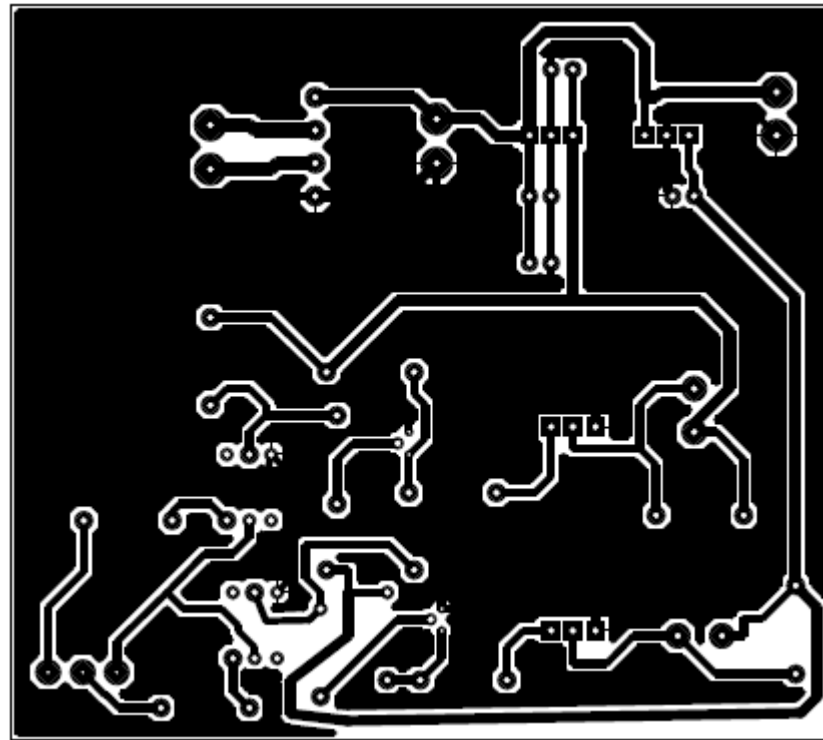
Apéndice A Figura 27. Diagrama electrónico de la etapa de potencia para la bomba y el relevador de la resistencia de la máquina de humo.



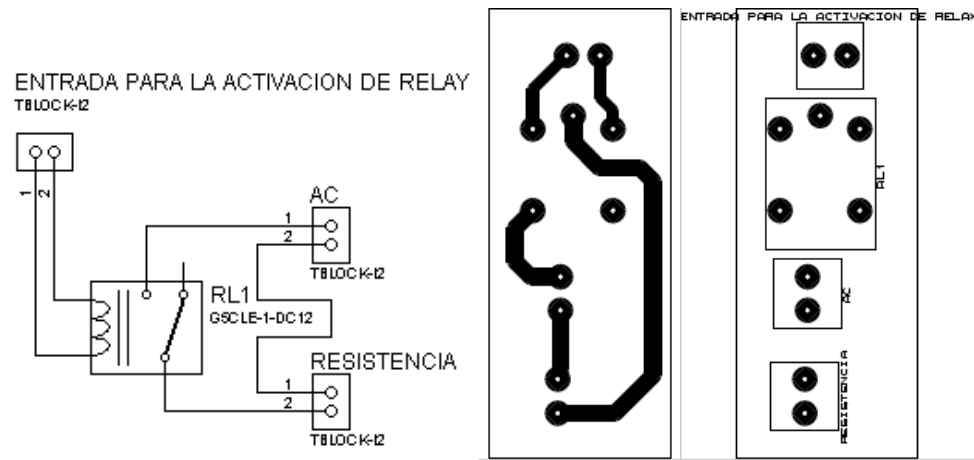
Apéndice A Figura 28. PCB parte de arriba de la etapa de potencia para la bomba y el relevador de la resistencia de la máquina de humo.



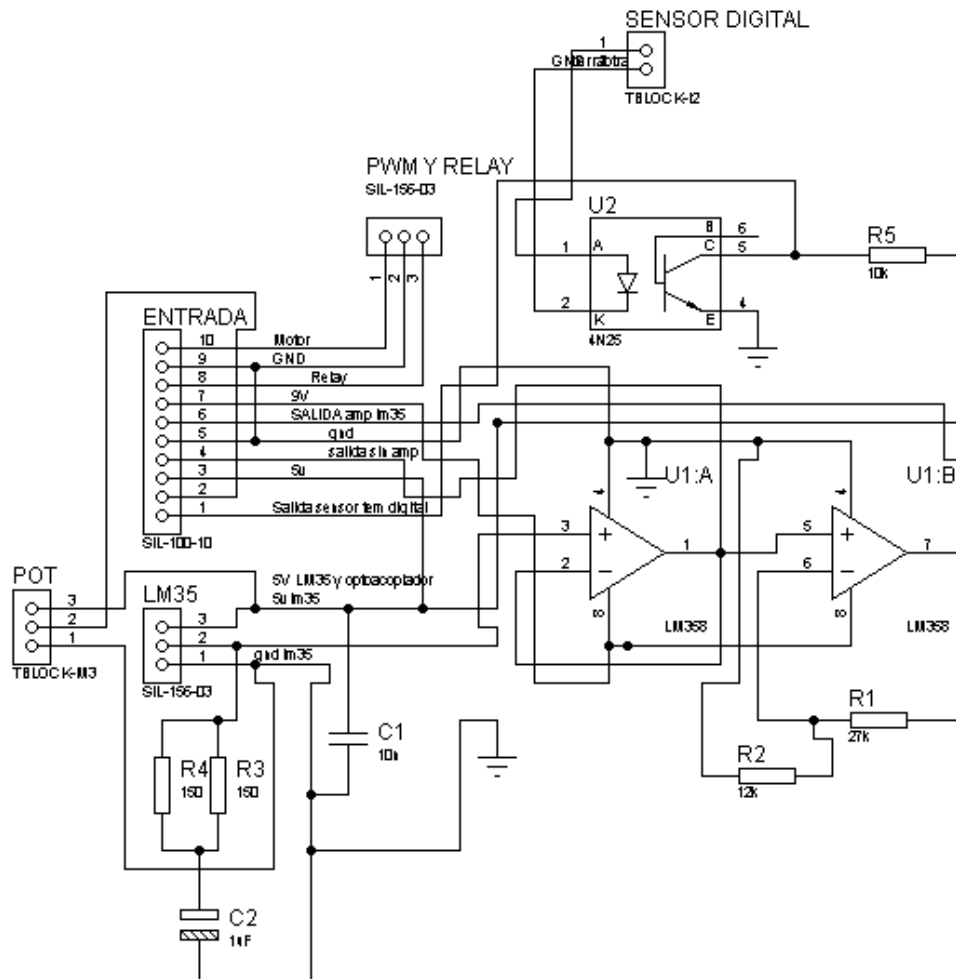
Apéndice A Figura 29. PCB parte de abajo de la etapa de potencia para la bomba y el relevador de la resistencia de la máquina de humo.



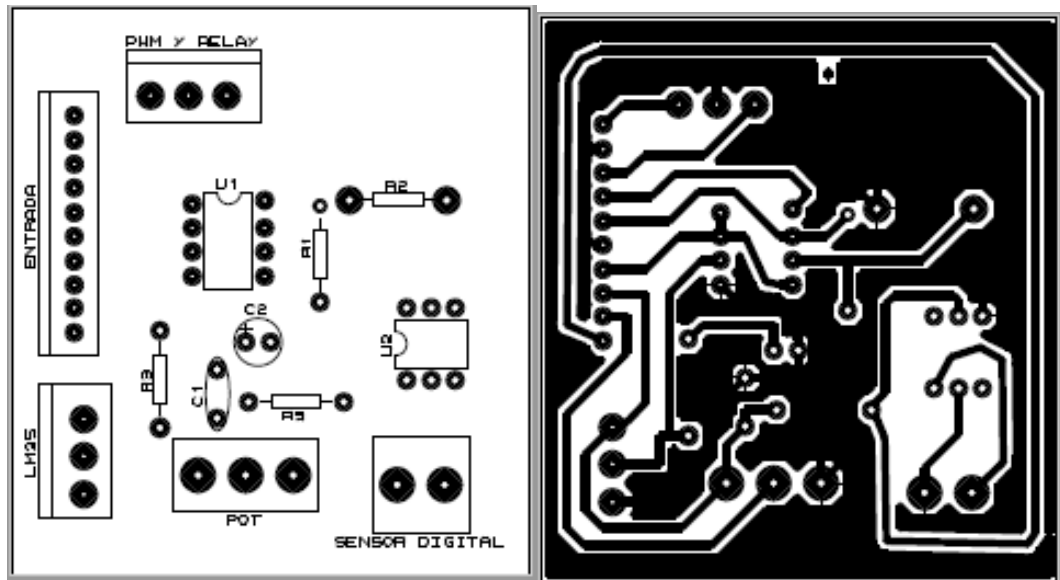
Apéndice A Figura 30. Diagrama, parte de abajo del PCB, parte de arriba del PCB del relevador de la máquina de humo.



Apéndice A Figura 31. Diagrama de la tarjeta de conexiones Arduino-Etapa de potencia-sensores.



Apéndice A Figura 32.PCB parte de arriba y de abajo de la tarjeta de conexiones Arduino-Etapa de potencia-sensores.



Apéndice A Figura 33.Código en Arduino para el control de la máquina de humo parte 1.

```

1 //Constantes, seleccion de pines
2 const int sensort1 = 2;           //entra digital del sensor T1
3 const int botonhumo= 7;          //entra digital para el disparar humo
4 const int LM35=0;                //sensor de temperatura LM35
5 const int potenciometro = 2;     //entra del sensor T1
6 const int relay = 13;            //salida del relevador activa la resistencia
7 const int motor=5;               //salida del pwm. en el pin 5 y 6 se tiene una salida de 980Hz segun
8                                   //la pagina de referencia: https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogWrite
9 // Variables
10 int buttonState = 0;             // variable for reading the pushbutton status
11 int potval=0;                   //en esta variable se guarda el valor leído del ADC del potenciometro.
12 int pwm;                         //en esta variabl se escala el valor del ADC del pot de 0 a 255
13 float sensorValue=0;            //variable donde se guarda el valor del ADC del sensor LM35
14 float voltage=0;                //variable donde se guarda el valor del ADC convertido a voltaje
15 float T=0;                       //variable donde se guarda el valor de la temperatura del LM35 en grados centigrados.
16 int sensort1State=0;            //variable donde se guarda el estado del sensor de temperatura digital.
17
18 void setup() {
19   Serial.begin(9600);            // velocidad del puerto serial
20   pinMode(sensort1, INPUT);      //se declara el sensor de temperatura digital como entrada
21   pinMode(botonhumo, INPUT);    //se declara el boton de disparo como una entrada
22   pinMode(relay, OUTPUT);        // se declara la salida del relay
23   pinMode(motor, OUTPUT);        //se declara la salida pwm a 980Hz
24 }
25
26 void loop() {
27   sensorValue = analogRead(0);   //se le el valor del sensor LM35

```

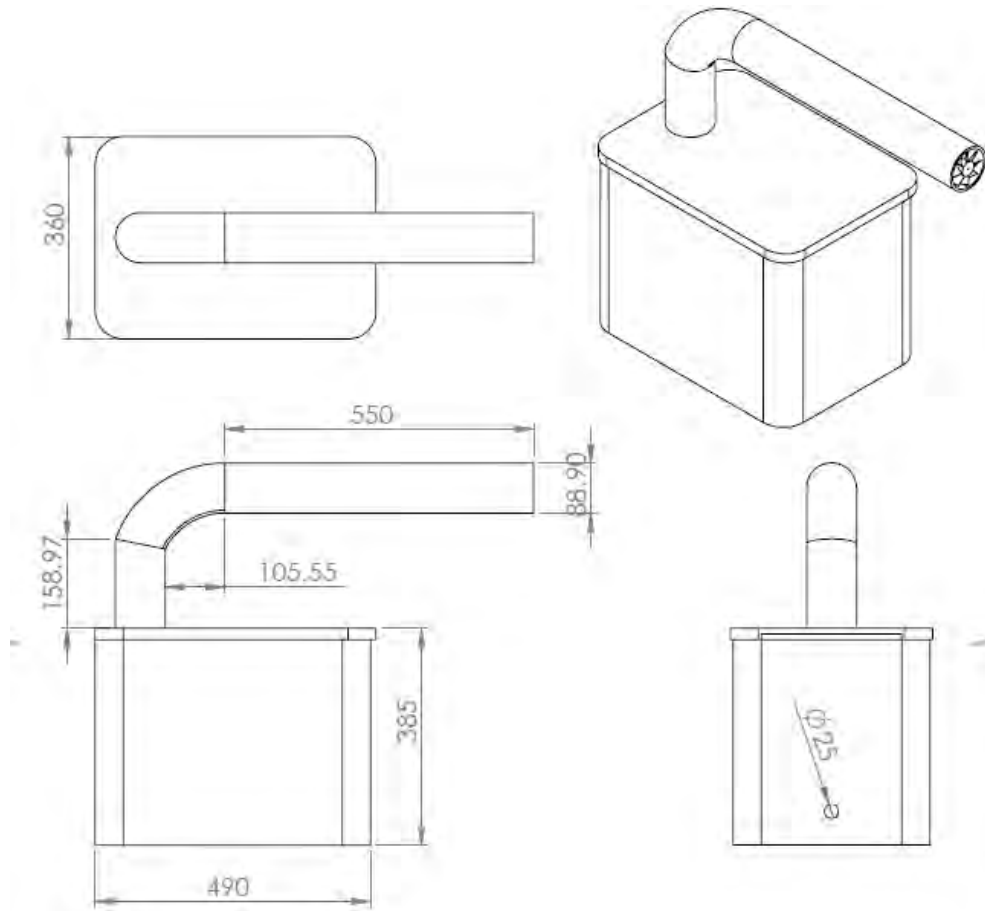

Apéndice A Figura 34. Código en Arduino para el control de la máquina de humo parte 2.

```
28 voltage=((float)sensorValue)*5/1023; //se convierte la señal a voltaje
29 T=voltage*100/3.25; //se convierte el voltaje a grados centigrados.
30 potval=analogRead(2); //se toma una lectura del potenciómetro
31 pwm = map(potval, 0, 1023, 55,255); //se escala a 255
32 //analogWrite(motor,pwm); //se escribe a la salida pwm
33 delay(200);
34 sensor1State = digitalRead(sensor1); // se lee el estado del sensor de temperatura.
35
36 if (T<80){
37   digitalWrite(relay, HIGH);
38   Serial.print("\t relay activado");
39 }
40   if (T>120||sensor1State==1){
41     digitalWrite(relay, LOW);
42     Serial.print("\t relay deactivated ");
43 }
44
45 if (sensor1State==0){
46   Serial.print("\t TD bajo");
47 }
48 else{
49   Serial.print("\t TD sobre temp");
50 }
51
52 if (T>=40&&T<=140){
53   Serial.print("\t Listo ");
```

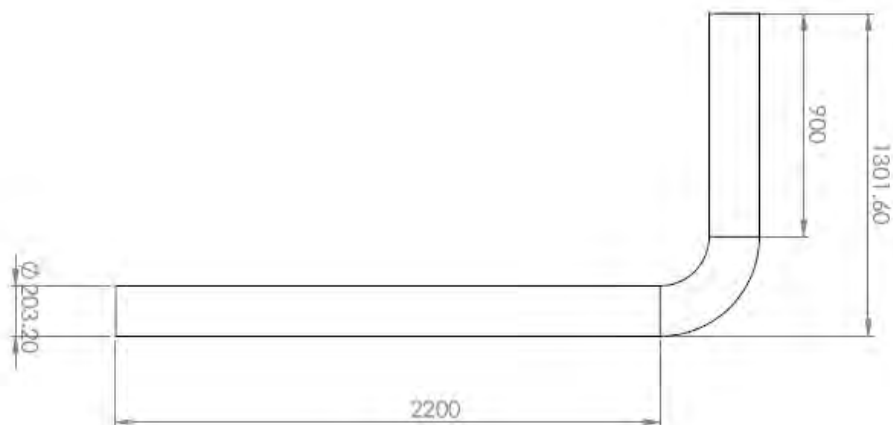
Apéndice A Figura 35. Código en Arduino para el control de la máquina de humo parte 3.

```
54
55 if (digitalRead(botonhumo)== HIGH) {
56   analogWrite(motor,pwm); //se escribe a la salida pwm
57 }
58   else {
59     analogWrite(motor,0); //se escribe a la salida pwm
60   }
61
62   }
63
64 Serial.print("\tpwm=");
65 Serial.print(pwm);
66 Serial.print("\t temp=");
67 Serial.println(T);
68 //Serial.print('\n');
69 delay(500);
70
71 }
```

Apéndice A Figura 36. Dimensiones de la cámara de concentración.



Apéndice A Figura 37. Dimensione del ducto de extracción de partículas.



Apéndice A Figura 38. Características técnicas de la cámara de alta velocidad IDT Y7-S1.

KEY FEATURES

| | |
|---|-------------------------------------|
| Maximum Resolution | 1920 x 1080 |
| Maximum FPS @ Maximum Resolution | 12,300 fps |
| Image Storage @ Max Frame Rate (DDR 8) | 10,908 |
| Image Storage @ Max Frame Rate (DDR 16) | 22,183 |
| Image Storage @ Max Frame Rate (DDR 32) | 44,733 |
| Image Storage @ Max Frame Rate (DDR 64) | 89,833 |
| Maximum FPS | 300,000 @ 1920 x 8 |
| Minimum Exposure Time | 1µs (*Shorter Integration optional) |
| Sensitivity ASA/ISO | 6000 ISO Mono 2000 ISO Color |
| Power Requirements | minimum 14V , 8.5 A |
| Operating Temperature | -40+50 °C / -40+122 °F |

SENSOR

| | |
|---------------------|--------------------------|
| Sensor Type | CMOS - Proprietary |
| Sensor Size | 13.9 x 7.8 mm |
| Sensor Format | 1 inch |
| Pixel Size (micron) | 7.24x7.24 um |
| Pixel Depth | 10 bit mono 30 bit color |

INPUTS

| | |
|---------------|---|
| Trigger | TTL & Switch/Circular buffer with on-camera or software trigger |
| Sync | Phase-lock TTL |
| IRIG | Optional |
| GPS Time Code | Standard |

OUTPUTS

| | |
|------|---------------------|
| Sync | Frame sync / Strobe |
| HDMI | 30 fps |

FEATURES

| | |
|--------------------------------|---|
| Approx. Size | 103 x 96 x 228 mm (W x H x L) |
| Approx. Weight | 3.4 kg or 7.5 lbs |
| Shock/Vibration Rating | Shock: 200G / Vibration: 40G - All axes |
| Battery Powered Operation Time | Operation and battery back-up up to 1 hours |
| Mount | C-Mount standard , F&PL Adaptor optional |

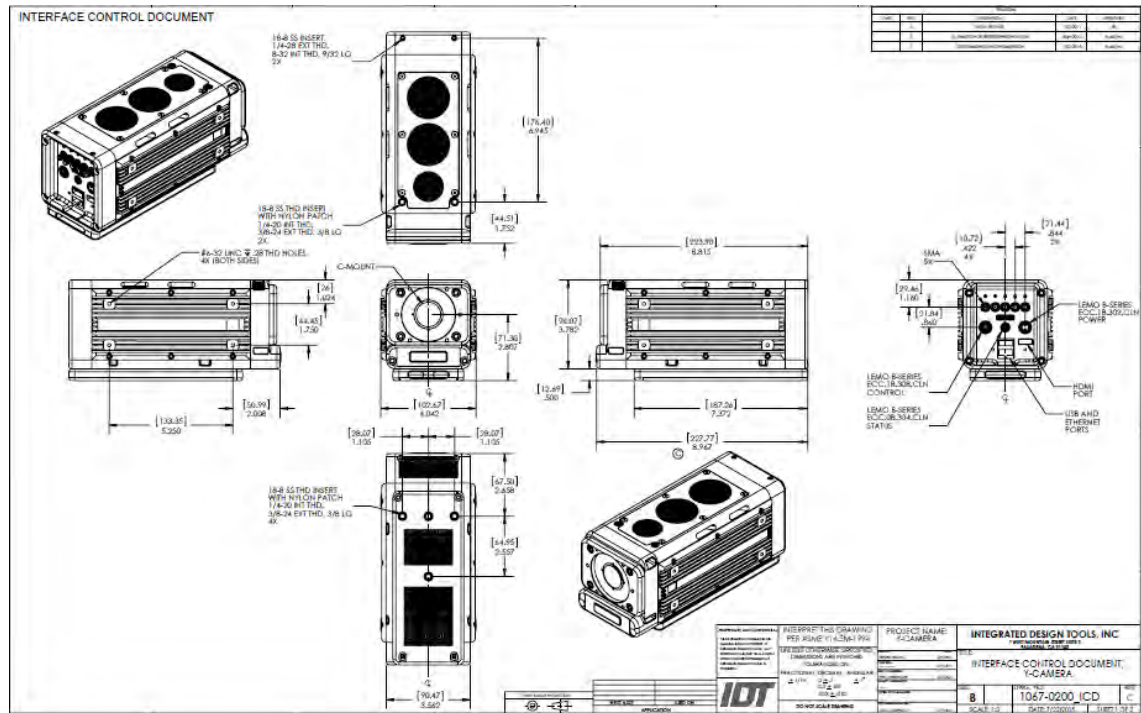
SOFTWARE

| | |
|-----------------------|--|
| Motion Studio | Windows 32/64 |
| Motion Inspector | Windows 32/64 - MAC OS X - Apple iOS |
| Plug-ins/SDK | SDK, LabVIEW™ or MatLab® |
| File Formats | Proprietary RAW |
| On-the-fly Conversion | TIF, BMP, JPG, PNG, AVI, MPG, TP2, MOV, MRF, MCF |

COMMUNICATION

| | |
|----------|---------------|
| Ethernet | 100/1000BaseT |
| USB2 | Standard |
| WIFI | Optional |

Apéndice A Figura 39. Dimensiones de la cámara de alta velocidad IDT Y7-S1.



Apéndice A Figura 40. Parte 1 del código en MATLAB para importar organizar los datos arrojados por PROVISION.

```

1 - clear all; clc; close all;
2
3 - N=10;           %numero de planos de medicion
4 - dz=1E-3;      %Separación entre planos de medición
5 - Vz=N*dz-dz;  %Desplazamiento total
6 - z1 = 0:dz:Vz;
7
8 - for i=1:N
9
10 -     num=num2str(i);
11 -     carpeta=strcat('Seccion', num, '\');
12
13 -     ruta='E:\proyectotesismaestria\Resultados\importacion de resultados\Datos Volumetricos\Cilindro 10.2mm prueba 1\';
14 -     nombre='ImgA-Average.plt';
15 -     filename=strcat(ruta, carpeta, nombre);
16 -     fileID = fopen(filename);
    
```

Apéndice A Figura 41. Parte 2 del código en MATLAB para importar organizar los datos arrojados por PROVISION.

```

17 - firstline = '%% %% %% %% %% %% %% %% %%';
18 - secondline = '%% %% %% %%';
19 - datos='%f %f %f %f %f %f %f %f';
20 - C_1 = textscan(fileID,firstline,1);
21 - C_2 = textscan(fileID,secondline,1);
22 - C_3 = textscan(fileID,datos);
23 - frewind(fileID);
24 - fclose(fileID);
25 - x0=C_3{1};
26 - y0=C_3{2};
27 - u0=C_3{3};
28 - v0=C_3{4};
29 - clear C_3;
30 - [a,b,c,d]=organiza(x0,y0,u0,v0);
    
```

Apéndice A Figura 42. Parte 3 del código en MATLAB para importar organizar los datos arrojados por provision.

```

31 - x(:, :, i) = a;
32 - y(:, :, i) = b;
33 - u(:, :, i) = c;
34 - v(:, :, i) = d;
35
36 - end
37 - [o, p, q] = size(x);
38 - z = ones(o, p, N);
39 - w = zeros(o, p, N);
40 - for i = 1:N
41 -     z(:, :, i) = (i-1)*dz*z(:, :, i);
42 - end
43 - clearvars -except x y z u v w
44 - filename = 'volumetrico0001';
45 - save(filename);
46 - clear all;

```

Apéndice A Figura 43. Función organiza del código.

```

1 - function [x, y, u, v] = organiza(x0, y0, u0, v0)
2 -     Lastx0 = x0(1);
3 -     Lasty0 = y0(1);
4 -     L = length(x0);
5
6 -     x(1, 1) = x0(1);
7 -     y(1, 1) = y0(1);
8 -     u(1, 1) = u0(1);
9 -     v(1, 1) = v0(1);
10
11 -     i = 1;
12 -     j = 1;
13
14 - for k = 1:L-1
15 -     if Lastx0 ~ = x0(k+1)
16 -
17 -         i = i + 1;
18 -     end
19 -     if Lasty0 ~ = y0(k+1)
20 -         j = j + 1;
21 -         i = 1;
22 -     end
23
24 -     x(j, i) = x0(k+1);
25 -     y(j, i) = y0(k+1);
26 -     u(j, i) = u0(k+1);
27 -     v(j, i) = v0(k+1);
28
29 -     Lastx0 = x0(k+1);
30 -     Lasty0 = y0(k+1);
31 - end

```