

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Sistema de Velocimetría de Partículas por Imagen
(PIV) de Bajo Costo**

Proyecto de Investigación

Iván Xavier Vela Llanos

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 20 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Sistema de Velocimetría de Partículas por Imagen (PIV) de Bajo Costo

Iván Xavier Vela Llanos

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

David Escudero, PhD

Firma del profesor

Quito, 20 de diciembre de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Iván Xavier Vela Llanos

Código: 00111775

Cédula de Identidad: 1715738512

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2017

RESUMEN

Este proyecto consiste en desarrollar y probar un sistema de velocimetría de partículas por imagen (PIV) para la obtención de velocidades instantáneas y estudio de fluidos en distintos regímenes. Este método es ampliamente utilizado en investigación por ser no intrusivo y brindar resultados certeros. Sus aplicaciones ayudan en el diseño de estructuras en contacto con fluidos y corroboran estudios realizados por herramientas de CFD. Una de las desventajas de este método es su alto costo, por lo que se opta por desarrollar un sistema de bajo costo para su implementación en las áreas de educación e investigación. Se analiza el campo de flujo de un fluido suministrado con partículas microscópicas, las cuales son refractadas por un haz de láser. Imágenes en cortos intervalos de tiempo son capturadas para determinar el campo de vectores del fluido analizado. Se obtuvo una velocidad promedio del fluido en el experimento cercana a los valores teóricos y simulados. A pesar que el sistema requiere ciertos ajustes para aumentar su precisión, se concluyó que el sistema es prometedor y válido para ciertos estudios.

Palabras clave: Sistema de velocimetría de partículas por imagen (PIV); partículas trazadoras; medición de flujo del fluido; campo vectorial de velocidades; refracción láser.

ABSTRACT

The following project consists in the development and prove of a low-cost particle image velocimetry system (PIV) for fluid flow measurement and studies of flow in several regimes. This method is widely used in research because is non-intrusive and offers accurate results. The field of application embraces the structural design in contact with fluids, and bear out studies performed through CFD tools. A disadvantage of this method is the high cost of implementation; therefore, a low-cost PIV system was opted to be developed for the implementation in the education and research areas. A field fluid flow seeded by microscopic particles refracting a laser beam is analyzed. Several image frames are taken in short intervals of time in order to determine the vector field of the fluid to be analyzed. A mean flow velocity was obtained in the experiment which was close to the theoretical and simulated results. Despite needing certain adjustments in the system to enhance the precision, it was concluded to be promising and valid for some studies.

Key words: Particle image velocimetry (PIV); tracer particles; fluid flow measurement; vector field velocities; laser refraction.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	9
2. Metodología	11
2.1. Instalación y Descripción del Sistema.....	11
2.1.1 Sección de prueba	12
2.1.2 Sistema de Circulación del Fluido	13
2.1.3 Sistema de Suministro de Partículas	14
2.1.4 Partículas Trazadoras	15
2.1.5 Sistema de Iluminación y Refracción	16
2.1.6 Cámara Digital de Alta Velocidad	17
2.1.7 Sistema de Análisis y Procesamiento de Imágenes	17
2.2. Procedimiento Experimental	18
2.3. Análisis de Imágenes.....	20
2.4. Simulación CFD	24
3. Resultados y Discusiones	28
4. Conclusiones Y Recomendaciones.....	39
Referencias Bibliográficas.....	42
Anexo A: Presupuesto Sistema PIV	43
Anexo B: Planos Túnel de Viento	44
Anexo C: Especificaciones Láser.....	49
Anexo D: Especificaciones Cámara y Lente Fotográfico	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventilador para PC marca SUNON SP 100A	14
Tabla 2: Máquina de Humo AB-900	15
Tabla 3: Comparación de Datos Velocidad Promedio PIVlab	31
Tabla 4: Validación Resultados Promedio Basado en el Mallado.....	37
Tabla 5: Error Estimado del Sistema Comparando la Velocidad	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema Particle Image Velocimetry (PIV) (Fuente: JAXA).....	12
Figura 2: Plano de Despiece del Túnel de Viento	13
Figura 3: Ventilador para PC	14
Figura 4: Máquina de Humo AB-900	16
Figura 5: LBS-532 Brightline Pro Line-Projecting Laser	16
Figura 6: Sony Alpha con Lente Tamron Macro	17
Figura 7: Sistema PIV de Bajo Costo Implementado	20
Figura 8: Interfaz Pre-Procesamiento PIVlab	21
Figura 9: Interfaz Análisis PIVlab	22
Figura 10: Campo Vectorial Post-Procesado PIVlab	24
Figura 11: Geometría de Estudio en ANSYS Fluent	25
Figura 12: Mallado en ANSYS Fluent	25
Figura 13: Interfaz de Set Up ANSYS Fluent	27
Figura 14: Iteraciones Corridas en ANSYS Fluent	27
Figura 15: Volumen de Control	28
Figura 16: Campo Vectorial Magnitud de Velocidad en PIVlab	32
Figura 17: Gráfico Lineal Velocidad vs Distancia en Plano PIVlab	32
Figura 18: Resultados Histograma PIVlab	33
Figura 19: Resultados Gráfico de Dispersión PIVlab.....	34
Figura 20: Contorno de Velocidad ANSYS Fluent	35
Figura 21: Contorno de Velocidad en Distintas Secciones	35
Figura 22: Líneas de Flujo ANSYS Fluent.....	36
Figura 23: Representación Volumétrica ANSYS Fluent.....	36

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de fluidos y su interacción con distintos cuerpos han dado paso al desarrollo de métodos experimentales no intrusivos para obtener con mayor precisión los perfiles de velocidad de fluidos en distintos regímenes (Paper, Paul, & Madras, 2014). La visualización de un flujo en una región de interés ha contribuido en el estudio de distintas ramas de la física e ingeniería mecánica, como: transferencia de calor, aerodinámica, y mecánica de fluidos. De igual forma, el análisis de distintos flujos ha influido en el diseño de estructuras o cuerpos que interactúan con fluidos (Harshani, Galindo-Torres, & Scheuermann, 2015).

El sistema de velocimetría de partículas por imagen (Particle Image Velocimetry (PIV)) es un método experimental no intrusivo que permite la medición de velocidades instantáneas del flujo en varias posiciones de un plano. Al flujo se le añaden partículas microscópicas que seguirán el movimiento del flujo. Se ilumina el plano de medición por medio de un láser, y con una cámara digital de alta velocidad, se toma dos imágenes en cortos intervalos de tiempo. Las imágenes obtenidas son procesadas por medio de un software para su análisis y cálculos de perfiles de velocidad. A diferencia de otros métodos, el sistema PIV permite la visualización de un campo vectorial bidimensional o tridimensional. Además, al ser un método no intrusivo, el flujo del fluido se mantiene sin alteraciones brindando mayor precisión en los resultados (Paper et al., 2014).

Este sistema debido a los dispositivos que lo integran y la calidad de resultados brindados, hacen que este método sea bastante costoso y por esta razón se ha vuelto una limitante para su implementación en universidades y centros de investigación. Por lo tanto, se ha optado por diseñar un sistema PIV de bajo costo para su implementación en áreas de investigación dentro de la universidad.

En el presente documento se especifica el diseño y desarrollo del sistema PIV de bajo costo utilizando dispositivos de menor valor a los de un sistema profesional de nivel de

investigación. Se espera aplicar el sistema en análisis de flujos en agua y aire. El sistema PIV presentado tiene un valor de estimado de \$2500. Los materiales se especifican en la sección de metodología. Además, se expone los resultados obtenidos en análisis de flujos laminares realizados en el sistema desarrollado y se compara con resultados obtenidos en investigaciones realizadas en sistemas profesionales. Así mismo, las conclusiones y observaciones sobre el sistema se presentan en base a las comparaciones previamente realizadas, se muestra el margen del error relativo y precisión del sistema. De esta forma con los resultados obtenidos se espera mejorar el sistema y aumentar el campo de aplicación del sistema de bajo costo a varios regímenes.

2. METODOLOGÍA

2.1. Instalación y Descripción del Sistema

El sistema PIV está conformado por varios componentes como se muestra en la Figura

1. El sistema consiste de:

1. La sección de prueba, un compartimiento transparente en donde se contiene el fluido con las partículas, y un cilindro para estudiar el flujo alrededor de este;
2. Un sistema de suministro de partículas, la selección del dispositivo dependerá de la aplicación;
3. Sistema de circulación del fluido, el cual consiste en una bomba, o ventilador, dependiendo del fluido a utilizarse;
4. Una fuente de iluminación que puede consistir de un LED o un láser de alta potencia, y un lente refractor para generar un plano iluminado a partir del haz de luz del láser;
5. Una cámara digital de alta velocidad con un sensor CCD o CMOS integrado;
6. Una computadora con el software MATLAB que posea la herramienta de análisis PIVlab, la cual permitirá procesar las imágenes y obtener los perfiles de velocidad del fluido.

La función y parámetros a tomar en cuenta en cada componente del sistema son discutidos a continuación. El presupuesto del sistema se presenta en el Anexo A, y es relativamente menor a sistemas PIV profesionales que se encuentran en el mercado.

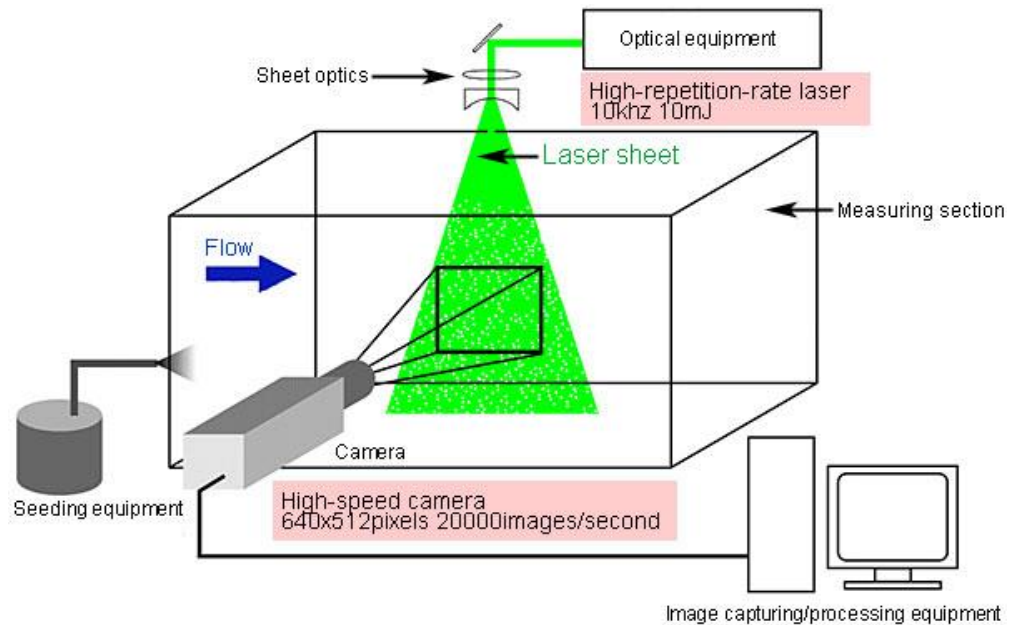


Figura 1: Sistema Particle Image Velocimetry (PIV) (Fuente: JAXA)

2.1.1 Sección de prueba

Se realizará los experimentos en un túnel de viento fabricado en madera y con una sección de prueba de acrílico para la visualización. El túnel de viento cuenta con tres secciones principales: la sección de entrada o tobera, la sección de prueba o visualización, y la sección de salida o difusor. La sección de entrada consiste de tres partes: la sección de admisión, una rejilla para laminar el flujo que ingresa, y la sección de contracción. La sección prueba consiste de dos partes de acrílico, la cara superior y frontal; y dos partes de madera, la cara posterior e inferior. La cara superior de la sección de prueba permitirá el ingreso de la luz láser que refractará en las partículas, mientras que la cara frontal permitirá visualizar las partículas y obtener las imágenes con la cámara. Además, esta sección cuenta con una compuerta de acrílico en la cara frontal, la cual se abre deslizándola por un riel. Por último, la sección de salida cuenta también con tres partes: la sección de expansión, el ventilador, y la sección de escape. En la figura 2, se muestra el plano de despiece del túnel de viento, y sus dimensiones se detallan en el Anexo B.

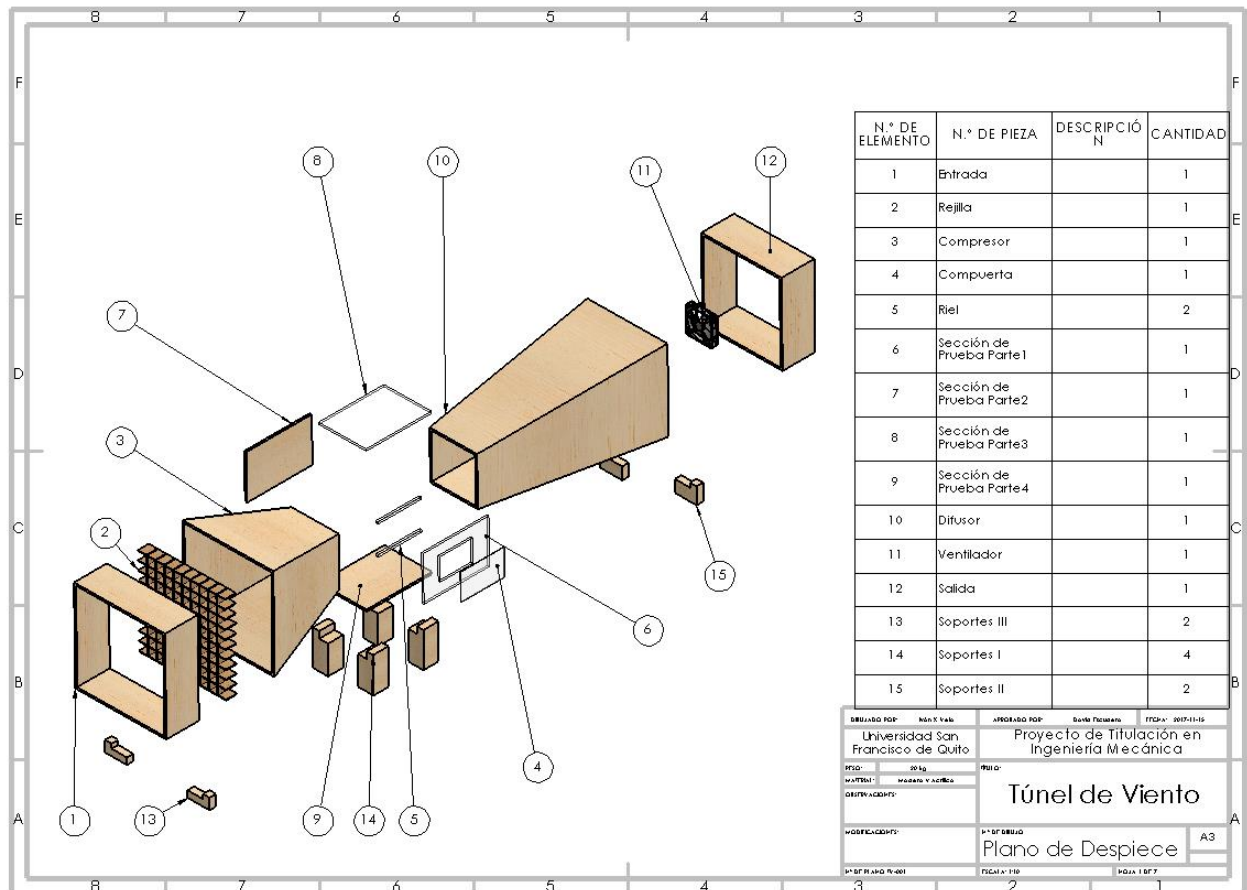


Figura 2: Plano de Despiece del Túnel de Viento

2.1.2 Sistema de Circulación del Fluido

La circulación del fluido se realizará por medio de un ventilador para computadora como el que se encuentra en la figura 3. Este estará ubicado a la salida del túnel de viento. Se seleccionó este ventilador debido a que es lo suficientemente potente para generar flujo a bajas velocidades en el túnel. Las especificaciones del ventilador se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1: Ventilador para PC marca SUNON SP 100A

Especificaciones	
Flujo de Aire	95-115 CFM
Velocidad de Rotación	2700-3100 RPM
Corriente	0.26 A
Voltaje	110-120V@50-60Hz
Dimensiones	120x120x38mm

**Figura 3: Ventilador para PC**

2.1.3 Sistema de Suministro de Partículas

El suministro de partículas se puede llevar a cabo de varias maneras como se mencionó previamente. Al seleccionar aire como fluido de trabajo, se determinó que la forma más efectiva es por medio de un generador de humo. La máquina proporciona una cantidad óptima de humo para entrar en contacto con el láser y visualizarse en la cámara sin dificultad. Previo al generador de humo, se probó distintos métodos que de igual manera sean de bajo costo, pero no se obtuvo resultados satisfactorios. La composición del líquido para la máquina de humo es una mezcla de agua con un líquido a base de glicol o glicerina. Este líquido produce micro burbujas que pueden ser reconocidas por el software de procesamiento de imágenes, PIVlab. De igual manera, en sistemas PIV profesionales se utilizan generadores de humo con líquidos

a base de aceite. La principal diferencia se encuentra en que esos generadores cuentan con una boquilla más sofisticada que permite la salida del humo de manera controlada, garantizando que todas las micro burbujas sean de dimensiones microscópicas iguales.

2.1.4 Partículas Trazadoras

Las partículas trazadoras son partículas microscópicas de baja densidad que se adaptan al comportamiento del fluido y permiten conocer el perfil de velocidad del flujo al refractarse con el láser que incide en estas, lo cual es captado por la cámara digital de alta velocidad. Las características de las partículas están relacionadas con el fluido que se desea analizar. La densidad deberá ser ligeramente menor que la del medio en el que se encuentra para que se mantengan flotando. Por lo tanto, el líquido al ser una mezcla a base de agua y glicol, su densidad en estado gaseoso es lo suficientemente menor a la densidad del aire a temperatura ambiente permitiendo que sigan el flujo del aire. También se experimentará con maicena como partícula trazadora en flujos de aire debido a su facilidad de obtención y para corroborar resultados obtenidos en investigaciones realizadas en Biomecánica (Ryerson & Schwenk, 2012).

Tabla 2: Máquina de Humo AB-900

Especificaciones	
Flujo	5000 CFM
Capacidad	1 L
Distancia de Proyección	6 m
Potencia	900 W
Dimensiones	330x190x140mm



Figura 4: Máquina de Humo AB-900

2.1.5 Sistema de Iluminación y Refracción

El sistema consiste de un láser de alta potencia (clase III), el cual cuenta con lentes cilíndricos que proyectan el haz de luz del láser en una lámina. Las partículas en el fluido se refractarán cuando cruce por el plano de luz. El láser implementado es LBS-532 Brightline Pro-Line Projecting Laser de LaserGlow Technologies. Las especificaciones técnicas del láser se presentan en el Anexo C.



Figura 5: LBS-532 Brightline Pro Line-Projecting Laser

2.1.6 Cámara Digital de Alta Velocidad

La cámara implementada en el sistema es una Sony Alpha 77II debido a su alta resolución en video, velocidad del obturador, apertura, y su alto número de imágenes por segundo. Otro factor a considerar fue el precio, siendo la cámara y el láser los dispositivos más costosos del sistema, pero a la vez los más esenciales, era necesario seleccionar una cámara óptima y relativamente económica. Además, se agregó un lente óptico Tamron SP 60mm f/2 Di II 1:1 Macro Lens, el cual brinda un mayor acercamiento y enfoque a las partículas, siendo más fácil para el software PIVlab reconocer las imágenes. Las especificaciones de la cámara y lente seleccionados se presentan en el Anexo D.



Figura 6: Sony Alpha con Lente Tamron Macro

2.1.7 Sistema de Análisis y Procesamiento de Imágenes

Previo al análisis de las imágenes, se utilizará un software de procesamiento de imágenes, el cual permitirá obtener varios frames en cortos intervalos de tiempo a partir del video grabado. Una vez obtenidos los frames, para el análisis de las imágenes por el método

PIV, se utiliza el software matemático MATLAB, el cual posee una herramienta (PIVlab) para el análisis de imágenes y cálculo de velocidades, así como otros parámetros del campo de flujo.

2.2. Procedimiento Experimental

El experimento consiste en analizar el flujo de aire a través dentro de la sección de prueba y posteriormente realizar distintos experimentos para flujos alrededor de cuerpos. Si los resultados son positivos, se realizará un experimento de flujo alrededor de un cilindro, en caso contrario, se llevará a cabo los ajustes necesarios para el sistema. Los resultados a obtenerse mostrarán la precisión del sistema desarrollado por medio de una comparación con estudios realizados en ANSYS Fluent.

Primero, se coloca el láser en la parte superior de la cámara de prueba sujetado por la pinza de un soporte universal. El láser apunta de forma vertical hacia abajo proyectando el haz de luz. Es importante llevar a cabo las normas de seguridad establecidas para el manejo de láser clase III.

Después se coloca la cámara de frente al compartimiento de prueba, en donde se enfoca el área plana que proyecta el láser. Además, se realiza ciertas configuraciones para obtener imágenes lo más nítidas posible, y obtener resultados certeros. Para mejorar la calidad de la imagen obtenida es recomendable aumentar la iluminación del ambiente, y oscurecer el fondo de la sección de prueba para obtener imágenes claras sin efectos del entorno. También, la cámara nos permite grabar en modo RAW, lo que nos brinda imágenes más precisas porque contiene todos los datos de la imagen obtenida. Adicionalmente, es recomendable grabar en blanco y negro para reducir el ruido del entorno y enfocarse solamente en las partículas. Es importante disminuir el ISO para que aprovechar toda la iluminación natural, reducir el ruido del entorno, y obtener todos los detalles de la fotografía. Se seleccionó un ISO de 2500 en base a la luz disponible en el lugar. Otro parámetro importante es la velocidad de obturación o

tiempo de exposición. Entre menor sea el tiempo, la cámara podrá captar imágenes en movimiento de manera precisa, por lo que se seleccionó un tiempo de exposición de 1/800s. Por último, es importante considerar la apertura. Una mayor apertura a la luz resultará en imágenes más nítidas a la distancia correcta, es decir, la imagen se enfocará solamente en las partículas que se encuentran cruzando el plano generado por la luz láser. Se seleccionó la opción más alta disponible para esta cámara, que fue de f/2.0. Si bien la cámara dispone de tiempos menores que serían favorables, al disminuir el tiempo, la imagen pierde claridad. Entonces encontrar un punto en el que la imagen sea óptima es importante.

Una vez establecidas las configuraciones y establecidas las posiciones de los dispositivos, se enciende el ventilador ubicado a la salida del túnel. Luego se procede a suministrar las partículas en el fluido por medio del generador de humo. Las partículas flotan en el medio gaseoso y siguen el patrón de flujo del aire dentro del túnel.

Inmediatamente, se inicia el video para posteriormente obtener las imágenes que captarán distintas posiciones de las partículas en el fluido. Por medio de un video corto grabado a la resolución adecuada se podrá obtener el desplazamiento de las partículas en milisegundos. Una vez obtenidas las imágenes se inicia el procesamiento de estas para obtener la información deseada concerniente al flujo analizado.

Una vez grabado el video, se lo transfiere a un programa de procesamiento de videos. El programa utilizado fue Avidemux 2.7, y permite obtener los frames del video y guardarlos como imágenes. De esta manera, se selecciona una serie de cuatro frames y se las guarda como archivo .jpg o .bmp, ya que son los formatos que reconoce el software. Una vez obtenidas las imágenes se procede al análisis en PIVlab discutido a continuación.



Figura 7: Sistema PIV de Bajo Costo Implementado

2.3. Análisis de Imágenes

Las imágenes obtenidas se procesan por medio de la herramienta PIVlab. Esta herramienta de MATLAB, se puede descargar de forma gratuita en la página de MathWorks. PIVlab consiste de tres partes: el pre-procesamiento, análisis, y el post procesamiento.

En la primera parte, se carga las imágenes, se selecciona el tipo de secuencia de los frames, y se los importa. Luego se procede a las configuraciones del análisis. Esta sección consta de exclusiones, pre-procesamiento de imágenes, y configuraciones de PIV.

1. En exclusiones, se puede seleccionar una región de interés dentro de la imagen, o cubrir la región de un objeto. Para el experimento realizado, que consistía en el flujo alrededor de un cilindro, será necesario utilizar la última opción. Entonces se dibujó una máscara para cubrir el sólido con el que interactúa el fluido. Al hacer esto, se le

específica al programa que hay un sólido en esa área, por lo que no se trazarán vectores (Thielicke & Stamhuis, 2014).

2. En pre-procesamiento de imágenes, se encuentran tres técnicas. La primera es Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), esta técnica se enfoca en regiones pequeñas de la imagen y descarta regiones de baja o alta exposición. La segunda técnica es Highpass Filter, la cual hace énfasis en las partículas de la imagen reduciendo el ruido que pueda tener ciertas zonas debido a la iluminación no homogénea. La tercera técnica se llama Intensity Capping, y consiste en un filtro que actúa reemplazando puntos o partículas luminosas, que son leídas por el programa e influyen en los resultados, por un límite superior determinado de la intensidad de la escala de grises. Basado en esto, se seleccionó los filtros Intensity Capping y Highpass (Thielicke & Stamhuis, 2014).

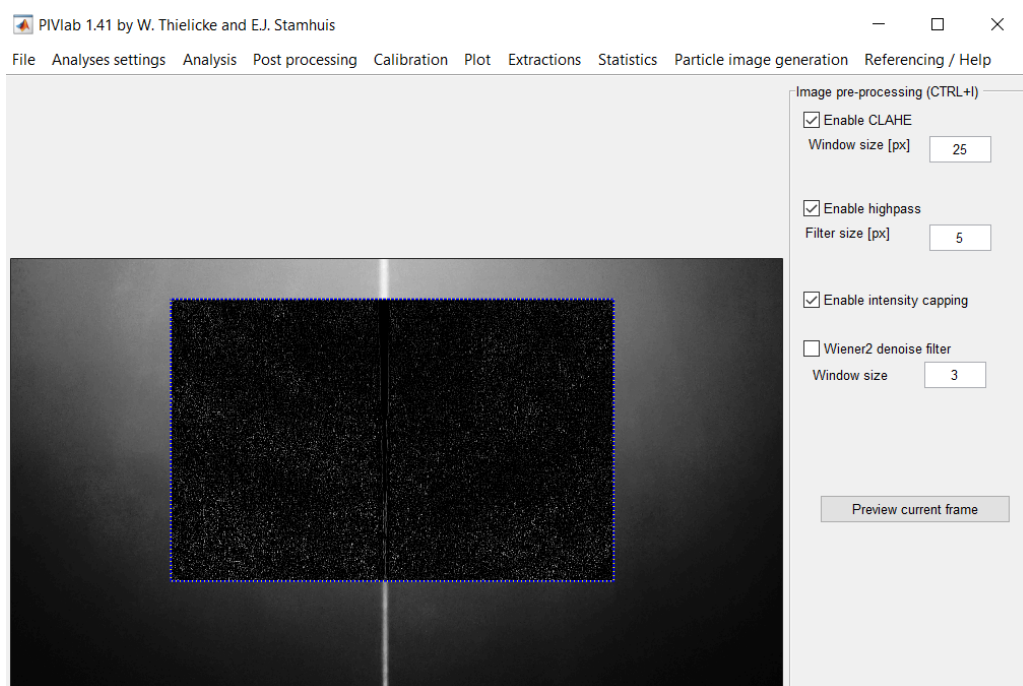


Figura 8: Interfaz Pre-Procesamiento PIVlab

3. Por último, se encuentran las configuraciones PIV. En esta sección, se determina el tipo de algoritmo de correlación cruzada a emplearse. La primera es Direct Cross

Correlation (DCC), la cual consiste en una correlación entre áreas de interrogación de diferentes tamaños sin pérdida de información y, por ende, resultados más certeros, pero con mayor tiempo de procesamiento computacional. La segunda es Direct Fourier Transform (DFT) Window Deformation la cual presenta cierta pérdida de información ya que usa áreas de interrogación del mismo tamaño. El error se disminuye al realizar varias pasadas, presentando resultados más certeros. Las imágenes obtenidas del experimento no resultaron en una carga significativa de información debido al tipo de flujo y área de interrogación relativamente simples, cualquier técnica es viable (Thielicke & Stamhuis, 2014).

La segunda parte consiste del análisis en todos los frames estudiados tomando en cuenta las configuraciones previamente realizadas. En esta sección, se obtiene el campo vectorial de flujo. Sin embargo, estos no son los resultados definitivos ya que todavía pueden presentarse ciertos errores, por lo que es importante realizar un post procesamiento de los resultados discutido a continuación.

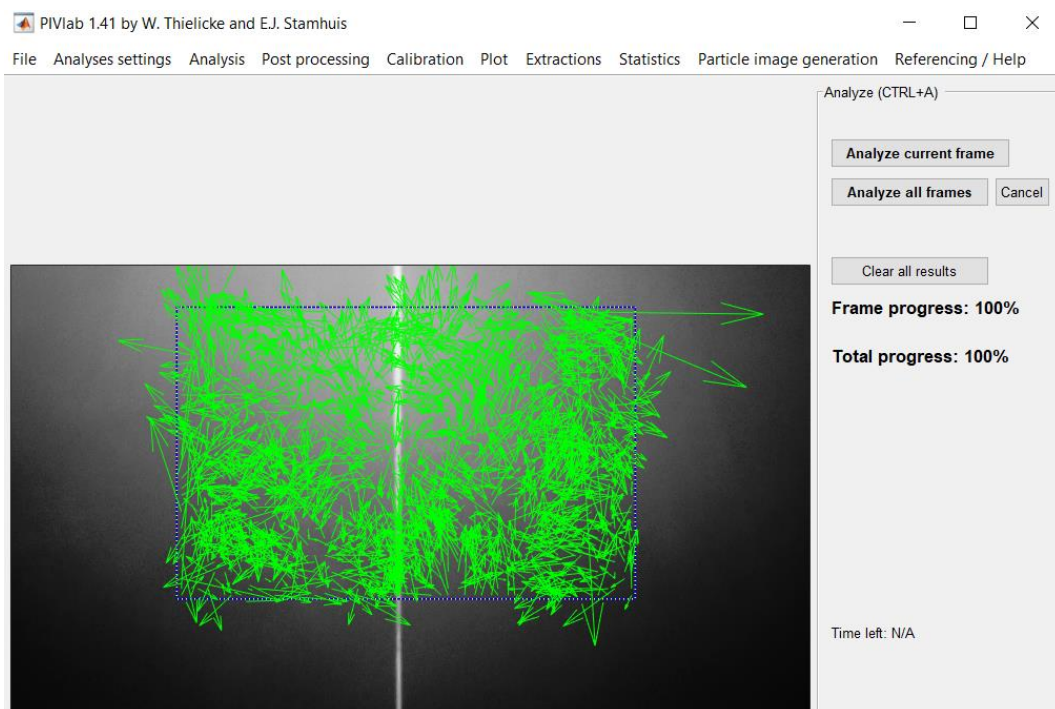


Figura 9: Interfaz Análisis PIVlab

La tercera parte consiste en validar los vectores obtenidos. Como se observa en la figura 8, el campo vectorial no está refinado y cuenta con varios errores. Por lo tanto para la validación, se puede seleccionar un rango de vectores de velocidad en un diagrama de dispersión, eliminando así valores atípicos. Además, existe la opción de colocar un filtro basado en desviación estándar de la velocidad, o validar los vectores por una mediana local de velocidad. Una vez removidos los datos incongruentes, los vectores faltantes deben ser reemplazados por datos interpolados. De esta forma, se obtiene un campo vectorial más preciso.

Finalmente, para obtener los resultados se debe calibrar la imagen estableciendo una distancia referencial, y el time step determinado por los fps y tiempo de exposición de la imagen. Una vez calibrada la imagen, se obtienen los valores en unidades métricas, y se puede obtener gráficas lineales, histogramas y diagramas de dispersión. Adicionalmente, al obtener los vectores medios, se muestra un campo vectorial más uniforme lo cual representa la velocidad promedio del fluido dentro del área de interés. También se puede trazar líneas de corriente, y extraer resultados de zonas específicas. Entre los resultados que se obtienen en esta herramienta se encuentran: la magnitud de la velocidad, las componentes de la velocidad, la vorticidad, localizador de vórtice, entre otros. Además, se puede modificar la apariencia del diagrama y variar ciertos parámetros para una mejor visualización del campo de flujo.

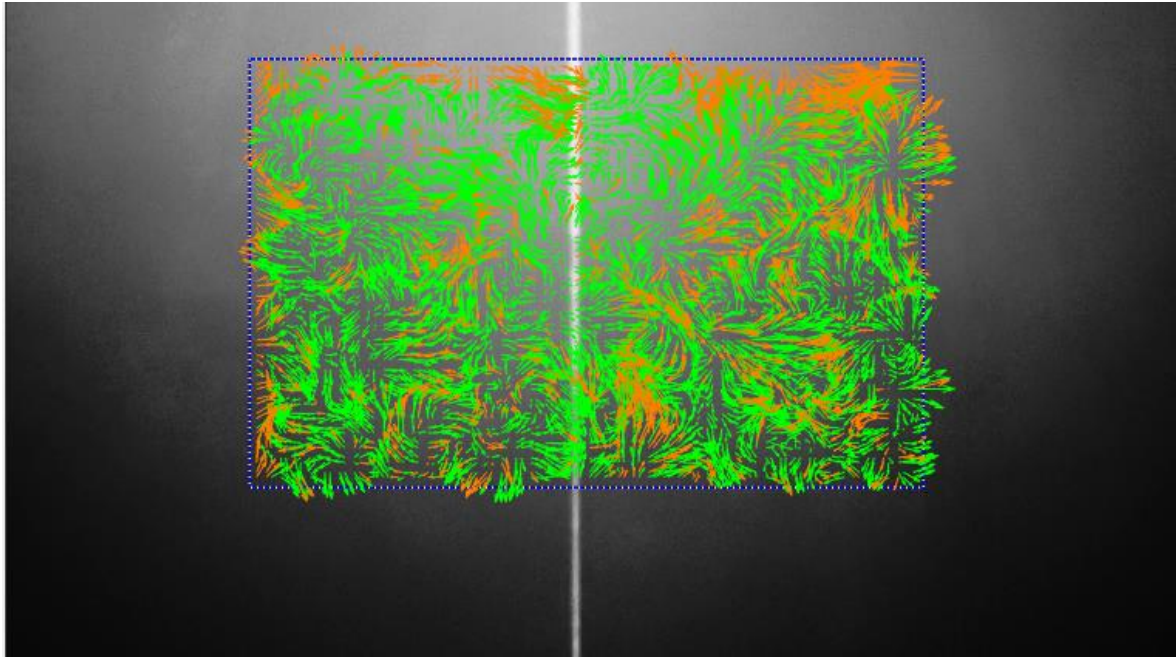


Figura 10: Campo Vectorial Post-Procesado PIVlab

2.4. Simulación CFD

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos de forma experimental por el método PIV y determinar la exactitud del sistema implementado, se desarrolló una simulación de Computer Fluid Dynamics (CFD) utilizando el software ANSYS Fluent. Para esto, primero se graficó el modelo en SolidWorks, un software CAD. El modelo consta de tres cuerpos: el túnel que se considera como el área total del fluido, la región rotativa que encierra al ventilador y determina el área de contacto del fluido, y la hélice que es el cuerpo rotativo. Luego se lo exportó a ANSYS Fluent, en donde se creó dos Booleans para especificar la interacción de cada sólido. El primero, es una sustracción entre sólido del túnel con el sólido de la región rotativa. El segundo, es una sustracción de la región rotativa con el ventilador. Esto resulta en solamente dos sólidos en la simulación, el túnel y la región rotativa.

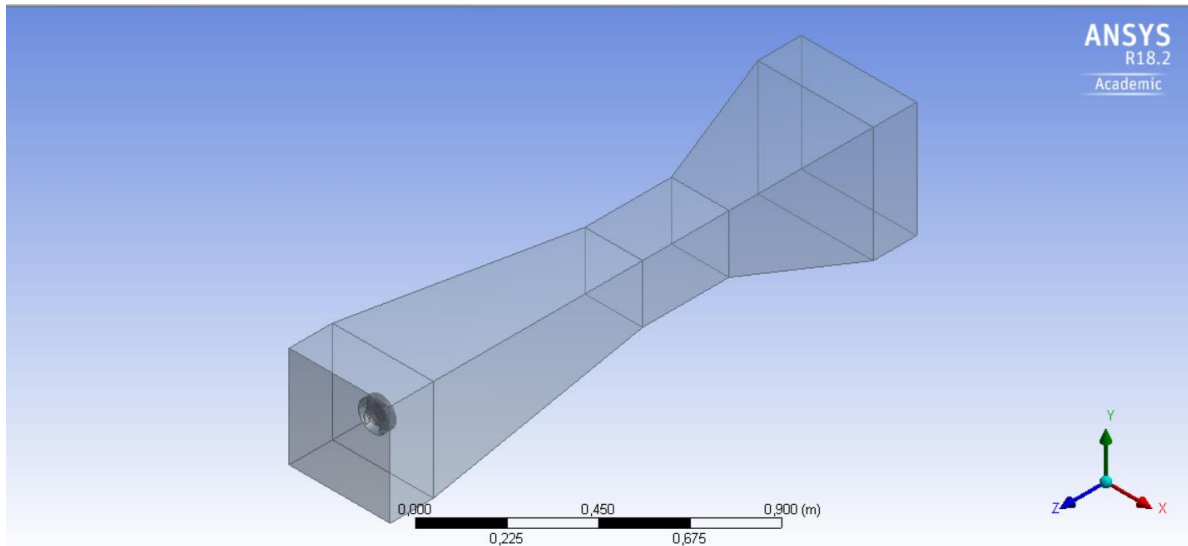


Figura 11: Geometría de Estudio en ANSYS Fluent

Después se establece el mallado para ambos cuerpos. Para el túnel se realizó un mallado de tamaño medio con geometría hexagonal, mientras que para la región rotativa se realizó un mallado tamaño medio automático que consiste básicamente de tetraedros. El software, al ser una versión estudiantil, tenía limitaciones en el mallado. A pesar de que mayores ajustes en el mallado no fueron posibles, los resultados obtenidos fueron concisos. La validación se realizó modificando varios parámetros como la geometría y el tamaño del elemento.

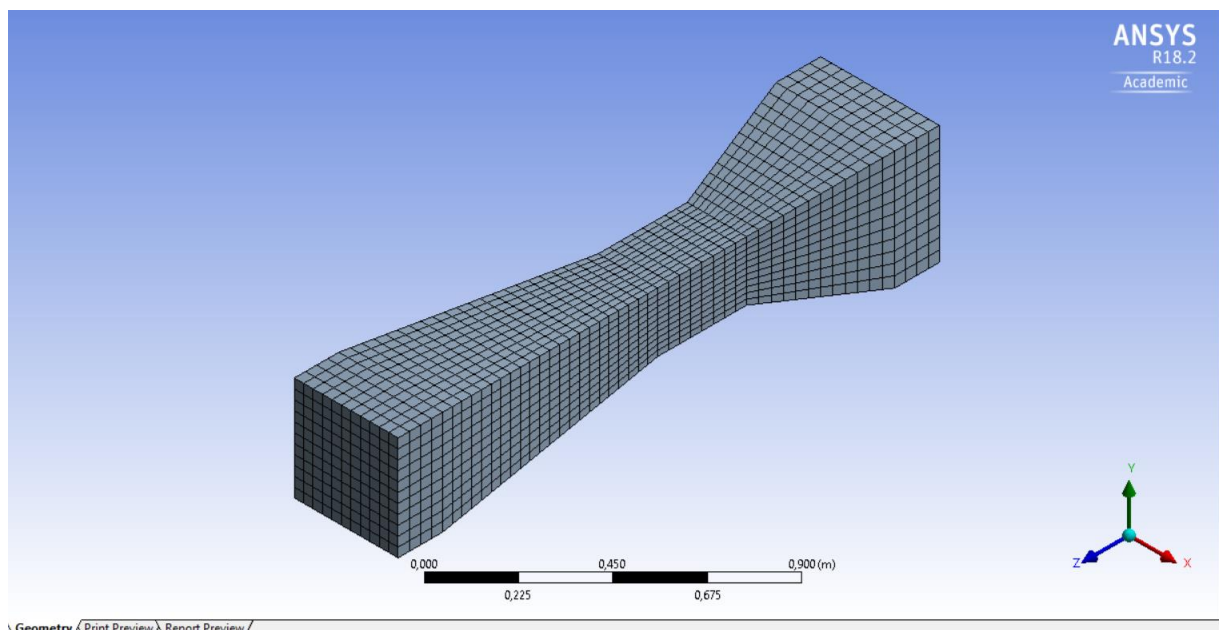


Figura 12: Mallado en ANSYS Fluent

Posteriormente, se estableció las configuraciones del análisis. Se realizó un análisis en estado estable utilizando el modelo para turbulencia “Realizable κ - ϵ Model”. Se determinó eso ya que existe un ventilador en el sistema, el cual es dependiente del tiempo, y presentará zonas de turbulencia leve en el túnel. Además, los cálculos presentados en la sección siguiente, muestran el número de Reynolds que entra del rango de flujo turbulento. Este tipo de modelo presenta resultados certeros en cuanto a fluidos que trabajan con elementos en rotación. Además, se seleccionó Scalable Wall Functions para el Near-Wall Treatment. Esto permite obtener resultados más certeros ya que se enfoca en la forma en la que el fluido interactúa con las paredes que lo rodean aun refinando el mallado. Estas paredes son la fuente principal de turbulencia y vorticidad en un fluido.

Finalmente, se determina las condiciones de borde de los cuerpos del sistema. Para la región rotativa, se selecciona frame motion debido a que esta sección es el ventilador en rotación, estableciendo una velocidad angular promedio de 2900 RPM. Para el túnel, se selecciona las condiciones de entrada y de salida como presiones atmosféricas. Por último, se selecciona los resultados que desea obtener en la simulación, y se determina el número de iteraciones deseadas. Se recomienda establecer un número alto para que la solución converja con exactitud y los resultados sean más acertados. Se estableció 2500 iteraciones para los cálculos de la simulación, la cual convergió a las 141 iteraciones.

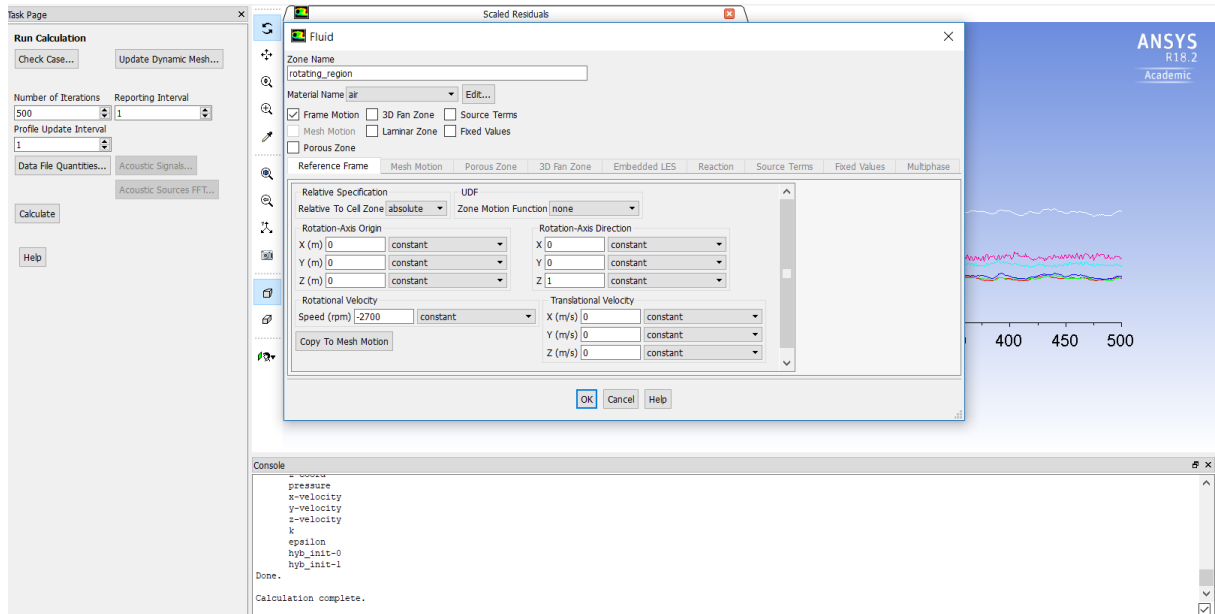


Figura 13: Interfaz de Set Up ANSYS Fluent

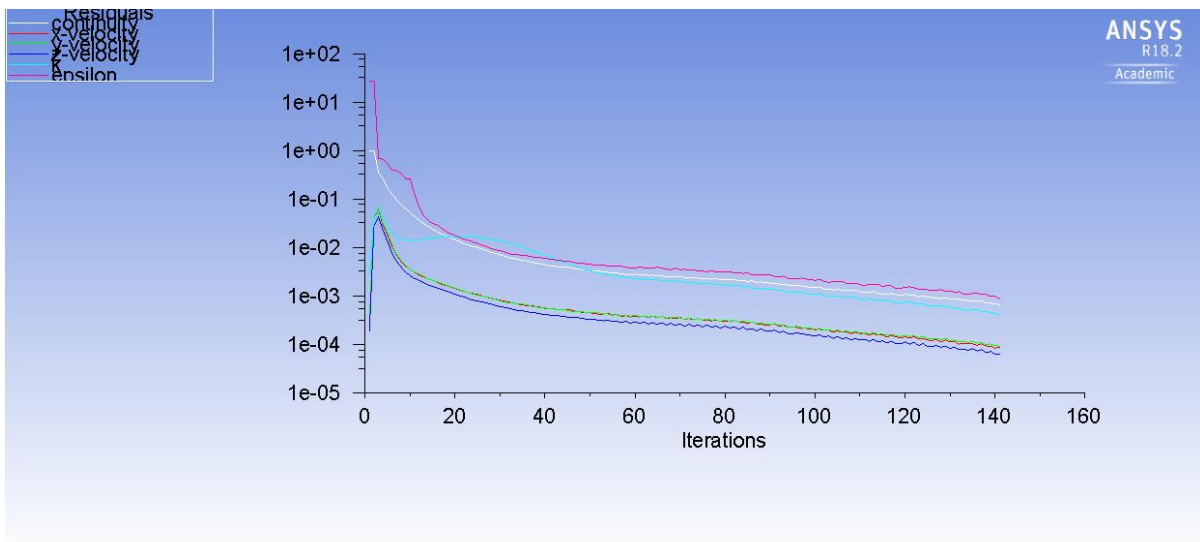


Figura 14: Iteraciones Corridas en ANSYS Fluent

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El flujo del sistema esta generado por el ventilador mencionado en la sección anterior. Por lo tanto, en base a dicho flujo se obtendrá los resultados teóricos del sistema considerando un flujo volumétrico promedio de 105 CFM para los cálculos.



Figura 15: Volumen de Control

$$A_1 = 0.16m^2$$

$$A_2 = 0.04m^2$$

$$A_3 = 0.1225m^2$$

$$Q_3 = 105CFM = 0.050 m^3/s \quad \therefore V_3 = \frac{0.050}{0.1225} = 0.4082 m/s$$

En donde A es el área de la sección en los distintas partes del túnel, Q_3 es el flujo volumétrico promedio generado por el ventilador, y V es la velocidad del fluido en los distintos puntos del túnel.

El túnel de viento construido en el presente proyecto trabaja con flujos bajos, es decir con fluidos subsónicos.

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1)$$

$$Ma = \frac{0.4082}{331.2}$$

$$= 0.0012 < 0.3 \quad \therefore \text{Flujo Incompresible}$$

Donde Ma es el número Mach, v es la velocidad del flujo, y c es la velocidad del sonido del fluido. Al ser menor a 0.3, los efectos de la densidad son despreciables entonces se puede considerar como un flujo incompresible (White, 2011).

El flujo incompresible dentro del túnel está gobernado por las ecuaciones de continuidad (2), y momento (3).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (3)$$

Las cuales derivan en la ecuación de continuidad (4) que permite calcular la velocidad del fluido, y en la ecuación de Bernoulli (5) para flujos incompresibles.

$$Q_i = Q_j \quad (4)$$

$$A_i V_i = A_j V_j$$

$$P_i + \frac{1}{2} \rho V_i^2 = P_j + \frac{1}{2} \rho V_j^2 \quad (5)$$

Al reordenar la ecuación de continuidad para las secciones 2 y 3 del volumen de control, se obtiene la siguiente expresión:

$$\therefore V_2 = \frac{Q_3}{A_2} = 1.25 \text{ m/s}$$

A partir de este resultado se puede obtener el número de Reynolds para conocer el régimen en el que se encuentra el fluido dentro del túnel. Al ser un ducto con sección no circular, es necesario obtener el diámetro efectivo.

$$D_{eff} = D_h \frac{64}{fRe_{Dh}} \quad (6)$$

Donde D_h es el diámetro hidráulico, y fRe_{Dh} es una constante de la fricción laminar obtenida a partir de la geometría del ducto. El diámetro hidráulico se define de la siguiente manera:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (7)$$

Donde A es el área de la sección, y P es el perímetro mojado del ducto.

$$D_h = 0.2 \text{ m}$$

$$fRe_{Dh} = 56.91$$

$$\therefore D_{eff} = 0.2249 \text{ m}$$

Una vez calculado el diámetro efectivo, se puede obtener el número de Reynolds que determinará el régimen del sistema, basado en la siguiente ecuación:

$$Re_{eff} = \frac{VD_{eff}}{\nu} \quad (8)$$

Donde V es la velocidad del flujo, D_{eff} el diámetro efectivo, y ν es la viscosidad cinemática del aire a 20 °C.

$$\nu = 0.00001825 \frac{kg}{ms} \quad \therefore Re_{eff} = 15404.11 \quad \therefore \text{Flujo Turbulento}$$

La velocidad V_2 es la magnitud de interés en el sistema ya que es la velocidad en la sección de prueba, en donde se buscará por medio del método PIV obtener valores similares.

Una vez calculada la velocidad esperada, se procede a realizar los experimentos en el sistema PIV. Se realizó cinco muestras para corroborar la precisión del sistema implementado. Cada una de las muestras fue analizada cinco veces para determinar con precisión un valor para la velocidad instantánea del flujo.

Tabla 3: Comparación de Datos Velocidad Promedio PIVlab

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5	Promedio	Error Porcentual
Muestra 1	1.0693	1.1009	1.0823	1.0592	1.1209	1.0865	7.8069
Muestra 2	0.9171	0.9201	0.9174	0.9095	0.9108	0.9150	-9.2100
Muestra 3	0.9908	1.0431	0.9711	0.9879	0.9954	0.9977	-1.0041
Muestra 4	1.0292	1.0177	1.1052	1.0957	1.1105	1.0717	6.3384
Muestra 5	0.9596	0.9702	0.9715	0.9734	0.9665	0.9682	-3.9313
Promedio						1.0078	5.6581

Se obtuvo un campo vectorial con varias zonas de vorticidad debido a la forma de suministración de las partículas al fluido. La máquina arroja el humo con cierta velocidad que se despreció en los cálculos, pero influyó de cierta manera en el análisis de las imágenes. Además, la temperatura de salida del humo es un factor clave debido a que influye en la densidad de este. Por lo tanto, el humo inicia su flujo de forma estable mientras que a medida que avanza y tiene contacto con el aire del ambiente, a una temperatura relativamente menor, su densidad aumenta y la fricción por viscosidad se vuelve mayor lo causa un corte en el flujo volviéndolo turbulento. La figura 16 muestra el campo de flujo del fluido en donde se nota varias zonas de ligera turbulencia con vórtices.

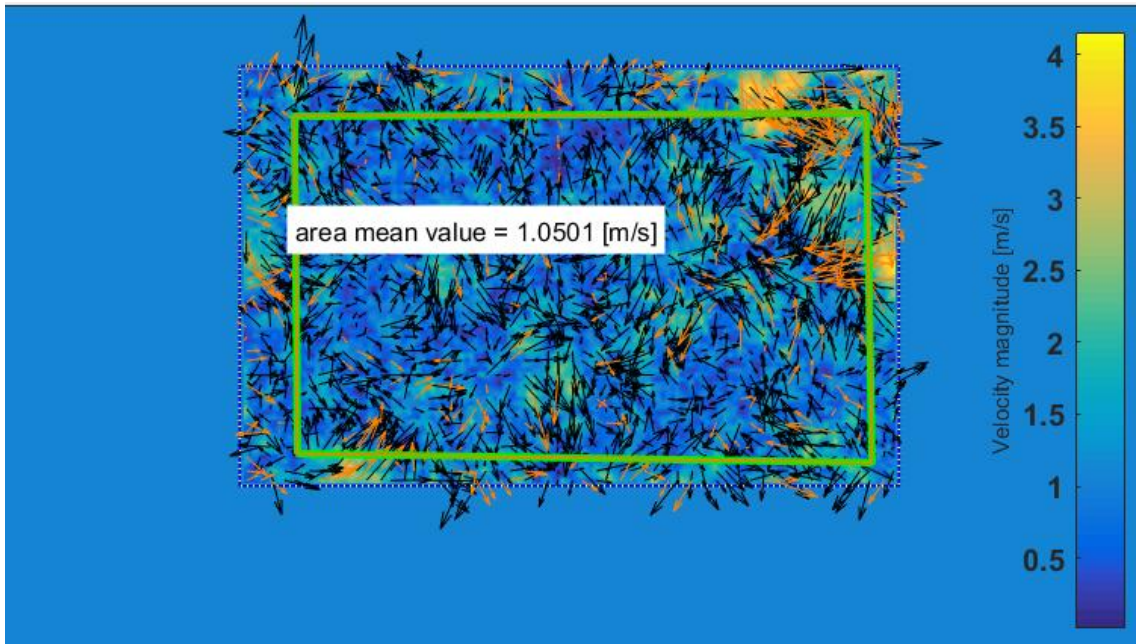


Figura 16: Campo Vectorial Magnitud de Velocidad en PIVlab

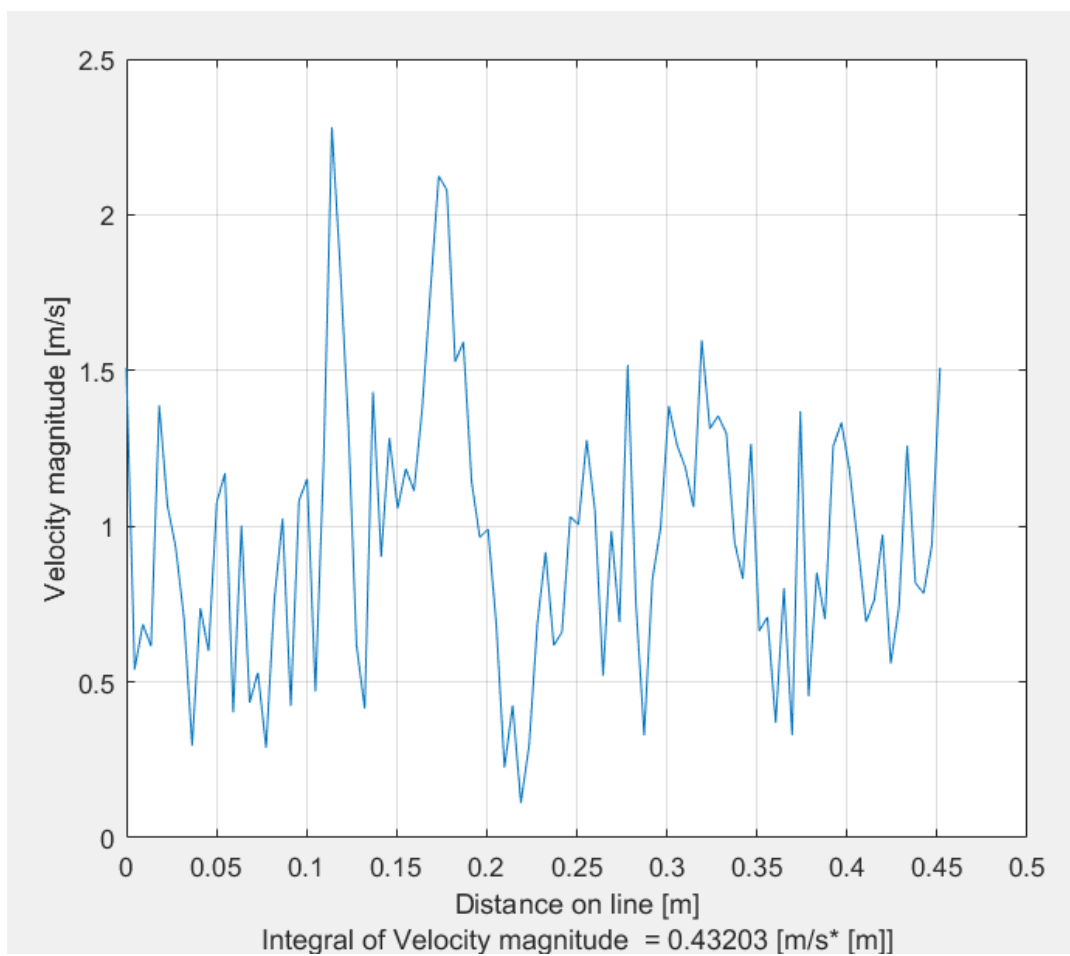


Figura 17: Gráfico Lineal Velocidad vs Distancia en Plano PIVlab

En la figura 17, se puede observar varias variaciones en el flujo a lo largo de la zona analizada. Esto se debe a las imperfecciones del sistema, siendo difícil para el software reconocer adecuadamente las partículas válidas. Además, el efecto de la máquina de humo causa ciertas zonas de irregularidad. Aun así, se puede existir regularidad en las velocidades obtenidas, como se muestra en las figuras a continuación, la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango estimado de forma teórica. La figura 18 muestra la frecuencia con la que los valores se repiten, presentando que la mayor cantidad de velocidades obtenidas se encuentra entre 1 y 1.2 m/s.

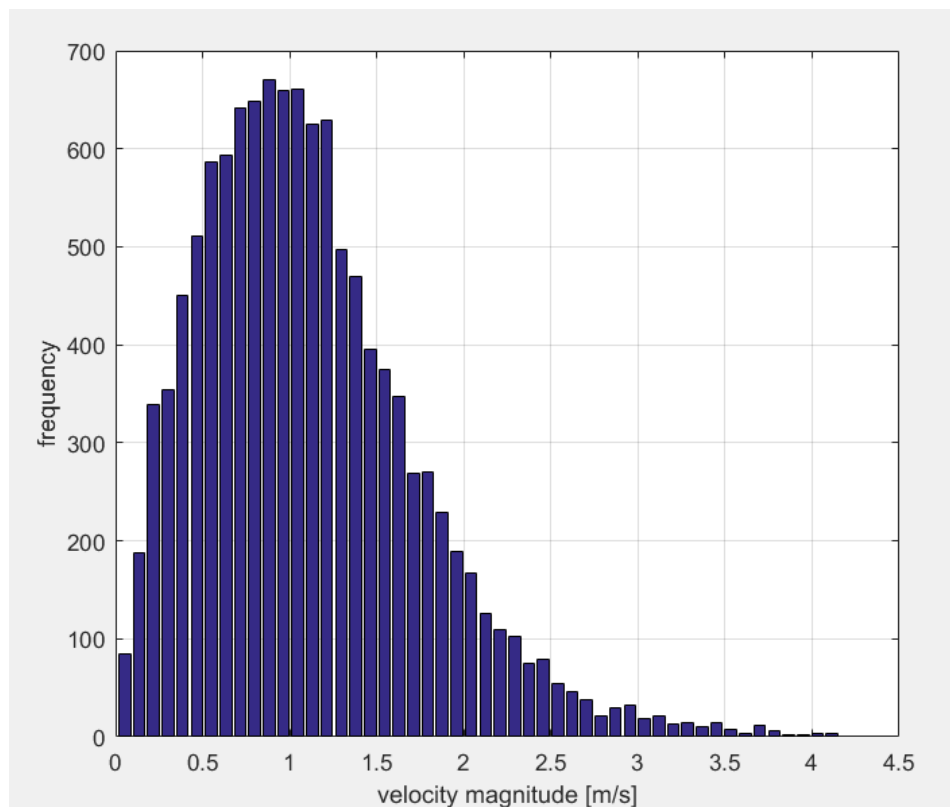


Figura 18: Resultados Histograma PIVlab

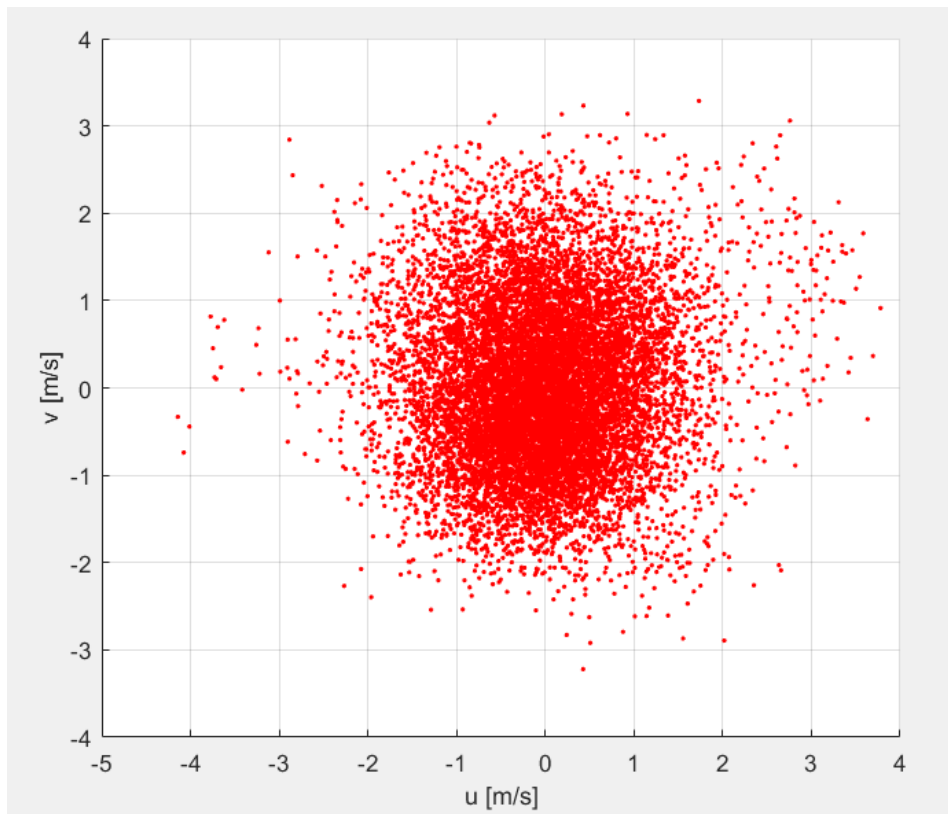


Figura 19: Resultados Gráfico de Dispersión PIVlab

Los resultados mostrados en la Tabla 3, indican que la velocidad promedio del flujo se encuentra alrededor de 1.01 m/s, presentando zonas en donde la velocidad aumenta o disminuye. Estos cambios en la velocidad se deben a las zonas de leve turbulencia mencionadas previamente causadas por la máquina de humo. Para comprobar dichos resultados obtenidos en PIVlab, se realizó una simulación en ANSYS Fluent con las condiciones previamente descritas. Los resultados obtenidos por el software se presentan a continuación.

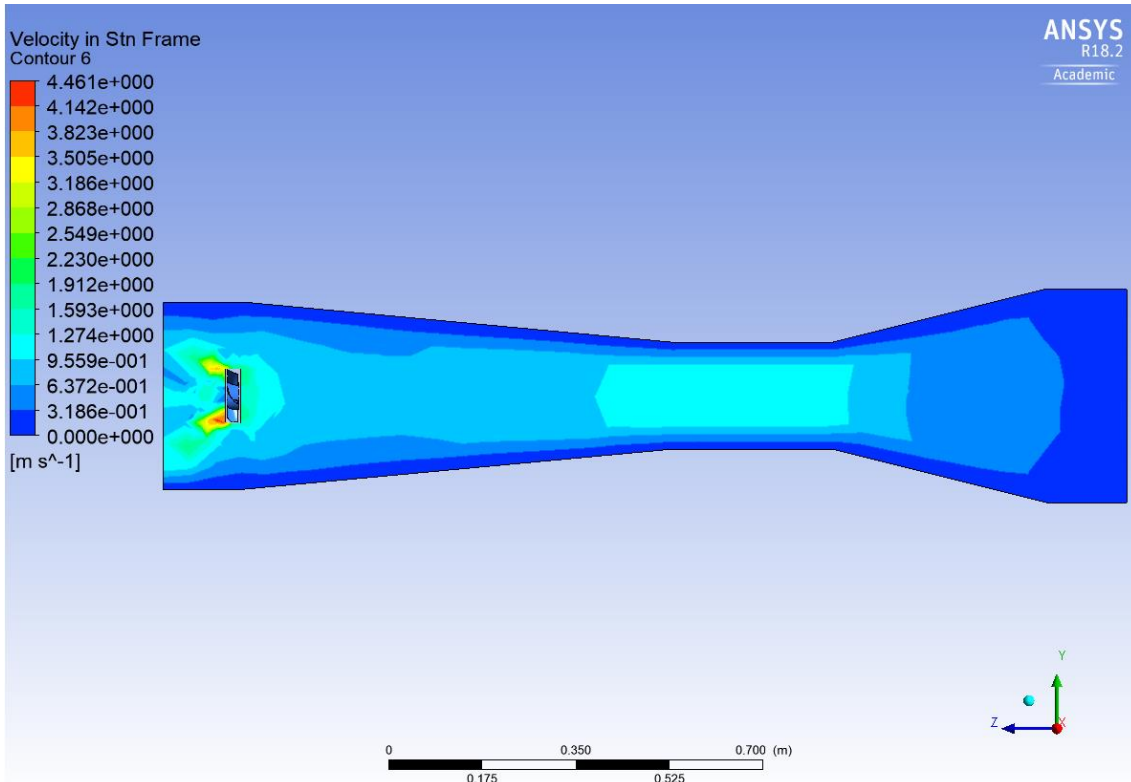


Figura 20: Contorno de Velocidad ANSYS Fluent

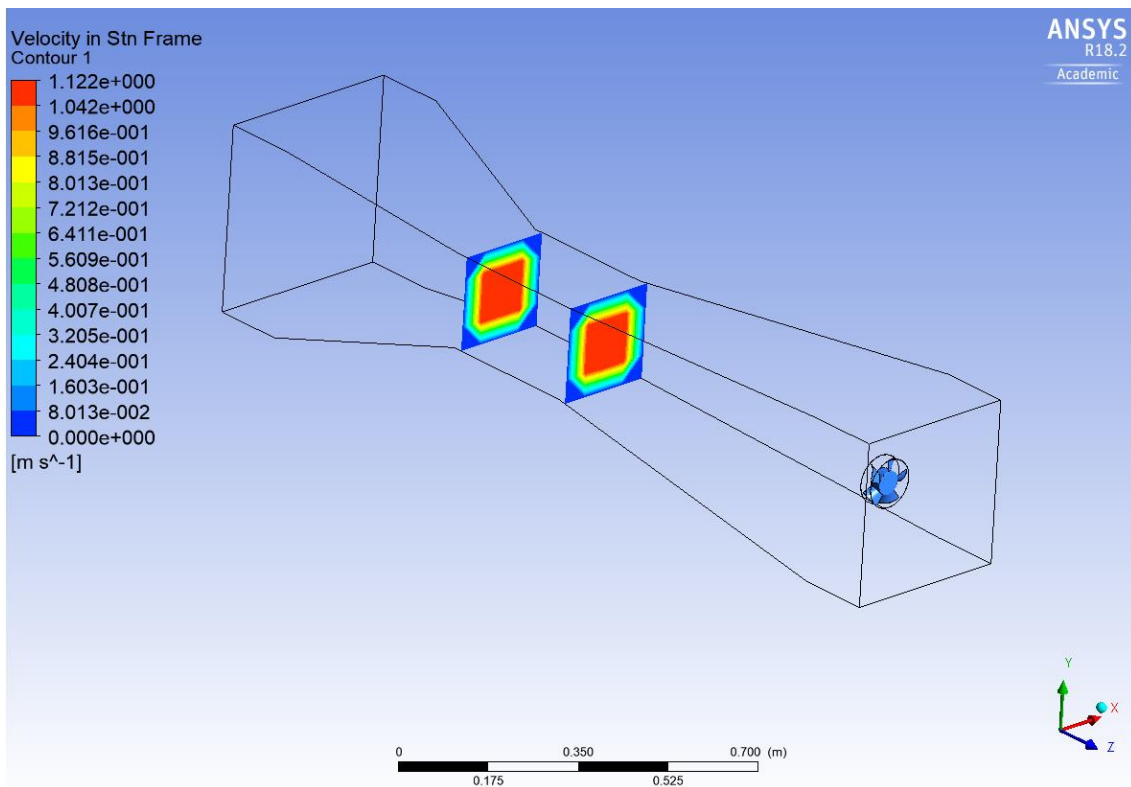


Figura 21: Contorno de Velocidad en los Límites de la Sección de Prueba

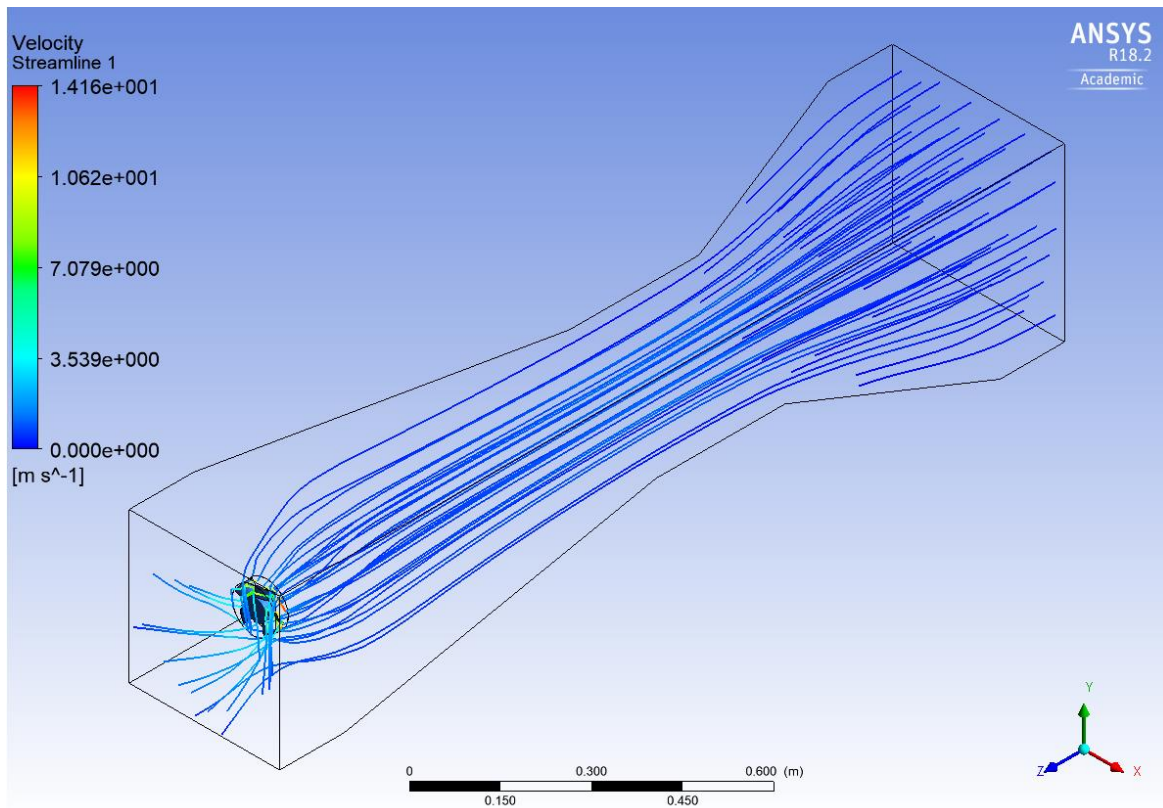


Figura 22: Líneas de Flujo ANSYS Fluent

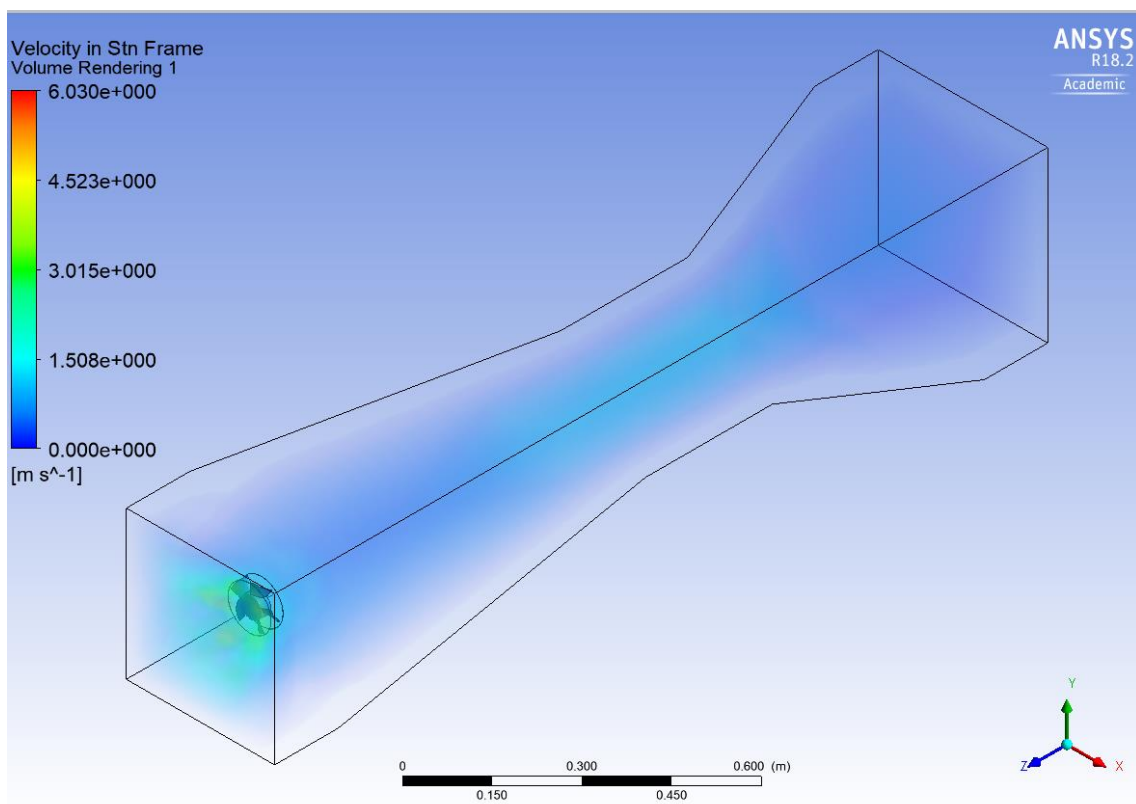


Figura 23: Representación Volumétrica ANSYS Fluent

Los resultados de la simulación observados en la figura 20 muestran en la sección de prueba valores entre 0.96 m/s y 1.27 m/s. Al observar los valores, se puede notar la similitud con los resultados teóricos y con los obtenidos previamente en PIVlab. Sin embargo, presenta una ligera variación lo cual puede deberse a varios factores, entre ellos el mallado. Por lo tanto, se realizó la validación en base al mallado para determinar si existe influencia en los resultados. Los parámetros a analizar fueron la geometría y el tamaño del elemento, en base a una simulación en estado estable para el mismo túnel de viento y colocando en su lugar como condición de frontera de la velocidad de flujo de este en la cara de salida del túnel.

Tabla 4: Validación Resultados Promedio Basado en el Mallado

	Fino	Medio	Grueso
Tetraédrico	n/a*	1.27 [m/s]	1.27 [m/s]
Hexagonal	1.08 [m/s]	1.14 [m/s]	1.12 [m/s]
Combinado Hex. Dominante	n/a*	1.17 [m/s]	1.15 [m/s]
Automático	n/a*	1.11 [m/s]	1.09 [m/s]
*Debido a las limitaciones del software, no fue posible estudiar ese tipo de mallado.			

A partir de la tabla 4, se puede concluir que los resultados dependen de la geometría más que del tamaño del elemento. Además, se puede notar que en efecto una geometría hexagonal es más certera aun cuando se varía el tamaño del elemento. Por lo tanto, el valor considerado de la simulación fue de 1.12 m/s que es el promedio presentado en la zona de interés. Este mallado se consideró como el más óptimo para el túnel de viento, y los valores de otros mallados se encuentran alrededor de este valor.

Sin embargo, los resultados obtenidos son cercanos al valor teórico de 1.25 m/s, pero este no toma en cuenta varios factores como caídas de presión en el túnel, efectos del

ventilador y la máquina de humo, y pérdidas menores por fricción o diseño del túnel que a la final terminan afectando en los resultados. Estas hipótesis se pudieron comprobar midiendo la velocidad del aire con un anemómetro, el cual marcó una velocidad aproximada entre 1.1 y 1.2 m/s dentro de la sección de prueba que resultan estar en el rango de la simulación.

Tabla 5: Error Estimado del Sistema Comparando la Velocidad

V. PIVlab	V. Fluent	V. Teórico	E. Absoluto Fluent	E. Absoluto Teórico
1.0078	1.12	1.25	-0.1122	-0.2422

La discrepancia en los resultados puede deberse a la falta de factores no tomados en cuenta durante la simulación mencionados previamente, así como también fallas en el proceso experimental, y en el sistema. Al ser mediciones experimentales se debe tomar factores adicionales para validar el método PIV implementado. Lo ideal sería comparar los componentes con un sistema PIV profesional, y así estimar la varianza que existe entre los sistemas por medio de un análisis Gage R&R para determinar si el error es producido por algún componente en específico.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se comparó resultados obtenidos de forma experimental en el sistema PIV implementado con simulaciones de CFD en ANSYS Fluent. Se obtuvo valores similares con un bajo porcentaje de error, validando así la precisión del sistema. Sin embargo, se requieren ciertos ajustes en el sistema como en la iluminación, las partículas y método de inserción, y el diseño del túnel.

Primero, se recomienda usar un láser más potente, es decir, mayor a los 5mW que poseía el láser implementado. El láser mejorará la calidad de las imágenes al brindar una mayor iluminación y, por lo tanto, existirá un mejor contraste de las partículas. Además, la mejora del sistema de iluminación permitirá ajustar la cámara a mejores configuraciones, por ejemplo, disminuyendo más el ISO y el tiempo de exposición para captar las partículas a mayores velocidades con precisión. Adicionalmente, se recomienda utilizar un láser solamente con lentes cilíndricos para la proyección del plano. El láser seleccionado proyectaba el plano de luz necesitado, pero también proyectaba un punto en el centro como se puede observar en las imágenes. Esto interfirió ligeramente con algunos resultados ya que el programa no reconocía partículas en esa zona y el campo vectorial se cortaba.

Segundo, las partículas y el método de inserción no se consideraron óptimas porque la máquina de humo arrojaba el humo a una velocidad de aproximadamente 0.7 m/s lo cual afectó al flujo y no fue tomado en cuenta en la simulación ni en los cálculos. También como se mencionó previamente el flujo del humo se volvía turbulento después de un momento de entrar en contacto con el aire frío del ambiente. Sin embargo, lo más crucial del experimento fueron las partículas. Si bien el humo consistía de micro burbujas que reconocía PIVlab, había algunas partes que presentaban incongruencia y esto se atribuye a las partículas. Al no tener un tamaño específico similar entre ellas, al software le cuesta trabajo reconocer. Por lo

tanto, se recomienda realizar una mayor inversión en esta parte del sistema ya que es el más barato considerando los otros instrumentos del sistema. Existen máquinas de humo para sistemas PIV que consisten de fluido a base de aceite y, sobre todo, cuentan con una boquilla Laskin que garantiza una inserción adecuada.

Finalmente, el diseño del túnel de viento requiere ciertos ajustes para ser considerado apropiado. La principal modificación recomendada es sobre el sistema de circulación. El ventilador debería ser más grande para cubrir toda el área de salida del túnel, y así evitar posibles reflujos y turbulencias dentro del túnel. Además, debería colocárselo justo en la salida del túnel. El ventilador se encontraba ligeramente dentro del túnel por lo que la ecuación de continuidad no aplicaba en su totalidad, y esto se pudo observar en la simulación y en las mediciones con el anemómetro. Sin embargo, al ser un experimento para probar la validez del sistema, el ventilador para PC cumplió el propósito adecuadamente. Entre otros ajustes al túnel de viento, se recomienda una sección de prueba un poco más larga, y un difusor con área seccional circular en la salida. También se recomienda mejorar el panel o rejilla que se encuentra en la entrada del túnel para garantizar un flujo laminar dentro del túnel. Una menor área en las separaciones de la rejilla sería lo ideal.

Si bien los resultados obtenidos de forma experimental en este sistema PIV no fueron completamente precisos, el bajo costo del sistema justifica los errores presentados y se lo puede considerar apto para el uso en el área de educación. Fue posible ensamblar un sistema e implementarlo por un costo menor a 2500 dólares, lo cual es la cuarta parte de lo que llegan a costar sistemas PIV profesionales.

Los resultados obtenidos en el sistema son prometedores, por lo que se espera que sea posible ampliar su alcance para investigaciones y experimentos más sofisticados dentro de la universidad, y asista en el aprendizaje de los estudiantes en varias áreas como mecánica de fluidos, aerodinámica y transferencia de calor. De igual manera, se espera que este sistema

sea referente para ampliar el campo de aplicación otras áreas como mecánica de materiales, biomecánica, e ingeniería ambiental y química.

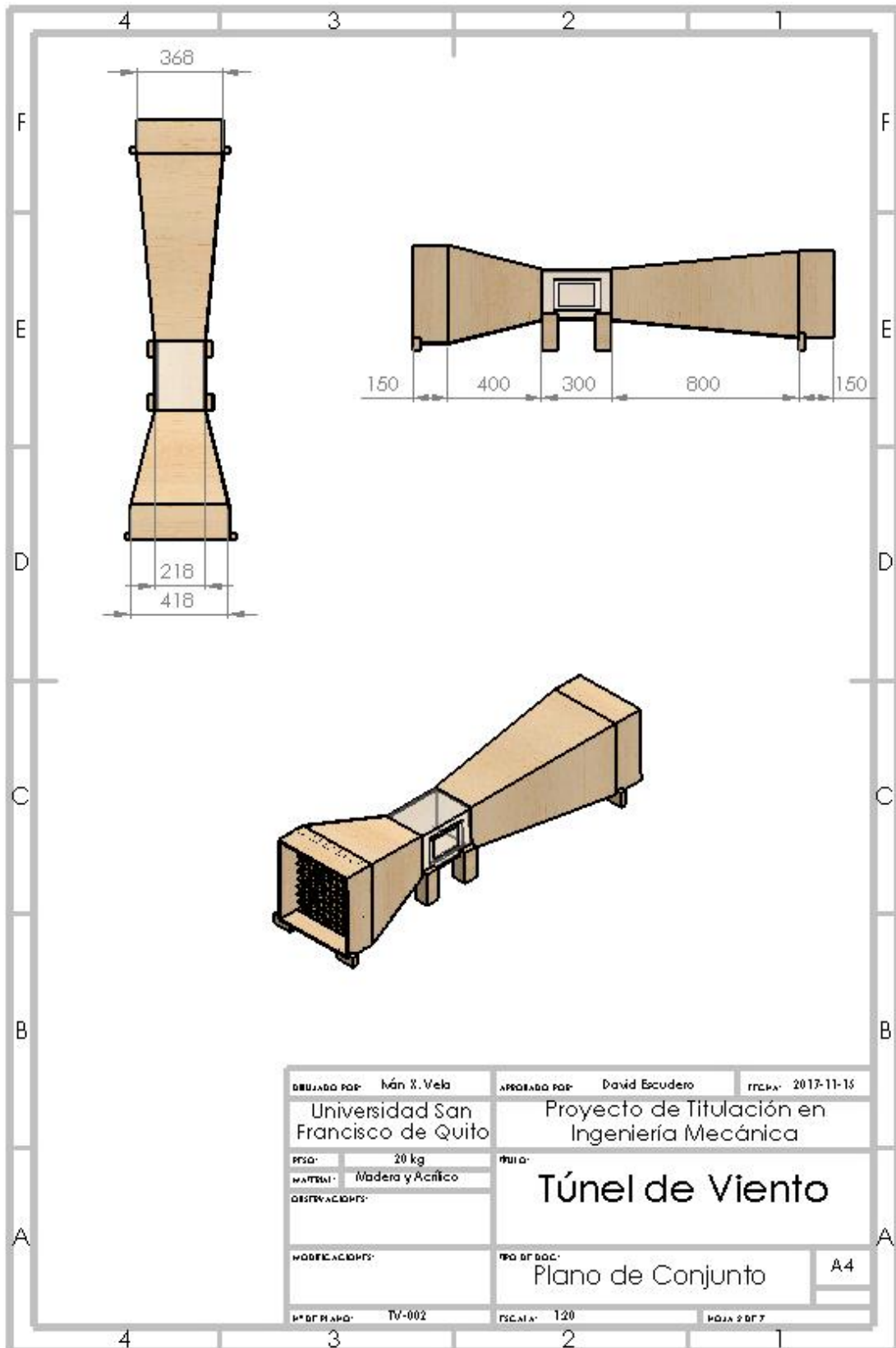
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

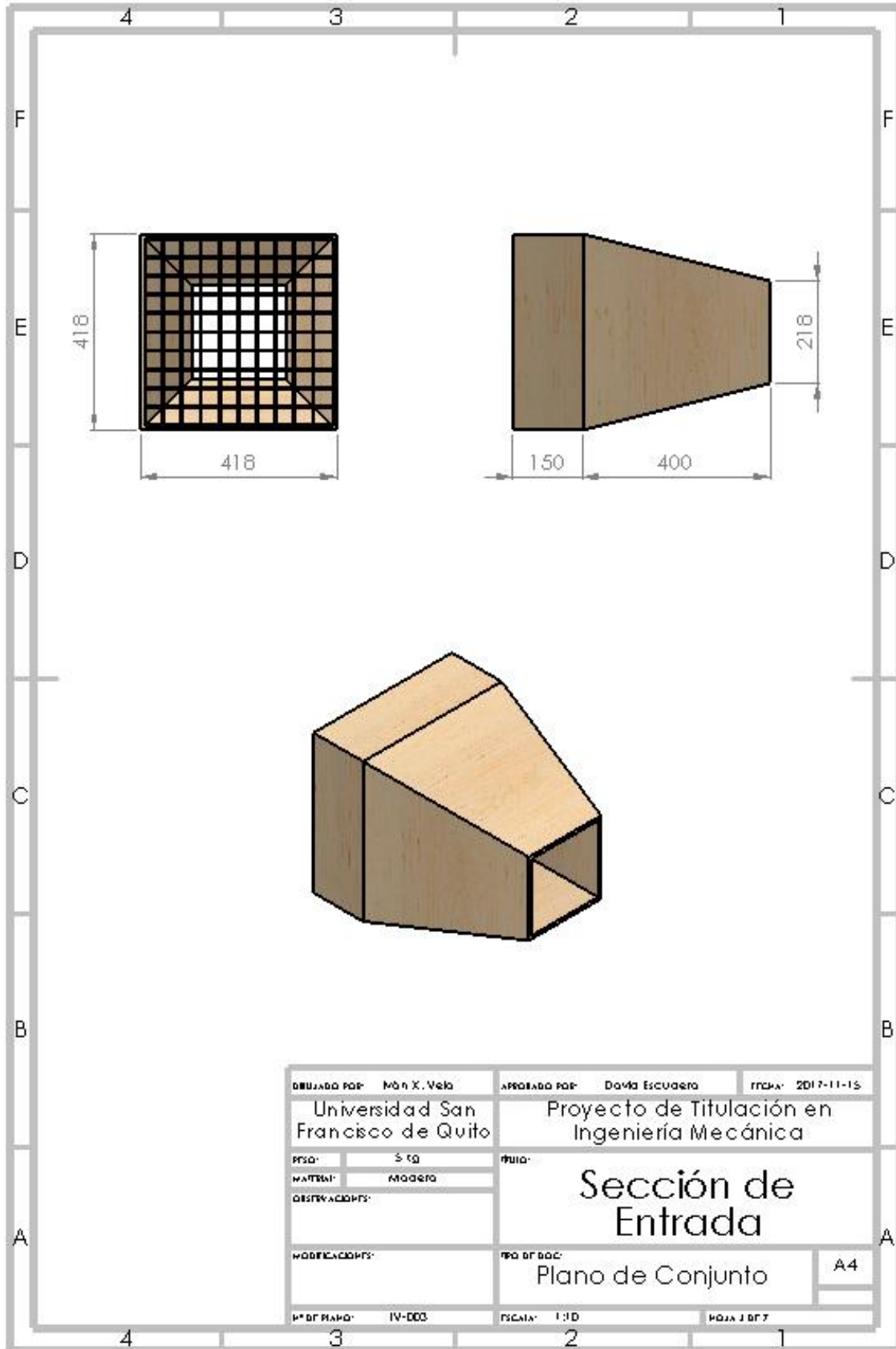
- Anderson, J. D. (2011). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2011). *Low-Speed Wind Tunnel: Design and Build*.
- Harshani, H. M. D., Galindo-Torres, S. A., & Scheuermann, A. (2015). Particle Image Velocimetry with high power Light Emitting Diodes for flow through porous medium, 89, 501–511. <https://doi.org/10.2495/MPF150421>
- Jahanmiri, M. (2011). *Particle Image Velocimetry : Fundamentals and Its Applications*. Particle Image Velocimetry : Fundamentals and Its Applications.
- Japan Aeronautical Exploration Agency (JAXA). (2015). Time Resolved PIV – Capturing an Unsteady Flow. Recuperado 21 de marzo 2017 de http://www.aero.jaxa.jp/eng/publication/magazine/sora/2012_no45/ss2012no45_01.html
- Paper, C., Paul, N., & Madras, T. (2014). Development of a low cost flow visualization and velocimetry apparatus for the investigation of 2D flows investigation of 2D flows, (August 2013), 7. <https://doi.org/10.13140/2.1.4378.3363>
- Pérez, A. (2016). Desarrollo de un sistema PIV (velocímetro por imagen de partículas) didáctico.
- Ryerson, W. G., & Schwenk, K. (2012). A simple, inexpensive system for digital particle image velocimetry (DPIV) in biomechanics. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 317 A(2), 127–140. <https://doi.org/10.1002/jez.725>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly , Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB.
- White, M. F. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). New York: McGraw-Hill.

ANEXO A: PRESUPUESTO SISTEMA PIV

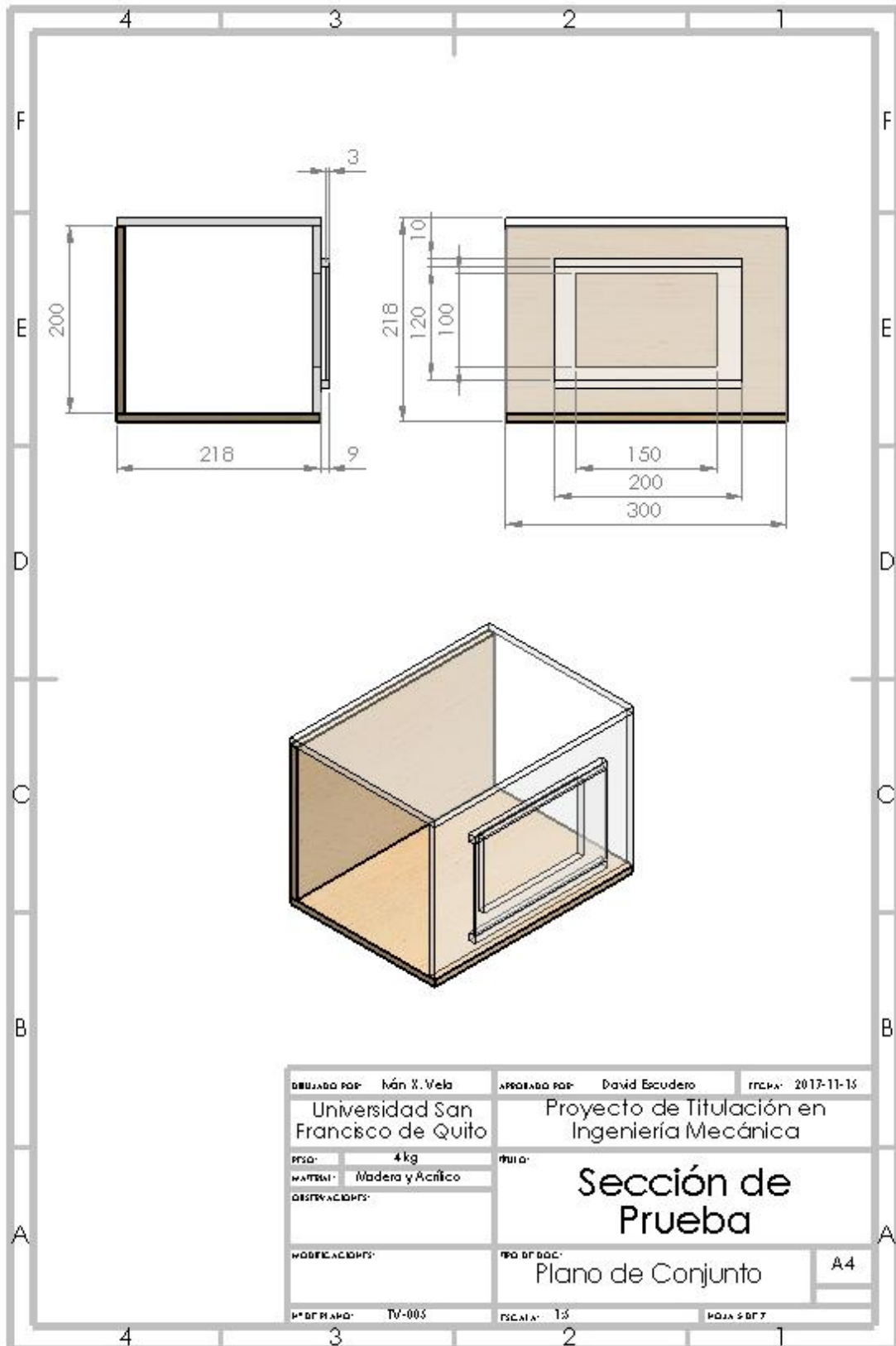
Artículo	Descripción	Precio
Láser	LBS-532 Brightline Pro Line-Projecting Laser	399,00
Gafas de Seguridad	LSG-532-NF-2 Fit Over Safety Goggles 532nm	89,00
Cámara	Sony Alpha 77II Mirrorless	1198,00
Lente	Tamron SP 60mm f/2 Di II 1:1 Macro Lens	499,00
Tarjeta de Memoria	Sony 64GB SF-G Series UHS-II SDXC Memory Card	199,99
Trípode	Sony VCT-R100	33,00
Túnel de Viento	Madera y Acrílico	75,00
Total		2492,99

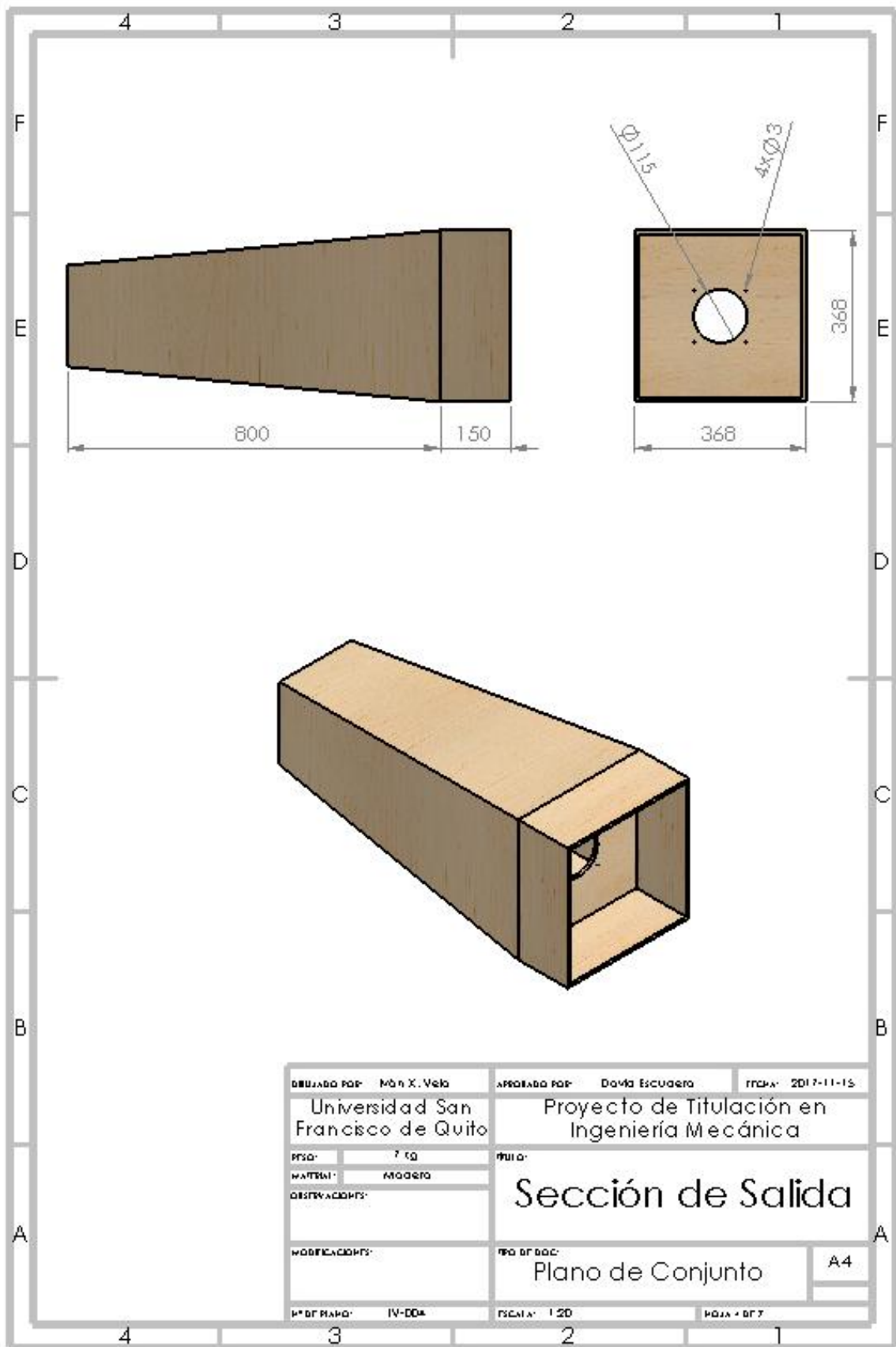
ANEXO B: PLANOS TÚNEL DE VIENTO



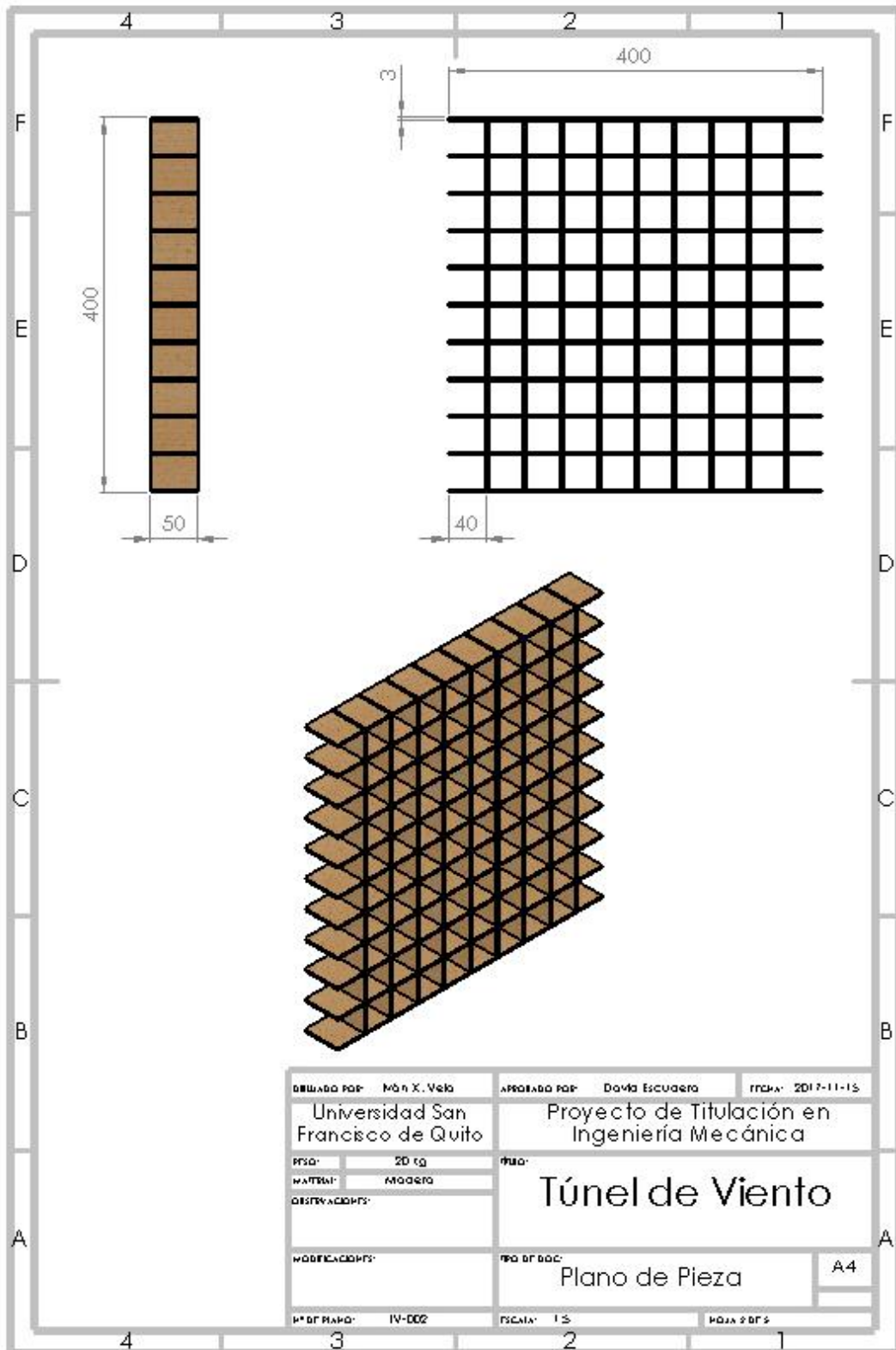


DISEÑADO POR: MÓN X. Vela		APROBADO POR: Deyla Escudero		FECHA: 2017-11-15	
Universidad San Francisco de Quito			Proyecto de Titulación en Ingeniería Mecánica		
PROJ:	5-10	PROJ:			
MATERIA:	MODOLO				
MODIFICACIONES:					
TÍTULO:			Sección de Entrada		
N° DE PLANO:			TPO DE DOC:		A4
IV-003			ESCALA: 1:10		PÁGINA 3 DE 7





DIBUJADO POR: MÓN X. VELA		APROBADO POR: DORA ESCOBERO		TRABAJO: 2017-111-15	
Universidad San Francisco de Quito			Proyecto de Titulación en Ingeniería Mecánica		
PROF:	7 EQ	TÍTULO:			
MATERIA:	MADERA	Sección de Salida			
OBSERVACIONES:					
MODIFICACIONES:		TPO DE DOC:		A4	
Nº DE PLANO: IV-DDA		ESCALA: 1:20		HOJA: 077	



ANEXO C: ESPECIFICACIONES LÁSER

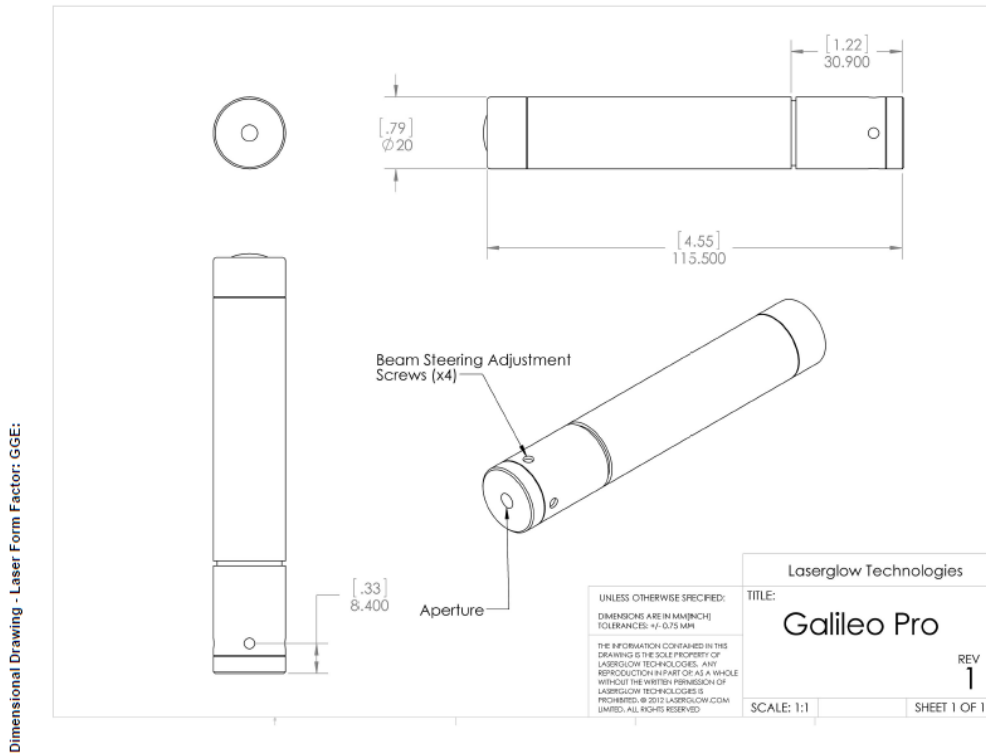
Specifications:

This spec sheet has been generated specifically for part number GGE005XXX, per your request, and data for the entire series is also displayed for your reference. The specs which are specific to GGE005XXX have been highlighted below in **red + bold**.

Laser Form Factor	GGE
Output Power (mW)	>3, <5
FDA Safety Class	IIIa
Central Wavelength (nm)	531.65
Divergence (mrad, full angle)	<1.2
Beam Dimensions (mm, 1/e ²)	1.5
Transverse Mode	TEM00
Longitudinal Modes	Multiple
Approximate Peak Power (W)	5
Operating Temperature Range (°C)	15 to 35
Storage Temperature Range (°C)	-10 to 50
Total Power Consumption (W)	2
Max. Power Input Duty Cycle	100%
Cooling Method	Passive Air
Standard Warranty (months)	6
MTTF (operational hours)	5000
Weight of Laser Head (kg)	0.08
Laser Head Dimensions (mm)	118 (l) x 20 (d)
Power Supply	1 x CR123A Battery

CW: All specifications are based on performance at full output power and after the specified warmup period. Output characteristics may change if the laser is run at a different power level.

Q-Switched: Specifications are based on the laser pulsing at the specified design frequency. Output characteristics may change if the laser is run at a different frequency.



Dimensional Drawing - Laser Form Factor: GGE:

ANEXO D: ESPECIFICACIONES CÁMARA Y LENTE FOTOGRAFICO

SONY ALPHA 77II

Imaging

Lens Mount	Sony Alpha/ Minolta
Camera Format	APS-C / (1.5x Crop Factor)
Pixels	Actual: 24.7 Megapixel Effective: 24.3 Megapixel
Max Resolution	24 MP: 6000 x 4000
Aspect Ratio	3:2, 16:9
Sensor Type / Size	CMOS, 23.5 x 15.6 mm
File Formats	Still Images: JPEG, RAW Movies: AVCHD Ver. 2.0, MP4, MPEG-4 AVC/H.264 Audio: AAC LC, AC3, Dolby Digital 2ch
Bit Depth	14-Bit
Dust Reduction System	Yes
Memory Card Type	Memory Stick Pro Duo Memory Stick PRO HG-Duo Memory Stick XC-HG Duo SD SDHC SDXC
Image Stabilization	Sensor-Shift

Focus Control

Focus Type	Auto & Manual
Focus Mode	Automatic (A), Continuous-Servo AF (C), Direct Manual Focus (DMF), Single-servo AF (S)
Autofocus Points	Phase Detection: 79 (15 Cross-Type)

Viewfinder/Display

Viewfinder Type	Electronic
Viewfinder Size	0.5"
Viewfinder Pixel Count	2,359,296
Viewfinder Eye Point	27.00 mm
Viewfinder Coverage	100%
Viewfinder Magnification	Approx. 1.09x
Diopter Adjustment	-4 to +3 m
Display Screen	3" Rear Screen Swivel LCD (1,228,800)

Exposure Control

ISO Sensitivity	Auto, 100-25600 (Extended Mode: 50-25600)
Shutter	Type: Electronic & Mechanical Speed: 30 - 1/8000 Seconds , Bulb Mode
Remote Control	RMT-DSLR2 (Optional)
Metering Method	Center-Weighted Average Metering, Multi-Zone Metering, Spot Metering
Exposure Modes	Modes: Aperture Priority, Auto, Continuous Advance Priority AE, Intelligent Auto, Manual, Memory Recall, Movie, Programmed Auto, Scene Selection, Shutter Priority, Superior Auto, Sweep Panorama Metering Range: EV -2.0 - EV 17.0 Compensation: -5 EV to +5 EV (in 1/3 or 1/2 EV Steps)
White Balance Modes	Auto, Cloudy, Color Temperature, Color Temperature Filter, Custom, Daylight, Flash, Fluorescent (Cool White), Fluorescent (Day White), Fluorescent (Daylight), Fluorescent (Warm White), Incandescent, Shade

AV Recording

Video Recording	Yes, NTSC
File Size	1920 x 1080p (Full HD) 1920 x 1080i (Full HD) 1440 x 1080 (HD) 1280 x 720 (HD) 640 x 480 (SD)
Aspect Ratio	16:9
Frame Rate	@ 1920 x 1080: 60 fps, 24 fps @ 1440 x 1080: 30 fps @ 1280 x 720: 30 fps @ 640 x 480: 30 fps
Exposure Control	Auto Manual: Shutter Speed, Aperture, ISO
ISO Sensitivity	100 - 12800
Focus	Auto Manual Continuous Auto
Max Video Clip Length	1920 x 1080: 29 Minutes
Audio Recording	Built-In Mic: With Video (Stereo) Optional External Mic: With Video

Performance

Self Timer	10 Seconds, 2 Seconds
Connectivity	1/8" Microphone, DC Input, HDMI D (Micro), Micro-USB, Multi Interface Terminal
Wi-Fi Capable	Yes

Power

Battery	1 x NP-FM500H Rechargeable Lithium-Ion Battery Pack, 7.2 VDC, 1650 mAh
AC Power Adapter	AC-PW10AM (Optional)

Physical

Dimensions (W x H x D)	5.6 x 4.1 x 3.2" / 142.2 x 104.1 x 81.3 mm <i>excluding protrusions</i>
Weight	1.60 lbs / 725.74 g <i>with battery and memory card</i>

TAMRON MACRO LENS

Performance

Focal Length	60mm Comparable 35mm Focal Length: 90 mm
Aperture	Maximum: f/2 Minimum: f/22
Camera Mount Type	Sony A
Format Compatibility	APS-C
Angle of View	26° 35'
Minimum Focus Distance	9.06" (23 cm)
Magnification	1x
Maximum Reproduction Ratio	1:1
Elements/Groups	14 / 10
Diaphragm Blades	7

Features

Image Stabilization	No
Autofocus	Yes

Physical

Filter Thread	Front: 55 mm
Dimensions (DxL)	Approx. 2.87 x 3.15" (73 x 80 mm)
Weight	13.76 oz (390 g)

Packaging Info

Package Weight	1.3 lb
Box Dimensions (LxWxH)	5.9 x 4.6 x 4.1"
