Universidad de la República
Facultad de Ingeniería

Diseño de Túnel de Viento con Herramienta de Procesamiento de Imágenes para el Ensayo de Perfiles Aerodinámicos y Calibración de Anemómetros

Memoria de proyecto presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por

Tania Aguirre, Victor Silveira, Agustín Freitas

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Industrial Mecánico.

Tutores

Dr. Ing. Gregory Randall ..... Universidad de la República
Msc. Ing. Álvaro Gómez ..... Universidad de la República
Dr. Ing. José Cataldo ..... Universidad de la República

Tribunal

Dr. Ing. Pablo Musé ..... Universidad de la Republica
Dr. Ing. Pablo Massaferro ..... Universidad de la Republica
Dr. Ing. Alejandro Gutiérrez ..... Universidad de la República
Ing. Santiago Correa ..... Universidad de la Republica

Montevideo
miércoles 27 julio, 2022

Diseño de Túnel de Viento con Herramienta de Procesamiento de Imágenes para el Ensayo de Perfiles Aerodinámicos y Calibración de Anemómetros, Tania Aguirre, Victor Silveira, Agustín Freitas.

Esta tesis fue preparada en LaTeX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 244 páginas.
Compilada el miércoles 27 julio, 2022.
http://iie.fing.edu.uy/

Tabla de contenidos

1. Descripción del Proyecto **1**
1.1. Herramienta de visualización 2
1.1.1. Adquisición 3
1.1.2. Procesamiento de imágenes 3
1.1.3. Análisis de la herramienta 6
1.1.4. Interfaz Gráfica 7
1.2. Diseño de túnel de viento 7
1.2.1. Elección de tipo de túnel 9
1.2.2. Sección de trabajo 9
1.2.3. Acondicionador de flujo 10
1.2.4. Contracción 11
1.2.5. Pieza de transición 11
1.2.6. Difusor 12
1.2.7. Ventilador 13
1.2.8. Carcasa 14
1.2.9. Resumen del dimensionamiento 15

2. Conceptos Generales de Mecánica de los Fluidos **17**
2.1. Cinemática 17
2.1.1. Coordenadas de Euler y Lagrange 17
2.1.2. Líneas de flujo 18
2.2. Ecuaciones gobernantes 18
2.2.1. Número de Reynolds 19
2.3. Turbulencia 19
2.3.1. Características 19
2.3.2. Escala de vorticidad 20
2.3.3. Vórtice de Rankine 21
2.4. Capa límite 21
2.4.1. Descripción cualitativa 21
2.4.2. Capa límite en una placa plana 22
2.4.3. Desprendimiento de capa límite 23

3. Sistema de adquisición **25**
3.1. Introducción 25
3.2. Equipos empleados en la adquisición 26

3.2.1. Trazador 27
3.2.2. Máquina de humo 27
3.2.3. Cámara de alta velocidad 28
3.2.4. Plano láser 28
3.3. Procedimiento de pre-adquisición de la imagen 29
3.3.1. Recomendaciones para el posicionamiento de los equipos . . 29
3.3.2. Luminosidad 30
3.3.3. Trazador 30
3.3.4. Ajuste resolución y zoom de la cámara 31
3.3.5. Ajuste focal y de escala 31
3.3.6. Selección de Frecuencia de Adquisición 32

4. Campo de Velocidad **35**
4.1. Introducción 35
4.2. Velocimetría por Imágenes de Partículas 36
4.2.1. OpenPIV 37
4.2.1.1. Pruebas de OpenPIV 38
4.2.2. Experimento Capa Límite 43
4.3. Flujo Óptico 49
4.3.1. Introducción 49
4.3.2. Algoritmo de Gunnar Farnebäck 49
4.3.2.1. Implementación en OpenCV 51
4.3.3. Experimentos 51
4.3.3.1. Capa Límite 51
4.3.3.2. Flujo libre sobre una placa plana 55
4.4. Conclusiones 58

5. Líneas de Flujo **59**
5.1. Obtención de las líneas de flujo 60
5.2. Flujo en torno a un obstáculo 60
5.2.1. Análisis de filmaciones 61
5.2.2. Líneas de flujo medio 64
5.2.3. Comparación con estudio numérico 66
5.2.4. Límites de la herramienta 67
5.3. Ensayo aerodinámico: Modelo a escala de un vehículo 69
5.3.1. Análisis de filmaciones 69
5.3.2. Líneas de flujo medio 71
5.3.3. Comparación de resultados con estudio de referencia 72
5.4. Conclusiones 73

6. Detección Vórtices **75**
6.1. Introducción 75
6.2. Vortexfitting 75
6.2.1. Método de detección de vórtices 75
6.2.2. Implementación 77
6.3. Análisis de resultados 79

6.4. Conclusiones 89

7. Software **91**
7.1. Desde consola 91
7.2. Interfaz Gráfica 94
7.2.1. Implementación 94
7.2.2. Manual de usuario 97
7.2.2.1. Preprocesamiento 97
7.2.2.2. Procesamiento y Visualización 97
7.2.2.3. Ejemplo de Uso 101

8. Túnel de Viento: Predimensionamiento **107**
8.1. Condiciones de dimensionamiento 108
8.1.1. Condición para calibración de anemómetros 108
8.1.2. Condición para ensayar perfiles aerodinámicos 108
8.1.3. Presupuesto y espacio disponible 109
8.2. Proceso de dimensionamiento 110
8.2.1. Dimensiones de la zona de trabajo 111
8.2.2. Dimensiones de la contracción y difusor 115
8.2.3. Diámetro del rotor 117

9. Túnel de Viento: Diseño aerodinámico **119**
9.1. Consideraciones generales de materiales 119
9.2. Labios de entrada y pared auxiliar 119
9.3. Honeycomb y Mallas 120
9.3.1. Condiciones de diseño 121
9.3.2. Diseño del Honeycomb 123
9.3.3. Diseño de las mallas 123
9.3.4. Pérdida de carga y largo requerido 124
9.4. Contracción 125
9.4.1. Diseño de la contracción 125
9.4.2. Pérdida de carga y largo requerido 130
9.5. Zona de trabajo 130
9.5.1. Condición de sección vacía 131
9.5.2. Condición de alta pérdida de carga 131
9.6. Malla de protección 131
9.7. Pieza de Transición 132
9.8. Difusor 133
9.9. Sección de salida 135
9.10. Ventilador 135
9.10.1. Cálculo del rendimiento del ventilador 136
9.10.2. Proceso iterativo para el dimensionamiento de las palas . . 140
9.10.3. Selección del número de palas 141
9.10.4. Valores característicos finales del ventilador 142
9.11. Resumen 143

10. Túnel de Viento: Diseño estructural **145**
10.1. Descripción general . . . 145
10.1.1. Criterios de dimensionamiento . . . 145
10.1.2. Cálculo de esfuerzos y deformaciones máximas aplicados a una viga de sección cónica . . . 146
10.1.3. Pandeo por criterio de Euler . . . 147
10.1.4. Términos y procedimiento a utilizar . . . 147
10.1.5. Unión entre componentes . . . 148
10.2. Acondicionador de flujo . . . 148
10.2.1. Sección del Honeycomb . . . 149
10.2.2. Secciones de mallas . . . 151
10.2.3. Sujeción de las mallas . . . 152
10.3. Contracción . . . 153
10.3.1. Dimensionamiento de tablas por deflexión . . . 153
10.4. Cálculo estructural de la sección de trabajo . . . 154
10.4.1. Condición de sección cargada con personas . . . 154
10.4.2. Condición de depresión . . . 154
10.4.3. Resultados . . . 154
10.4.4. Encastre entre tablas . . . 157
10.5. Pieza de transición . . . 157
10.6. Difusor . . . 158
10.7. Dimensionamiento de columnas . . . 158
10.8. Dimensionamiento de soportes . . . 160
10.9. Soportes del motor . . . 162
10.9.1. Dimensionamiento por esfuerzos . . . 163
10.9.1.1. Caso 1 . . . 163
10.9.1.2. Caso 2 . . . 164
10.9.2. Dimensionamiento por pandeo . . . 165
10.10 Dimensionamiento de la carcasa . . . 166
10.10.1 Refuerzos transversales . . . 169
10.11 Columnas y soportes para la carcasa . . . 170
10.11.1 Dimensionamiento de soportes . . . 170
10.11.2 Dimensionamiento de columnas . . . 170
10.12 Dimensionamiento del alma de los álabes . . . 172
10.12.1 Dimensionamiento por fuerzas de Sustentación y de Arrastre 172
10.12.2 Dimensionamiento por fuerza Centrífuga . . . 177
10.13 Sujeción de álabes . . . 179
10.14 Consideraciones sobre el análisis de fatiga . . . 181
10.15 Análisis de emisiones acústicas . . . 181
10.15.1 Emisiones de motor y ventilador . . . 183
10.15.2 Emisión de vórtices en los soportes del motor . . . 184
10.16 Análisis de vibraciones . . . 186
10.16.1 Barras de soporte del motor . . . 187
10.16.2 Carcasa del ventilador . . . 188
10.16.3 Eje del rotor . . . 190

10.16.4. Tablas y ventanas en la sección de trabajo 191
10.17 Modificaciones sugeridas del diseño 191
10.17.1. Modificaciones estructurales 191
10.17.2. Incorporación del sistema de adquisición 193

11. Conclusiones del proyecto 195
11.1. Herramienta de visualización 195
11.2. Túnel de viento 197
11.3. Comentarios generales sobre gestión de proyecto 199

A. Estudio Capa Límite 201
A.1. Capa límite con túnel a 30 Hz 201
A.1.1. Obtención de altura de capa límite 201
A.1.2. Perfil de velocidades adimensionado 201
A.2. Capa límite con túnel a 4 Hz 202
A.2.1. Extracción de perfil de velocidades a partir del campo de velocidades 203
A.2.2. Resultados 203

B. Materiales 207
B.1. Materiales con los que cuenta el IMFIA 207
B.1.1. Motor eléctrico 207
B.1.2. Variador de frecuencia 207
B.1.3. Honeycomb 207
B.1.4. Balanza aerodinámica 208
B.2. Materiales disponibles en plaza 209
B.2.1. Maderas de construcción 209
B.2.2. Ventanas de Policarbonato 210
B.2.3. Placas de acero 210
B.2.4. Mallas 210

C. Planos 211

Referencias 219

Índice de tablas 224

Índice de figuras 228

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Descripción del Proyecto

En el marco de las carreras de Ingeniería Industrial Mecánica e Ingeniería Eléctrica, se desarrolla este proyecto de final de carrera. El objetivo planteado es, por una parte, el diseño de un túnel de viento que permita la calibración de anemómetros y ensayos de perfiles aerodinámicos, y, por otro lado, que posea una herramienta de procesamiento de imágenes para analizar, de forma cualitativa, movimientos de trazador durante ensayos de visualización. Este proyecto es de interés para el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) para emplearse como herramienta para el laboratorio de Eolodinámica.

El proyecto se desarrolla en caminos paralelos entre el diseño de la herramienta de visualización y el diseño del túnel de viento. El diagrama del proyecto se presenta en la figura 1.1. Con azul se representa la parte del diseño del túnel y con verde el desarrollo de la herramienta de visualización. Al finalizar ambos diseños, se realizan recomendaciones para facilitar el uso de la herramienta de visualización en el túnel de viento.

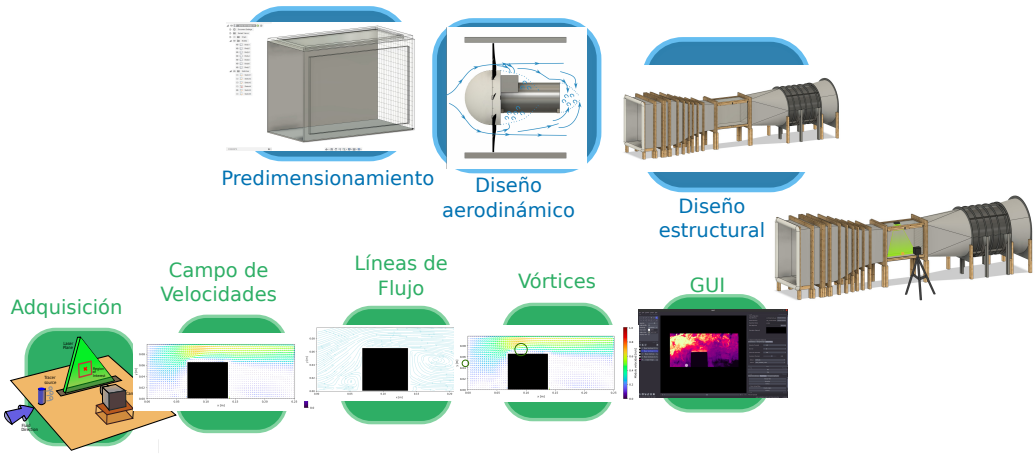


Figura 1.1: Diagrama de desarrollo del proyecto

1.1. Herramienta de visualización

En el laboratorio de Eolodinámica se han realizado numerosos estudios aerodinámicos, estos presentan generalmente un enfoque cualitativo y otro cuantitativo. La visualización pretende de forma cualitativa obtener información acerca del comportamiento del flujo, sus patrones principales y las zonas de interés en realizar una medición. La parte cuantitativa es la etapa en la cual se realizan mediciones, muchas veces basándose en la comprensión del flujo brindada por la visualización.

El procedimiento de visualización empleado en la actualidad, requiere de al menos dos personas. Una debe sembrar la zona de interés con trazador, la cual es iluminada por un plano láser de 500 mW; mientras que la otra persona adquiere un video con una cámara VHS modelo Handycam HDR-FX7. La filmación tiene la finalidad de ser analizada visualmente por los mismos investigadores. El procedimiento de adquisición no se realiza de manera exhaustiva, dependiendo del caso es la zona o posición de la cámara que se utiliza, incluso como no se realiza un procesamiento de imagen, es posible mover la cámara durante las filmaciones, si esto ayuda la comprensión del flujo. Este procedimiento es sencillo y versátil a la hora de adquirir imágenes, sin embargo, requiere mucho tiempo de análisis de los videos para obtener información de patrones que se desarrollan en el flujo. Estos patrones pueden ser: recirculaciones, desprendimiento de capa límite, tamaño y frecuencia de aparición de vórtices, estelas detrás de objetos, entre otras. A pedido del IMFIA, se desarrolla una herramienta informática que acelere el proceso de análisis cualitativo de imágenes.

Dada la naturaleza de la visualización, se consideran algunos métodos de procesamiento de imágenes existentes en el mercado. Entre ellos se destacan velocimetría por imágenes de partículas(en sus siglas en inglés PIV), PIV-3D, Holografía de imágenes, y sus variantes [1]. En un principio se estudia el método PIV, para el cual es necesario adquirir mediante un trazador particulado y un aspersor de partículas. Uno de los beneficios que presenta este método es que existen varios software libres, como: `OpenPIV` [2], `PIVLab` [3], entre otros; que resuelven el campo de velocidades para las imágenes dadas, además es viable acceder a varios datos artificiales y experimentales para validar la herramienta. Sin embargo, los métodos anteriores implican una inversión importante, por lo que se opta por desarrollar una herramienta que utilice el trazador con el que cuenta el instituto.

En el marco del proyecto, se genera la técnica denominada *Vapor Image Visualization* (VIV por sus siglas en inglés), cuyo diagrama se observa en la figura 1.2. En la cual se diferencian tres tipos de flujo: instantáneo, medio y media móvil. El producto entregado consiste en un software que genera el campo de velocidades instantáneo, a partir de imágenes de un flujo sembrado con trazador continuo[1]. Para el procesamiento de las imágenes se emplea un algoritmo de flujo óptico. Realizando operaciones con el campo de velocidad instantáneo obtenido, es posible obtener un valor medio móvil del campo de velocidad y el campo de velocidad medio, dónde solamente el último fue posible validar. Además, se determinan las

[1] A diferencia del trazador particulado, empleado en PIV, cuyo procesamiento es capaz de diferenciar las partículas moviéndose con el flujo

líneas de flujo para cada campo de velocidad y se habilita la detección de vórtices, para el caso de un flujo medio o la media móvil del mismo.

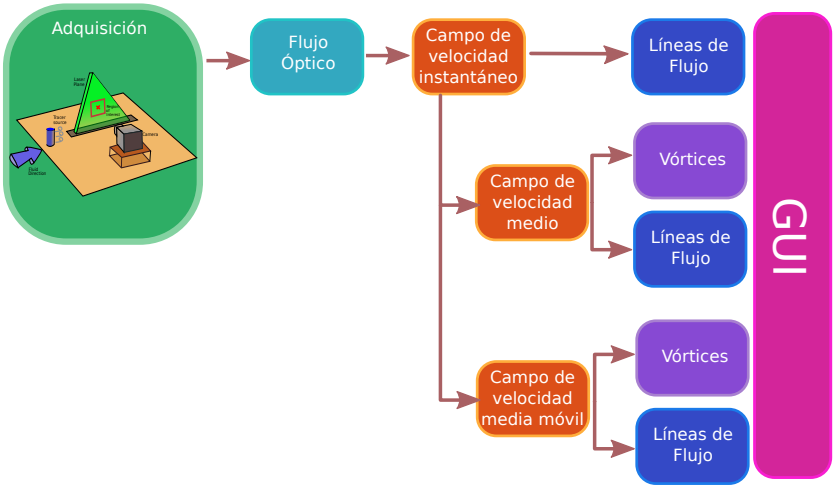


Figura 1.2: Diagrama de bloque de herramienta de visualización.

1.1.1. Adquisición

Para el desarrollo de la herramienta, se estudia la adquisición de imágenes utilizando el trazador continuo que se cuenta en el laboratorio, con la cámara Photron FASTCAM Mini UX100 y un láser planar de 1 W. Desde el momento inicial se define que la cámara debe permanecer fija durante la filmación, sin embargo, la posición de los equipos, el reflejo del láser con los objetos del entorno y la necesidad de ajustar la escala de la imagen a valores métricos, son requisitos que fueron surgiendo en el desarrollo del proyecto, logrando obtener requerimientos específicos de adquisición mencionados en el capítulo 3.

En la figura 1.3, se observa un ejemplo de adquisición del flujo alrededor de un objeto con sección cuadrada, en este caso se adquirió un total de 77 s. En (a) se observan los principales elementos de la adquisición, luego en (b) se observa el humo siendo iluminado por el plano láser y en (c) desde perspectiva de la cámara.

1.1.2. Procesamiento de imágenes

Se utiliza el algoritmo de Gunnar Farnebäck para flujo óptico [4]. Este se emplea para diferentes fines en Visión Artificial, sin embargo, no existe bibliografía que aplique el mismo para medir la velocidad aparente de un flujo con trazador continuo. El algoritmo identifica el movimiento del flujo siguiendo los patrones en la iluminación de trazador y obteniendo resultados que capturan el comportamiento físico del flujo, ver sección 4.3.

En la figura 1.4 se observa el campo de velocidad instantáneo a $t = 0{,}2\,s$ del flujo en torno a un obstáculo con sección rectangular. Para el procesamiento del

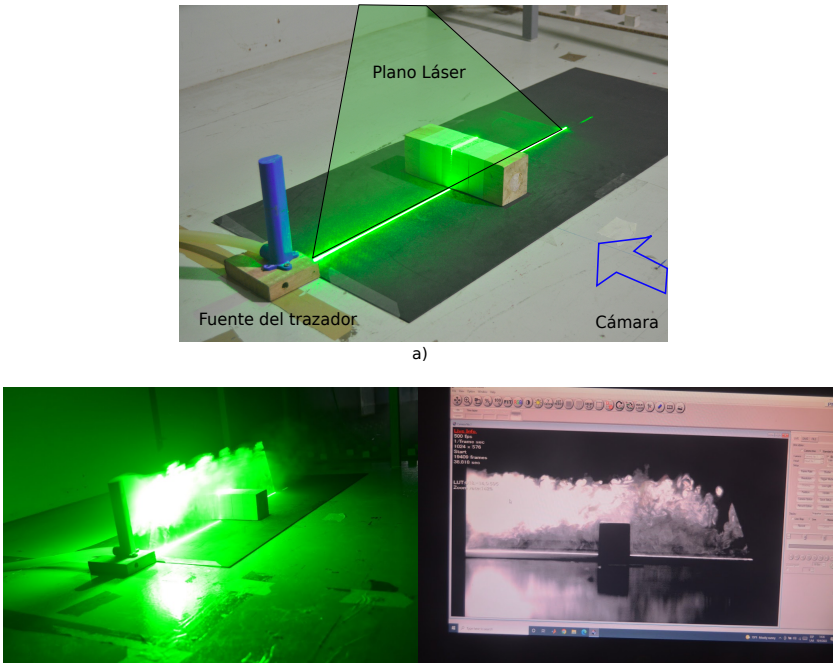


Figura 1.3: Ejemplo de adquisición de un flujo en torno a un obstáculo con sección rectangular. Describiendo en a) una imagen del experimento indicando componentes, b)se observa el humo iluminado por el plano láser y en c) la imagen adquirida por la cámara.

mismo se utiliza una máscara para evitar realizar cálculos en zonas dónde hay objetos inmóviles.

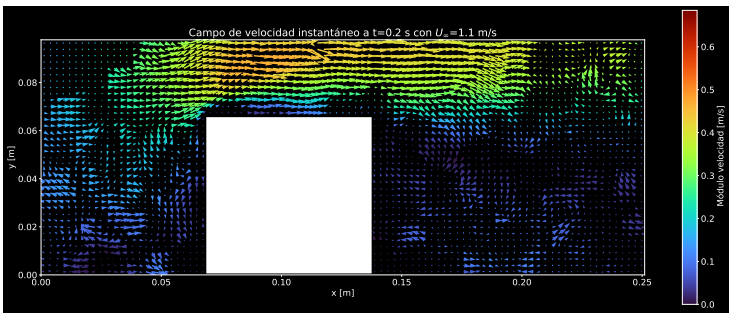


Figura 1.4: Campo de velocidad instantáneo a $t = 0{,}2\ s$.

En casos donde el flujo es estadísticamente estacionario, es de interés, entre otras magnitudes, saber el campo de velocidad medio. Para obtenerlo, se promedian temporalmente todos los campos de velocidades instantáneos. En la figura 1.5 puede observarse el campo de velocidad media, del experimento de la figura 1.4, el mismo se genera promediando todos campos de velocidades en los $77\ s$ de adquisición.

En flujos donde se repiten patrones a una frecuencia dada, o en aquellos donde se quieren eliminar fluctuaciones turbulentas de alta frecuencia, es práctica usual

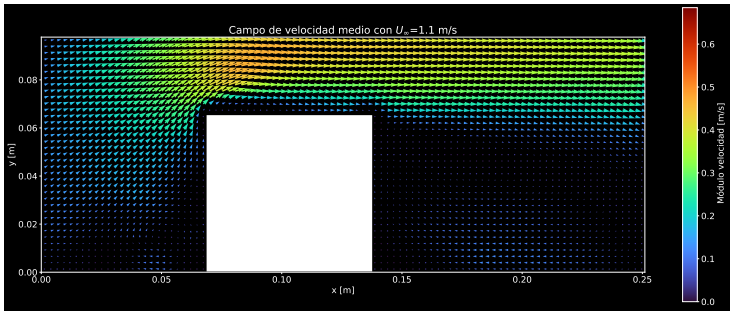


Figura 1.5: Ejemplo de campo de velocidades medio

realizar una media móvil en el campo de velocidades. Para ello, es necesario definir un tamaño de ventana temporal y un paso de incremento de dicha ventana; luego se promedian los campos de velocidades instantáneos contenidos en la ventana y se desplaza la misma, repitiendo este procedimiento hasta la última ventana válida. De esta forma es posible obtener varios campos de velocidades. En la imagen de la figura 1.6, se observa uno de ellos calculado considerando una ventana de 100 campos y un paso de 25, promediando los campos de velocidades obtenidos entre los tiempos 4,9 - 5,0 s.

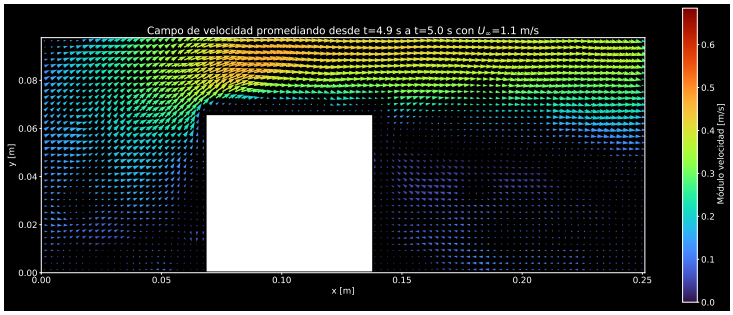


Figura 1.6: Campo de velocidad promediando los campos instantáneos obtenidos de promediando los campo de velocidades obtenidos entre los tiempos 4,9 - 5,0 s.

Para el campo de velocidades escogido (instantáneo, media móvil, o flujo medio), es posible dibujar las líneas de flujo y detectar los vórtices presentes en el flujo a partir de la incorporación de software disponibles para Python. En el caso de las líneas de flujo, se usa la función `streamplot` de la librería `matplotlib`, que dibuja las líneas de flujo de un campo vectorial dado. Un ejemplo de implementación, se muestra en la figura 1.7, donde se dibujan las líneas de flujo calculadas para el campo de velocidades de la figura 1.5.

En el caso de la detección de vórtices, se hace uso de la función `VortexFitting` [5]. La detección se basa en analizar la física detrás del campo de velocidades, en caso de que esté presente un vórtice circular, aproximado al modelo de Lamb Oseen, ver capítulo 6. Para realizar la detección de un vórtice no estacionario, es decir, aquel que se mueve en el flujo, es necesario hacer una media móvil en el campo de velocidades. En caso de ser un vórtice estacionario, basta realizar el

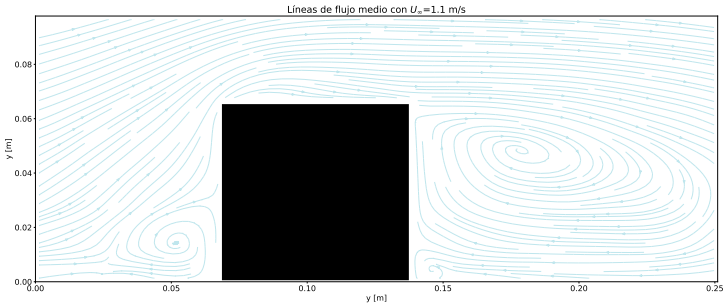


Figura 1.7: Ejemplo de dibujo de líneas de flujo

análisis con el campo medio de velocidades como muestra la figura 1.8.

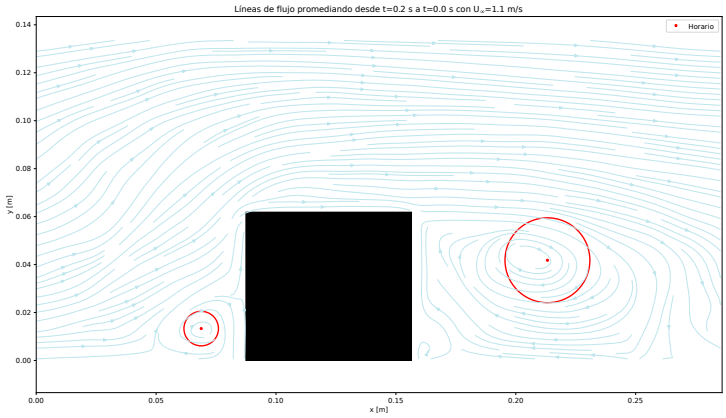


Figura 1.8: Ejemplo de detección de vórtice estacionario

La herramienta VIV, queda definida mediante su etapa de adquisición y procesamiento. La misma presenta la limitante que es necesario tener la cámara en una posición fija durante la adquisición de imágenes, reduciendo la practicidad comparada a métodos manuales. En resumen, esta solución consiste en una herramienta complementaria para el análisis de visualización y el laboratorio en general, mientras que para algunos flujos complejos sigue siendo de utilidad el método habitual de visualización.

1.1.3. Análisis de la herramienta

Consiste en la validación de la herramienta de obtención de campos de velocidades, dibujo de líneas de flujo y detección de vórtices.

Para estudiar los resultados obtenidos en el campo de velocidades, se procede a analizar las características del flujo medio en situaciones conocidas y comparar características adimensionadas, ver capítulo 4.

Las líneas de flujo corresponden a la solución pedida por el laboratorio, en las cuales es posible visualizar los patrones de movimiento formados por el flujo. Una validación cualitativa se realiza analizando visualmente los patrones, al igual que

se hace en la actualidad, y se verifica la correcta detección de los mismos por la herramienta.

Por último, el análisis de vórtices es una tarea compleja, dado que se cuenta con pocos casos de vórtices estacionarios. El software empleado está validado por los creadores utilizando campos de velocidades obtenidos a partir de simulaciones numéricas. En este trabajo se lo emplea en la detección de un vórtice estacionario ensayado en las instalaciones del túnel de viento.

Esta herramienta presenta algunas limitantes, principalmente la dificultad de procesar datos a elevadas velocidades del flujo. Esta viene dada mayoritariamente por los equipos existentes, como la iluminación y caudal máximo de trazador. Los experimentos que se puede realizar en el túnel de viento a estas velocidades presentan gran complejidad de ser comparados con experimentos disponibles en bibliografía. Por lo tanto, para una siguiente instancia se plantea calcular la incertidumbre de la herramienta a partir de mediciones con anemómetros calibrados a bajas velocidades.

1.1.4. Interfaz Gráfica

Para facilitar el uso de la herramienta se construye una interfaz gráfica, idealmente se pretendía realizar una única herramienta para la selección de la región de interés (ROI por sus siglas en inglés), procesamiento de VIV y visualización de resultados. Sin embargo, por cuestiones de compatibilidad con Python y tiempo, se decidió utilizar dos herramientas distintas. Primero, es necesario recortar el ROI utilizando un software de procesamiento de imágenes llamado Fiji [6], y deben guardarse en formato *tiff* como secuencia de imágenes. Finalmente, se realiza el procesamiento de imágenes con una interfaz gráfica desarrollada en Napari [7], que se diseña para condensar las funcionalidades, descritas anteriormente, para ofrecer mayor facilidad de trabajo, ver figura 1.9. Sin embargo, es posible hacer uso de los programas a partir de la consola, en caso de querer hacer un análisis de datos diferente al disponible en la interfaz.

1.2. Diseño de túnel de viento

El diseño requerido por el IMFIA, consiste en un túnel de viento de menores dimensiones que el ya existente en el laboratorio[2]. La motivación de su construcción se debe a la tendencia ascendente en pedidos de calibración de anemómetros en los últimos años. Por lo tanto, surge la necesidad de poseer, en el futuro, otro túnel de menores dimensiones para cumplir con esta tarea y poder tener disponible el túnel de viento actual para ensayos de mayor porte (como es el caso de modelos a escala de edificios). Por otra parte, es de interés que se lo pueda emplear para realizar ensayos de perfiles aerodinámicos a elevados números de Reynolds, por lo que se debe tomar en cuenta esta condición para el diseño. Estos requisitos se resumen en la tabla 1.1.

[2]Túnel de viento del IMFIA

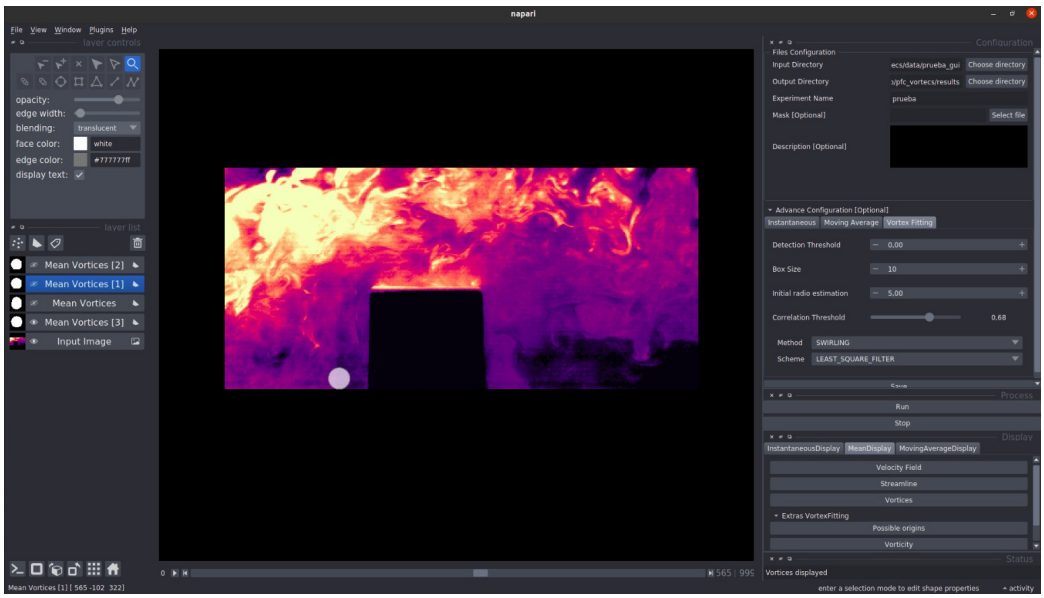


Figura 1.9: Interfaz gráfica desarrollada con Napari

Tabla 1.1: Requisitos de diseño

Anemómetros	Sección mínima $[m^2]$	1×1
	Intensidad de turbulencia admisible	$2\,\%$
	No-uniformidad admisible	$0,2\,\%$
	Velocidades de calibración $[m/s]$	4,0 - 16
Perfiles aerodinámicos	Factor de bloqueo admisible	$5\,\%$
	Reynolds de ensayo	10^6

Actualmente el laboratorio cuenta con un motor eléctrico y variador de frecuencia que fueron adquiridos con el fin de utilizarlos en un túnel de viento a diseñar. Por lo tanto, es requisito adicional considerar la utilización de estos equipos en el diseño. Sus especificaciones se detallan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Especificaciones del motor eléctrico y variador de frecuencia

Motor eléctrico	Modelo	W22-IE1
	Voltaje $[V]$	400
	Frecuencia $[Hz]$	50
	P_{nom}[kW]	45
	N $[rpm]$	985
	η_e	0,922
Variador de frecuencia	Voltaje $[V]$	380-400
	Frecuencia $[Hz]$	50
	P_{nom}[kW]	45

1.2.1. Elección de tipo de túnel

El diseño consiste en un túnel de viento subsónico[3], ya que no son necesarias elevadas velocidades para su propósito. A los efectos de definir las dimensiones generales del diseño, se decide emplear la configuración de circuito abierto. Esta implica una mayor simplicidad de diseño y reducidos costos de construcción. Se elige el tipo de sección de trabajo como cerrada, para minimizar las pérdidas de carga de la instalación. Esta configuración se muestra en la figura 1.10, además se indican en la misma, las partes que conforma el túnel de viento.

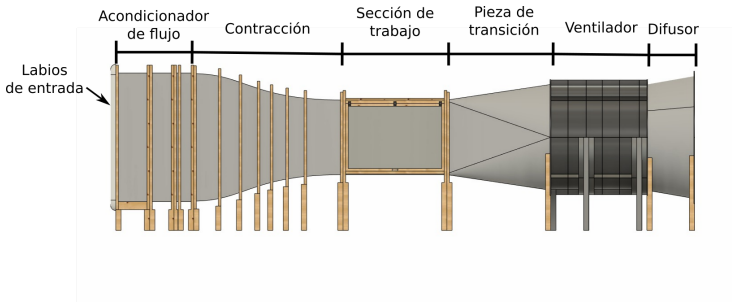


Figura 1.10: Descripción de elementos del túnel de viento.

Luego de conocer los elementos que componen el túnel de viento, se procede a diseñarlos. El método utilizado se divide en los capítulos de predimensionamiento (capítulo 8), diseño aerodinámico (capítulo 9) y diseño estructural (capítulo 10). En el primero se definen las dimensiones generales del túnel de viento. Estas dimensiones son refinadas y a partir de ellas se calcula el punto de funcionamiento nominal (capítulo 9). Finalmente, en el capítulo 10, se dimensionan los elementos involucrando la resistencia mecánica de los materiales, deformaciones, pandeo y vibraciones.

1.2.2. Sección de trabajo

La sección de trabajo es la zona más importante en un túnel de viento, dado que en ella se sitúan los modelos aerodinámicos a ensayar y todas las condiciones que se buscan generar en el túnel son para obtener el flujo apropiado en esta zona. Es por ello que es el primer elemento a diseñar, y se lo hace a partir de los requisitos de ensayos de perfiles aerodinámicos, respetando que la sección sea mayor a $1 \times 1\ m^2$. El método de dimensionamiento, consiste en maximizar el número de Reynolds alcanzado, variando el área de la sección de trabajo. El cálculo del Reynolds se realiza empleando un largo de cuerda del perfil que no exceda el factor de bloqueo admisible y considerando que el motor está trabajando en plena carga. A los efectos de determinar la velocidad de flujo, se estima un rendimiento del ventilador de

[3]Un túnel de viento se considera subsónico, si en su sección de trabajo se desarrollan flujos con números de Mach menores a $0,3$. Esta condición se respeta para velocidades que no superen los $100\ m/s$.

$0,75$ y una pérdida de carga de la instalación de coeficiente $k = 1$. El proceso de dimensionamiento se desarrolla en la sección 8.2.1.

El modelo 3D de la sección de trabajo puede apreciarse en la figura 1.11, donde se emplean dimensiones de $1 \times 1,4\ m^2$ en la sección de pasaje y $2\ m$ de longitud. Los materiales empleados para la construcción son tablas de MDF de 18 mm de espesor, y se agregan dos ventanas de policarbonato de igual espesor. La decisión de los materiales se detalla en la sección 10.4.

Figura 1.11: Diseño final de la sección de trabajo

1.2.3. Acondicionador de flujo

La intensidad de turbulencia obtenida en la sección de trabajo depende de la turbulencia del flujo entrante, el cual en principio es una incógnita. Para lograr establecer niveles admisibles de turbulencia, es necesario la incorporación de elementos reductores de turbulencia tal como lo son el Honeycomb y las mallas. El primero es capaz de eliminar vórtices de gran escala, dando lugar a altos niveles de turbulencia. En tanto, las mallas son implementadas para forzar el fenómeno de disipación turbulenta, mediante la sintonización de los vórtices del flujo incidente, con los vórtices generados por la misma malla. Este tema es tratado con mayor detalle en la sección 9.3 de diseño aerodinámico. Su modelo 3D se presenta en la figura 1.12, donde se muestra un recorte de las mallas y Honeycomb para identificar su posición en el elemento. En el diseño se incorporan labios de entrada, para reducir las pérdidas de carga en la entrada al acondicionador.

Figura 1.12: Diseño final del acondicionador de flujo

Estos elementos introducen elevadas pérdidas de carga, por lo que se vuelve necesario la incorporación de una contracción para reducir la velocidad de pasaje por estos, y así elevar el rendimiento de la instalación.

1.2.4. Contracción

Como fue mencionado en la sección anterior, este elemento se introduce para reducir la pérdida de carga impuesta por el acondicionador de flujo. Esta reducción se logra disminuyendo la velocidad de pasaje por medio del aumento del área de pasaje en la zona de acondicionamiento.

El análisis realizado en el capítulo 8, estima una relación de contracción de $N = 3$, es decir, es necesario que el área de pasaje en la contracción sea tres veces mayor que en la sección de trabajo. Mientras que su geometría se dimensiona en la sección 9.4, dado que debe realizar el cambio de sección de manera sutil para asegurar la uniformidad requerida para la calibración de anemómetros.

Luego de un análisis estructural en la sección 10.3, se definen tablas de MDF de 15 mm de espesor, las cuales deben ser curvadas.

El modelo 3D de la contracción y acondicionador de flujo se puede apreciar en la figura 1.13.

1.2.5. Pieza de transición

Debido a que la geometría de la sección de trabajo es rectangular y la del ventilador circular, se hace necesaria una pieza de transición. La diferencia de áreas entre ambos elementos implica una relación de difusión de $n_{pt} = 2,24$. Considerando un ángulo de apertura máximo de 15°, se obtiene un largo de 2 m. La estimación de las pérdidas de carga se las realiza modelando el elemento como difusor tronco-cónico en la sección 9.7. Dado que la construcción de este elemento

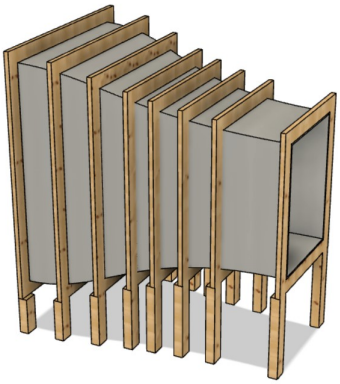


Figura 1.13: Diseño final de la contracción

es compleja, se decide por una geometría simplificada empleando secciones cónicas y triangulares, como se puede observar en el modelo 3D de la figura 1.14.

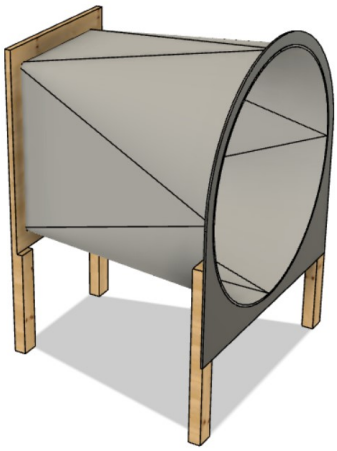


Figura 1.14: Diseño final de la pieza de transición

Este elemento también cumple el rol de reducir las velocidades de pasaje del flujo en la sección del ventilador, lo cual previene efectos de compresibilidad.

1.2.6. Difusor

El difusor se emplea para reducir la velocidad del flujo a la salida del ventilador y de esta forma disminuir las pérdidas de carga, en forma de energía cinética, a la salida. A partir de los análisis realizados en 8.2.2, se identifica la necesidad de una relación de difusión conjunta $n = 3$ entre la pieza de transición y difusor. Por lo tanto, se fija su relación de difusión en $n_{dif} = 1,35$.

1.2.7. Ventilador

Finalizando el diseño aerodinámico de los elementos, se obtiene una perdida de carga global de $k = 0,75$ para la instalación funcionando con la sección con la máxima obstrucción admisible. Este valor identifica la condición más exigente del ventilador, y, por lo tanto, se lo diseña para operar en este punto a máxima potencia. El diámetro del rotor se define en 2 m a partir del diagrama de Cordier. Este consiste en 8 palas de 1 m de longitud, diseñadas a partir de un perfil NACA 4412.

Respecto al dimensionamiento mecánico, este es el elemento más comprometido, debido a las esfuerzos sobre los álabes, el peso del motor sobre la estructura, vibraciones inducidas por el giro del motor, frecuencia de pasaje de álabes y emisión de vórtices por el pasaje del flujo en la estructura. En el capítulo 10 se realizan numerosos análisis a los componentes estructurales del ventilador. La versión final del ventilador se presenta en la figura 1.15, donde se muestra el motor soportado por caños de acero de 10 cm de diámetro y el rotor diseñado con el cubo (sin la nariz).

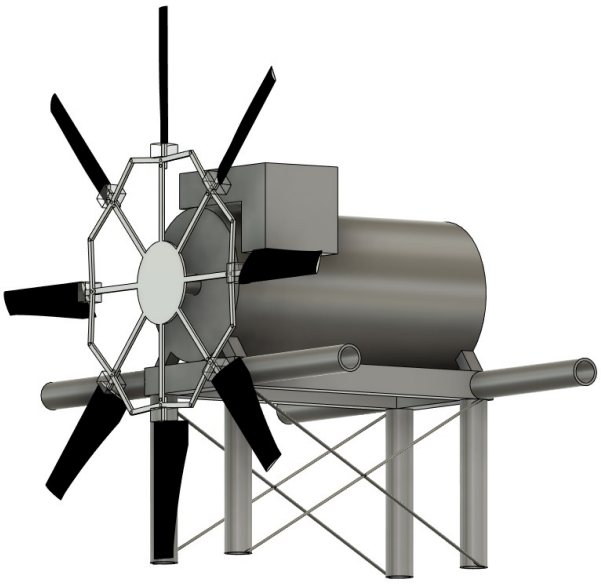


Figura 1.15: Diseño final del ventilador

1.2.8. Carcasa

Al tener que soportar el peso del ventilador, la carcasa requiere elevada inercia para evitar deformaciones o falla por fluencia del acero. El diseño realizado consiste en emplear láminas delgadas de acero de 3 mm para el cilindro, así como para una serie de refuerzos transversales y longitudinales. Estos últimos siendo dimensionados con el objetivo de aumentar la inercia de la estructura, sin necesidad de emplear láminas de mayor espesor, dificultando más la construcción.

Los soportes de la carcasa, a su vez, deben soportar $2,6$ toneladas y asegurar que la estructura no vuelque. Por ese motivo, se emplean 5 columnas de sección $W150 \times 13,0$, donde 4 descargan el peso de los soportes del ventilador, y la última brinda mayor estabilidad a la estructura. El modelo final se presenta en la figura 1.16.

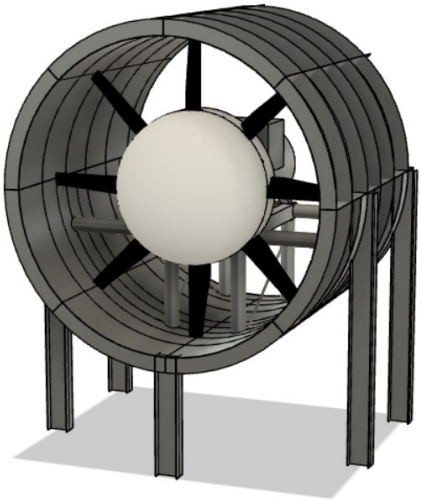


Figura 1.16: Diseño final del carcasa

1.2.9. Resumen del dimensionamiento

La estructura de cada uno de los elementos es dimensionado como una pieza independiente, donde las uniones se emplea un elastómero para evitar infiltraciones. Esta división tiene el objetivo de facilitar su ensamblado por partes, así como el mantenimiento, o el recambio de componentes. El modelo completo del túnel de viento se presenta en la figura 1.17.

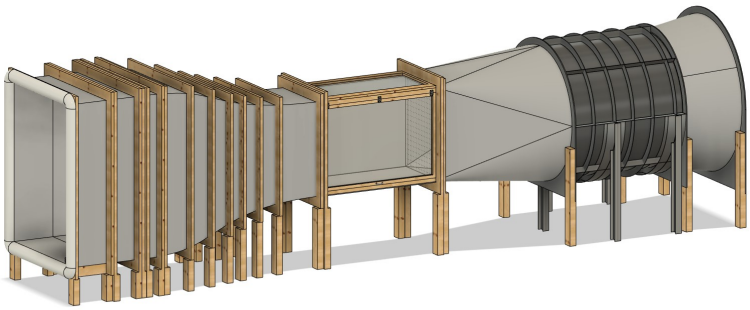


Figura 1.17: Modelo 3D del ensamblaje del túnel de viento

A partir del dimensionamiento realizado en los capítulos 8, 9 y 10, se obtienen los valores de funcionamiento nominal del túnel de viento, presentados en la tabla 1.3. Se observa que para perfiles con un largo de cuerda de 376 mm, es posible obtener números de Reynolds de 10^6.

Tabla 1.3: Punto de funcionamiento en condiciones nominales

Valores nominales	
Potencia mecánica $[HP]$	60
Velocidad de giro nominal [RPM]	985
Carga $[m]$	62,5
Caudal $[m^3/s]$	56,5
Velocidad $[m/s]$	40,4
Rendimiento rotor [%]	90
Pérdidas de carga	0,750
No-uniformidad [%]	0,2
Intensidad de turbulencia [%]	1,3
Largo total $[m]$	11,61
Límite de personas	2 (150kg)

Respecto a los costos de construcción, se estiman $U\$S$ 2,200 en madera, $U\$S$ 1,700 en acero y $U\$S$ 1,640 en otros materiales. Por otra parte, no se cuenta con una cotización de la mano de obra de carpintería y herrería. Sin embargo, el trabajo en acero puede realizarse en el taller de facultad. Como estimación de la mano de obra, se opta por suponer un monto similar al de los materiales involucrados, ascendiendo a $U\$S$ 3900. Finalmente, el costo de construcción de túnel de viento se presume que ronda los $U\$S$ 12,300 (considerando un margen de seguridad del 30 %).

Finalmente, el capítulo 10 presenta una sección en el cual se realizan modificaciones al túnel pertinentes a la compatibilidad con una herramienta de visualización. De esta manera, se establecen características necesarias, materiales nuevos, y equipos periféricos que propicien una correcta adquisición de imágenes y mayor versatilidad. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 1.18

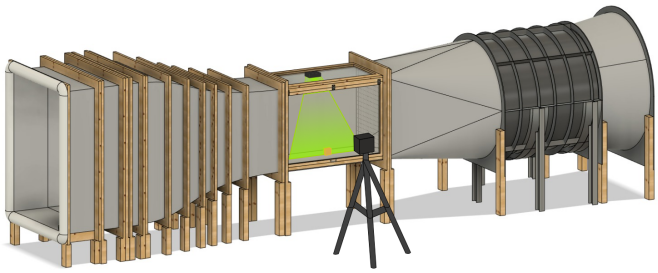


Figura 1.18: Acople de herramientas de visualización al diseño del túnel de viento

Capítulo 2

Conceptos Generales de Mecánica de los Fluidos

2.1. Cinemática

La cinemática es el área de mecánica con enfoque en las variables que varían solamente en tiempo y espacio, como son el desplazamiento, velocidad, aceleración y deformación. La información dispuesta en esta sección hace referencia a [8].

2.1.1. Coordenadas de Euler y Lagrange

Los dos sistemas de coordenadas para describir un flujo son: Euler y Lagrange. Las coordenadas de Lagrange se basan en describir la localización de una partícula en todo tiempo t, la cual en el instante inicial t_o se encontraba en la posición $\mathbf{x}_o$. Considerando $\mathbf{X}$ un campo escalar o vectorial cualquiera del flujo, puede ser expresada de la forma $\mathbf{X}(\mathbf{x}_o, t)$. Un ejemplo de $\mathbf{X}$ puede ser el campo escalar de temperaturas o el campo vectorial de velocidades en el fluido. La derivada temporal de $\mathbf{X}$ siguiendo una partícula, se define como derivada total o material. Para coordenadas de Lagrange, es igual a la derivada parcial respecto al tiempo:

$$\frac{d\mathbf{X}(\mathbf{x}_o, t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{X}(\mathbf{x}_o, t)}{\partial t} \tag{2.1}$$

Por otro lado, las coordenadas de Euler se concentran en las partículas que atraviesan un punto espacial $\mathbf{x}$. En este caso las variables del flujo se expresan de la forma $\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)$. Para este sistema de coordenadas, la derivada total de una magnitud $\mathbf{X}$ se expresa en la siguiente ecuación, donde $\mathbf{v}$ es el vector velocidad.

$$\frac{d\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{X}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{x}, t) \cdot \nabla \mathbf{X}(\mathbf{x}, t) \tag{2.2}$$

Esta derivada presenta dos términos principales. El primero evalúa la variación de una propiedad en un punto fijo del espacio (se lo denomina "derivada local"), mientras que el segundo término cuantifica como varía la propiedad con el cambio de posición de la partícula.

Si una partícula que se encontraba en el instante t_o en la posición $\mathbf{x}_o$, se encuentra en el instante t en la posición $\mathbf{x}$, entonces las dos coordenadas se relacionan mediante:

$$\frac{d\mathbf{X}(\mathbf{x}_o, t)}{dt} = \frac{d\mathbf{X}(\mathbf{x}, t)}{dt} \tag{2.3}$$

2.1.2. Líneas de flujo

Se define a las líneas de flujo como las curvas que son siempre tangentes a la dirección del campo de velocidades. Las líneas de flujo se definen analíticamente en la siguiente ecuación, donde $\mathbf{v} = (u, v, w)$, es el campo de velocidades.

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \tag{2.4}$$

Tomando $ds = (dx, dy, dz)$, se puede demostrar que, para cada instante de tiempo, las líneas de flujo son paralelas al campo de velocidades en cada punto.

2.2. Ecuaciones gobernantes

El movimiento isotérmico de un fluido es descrito a partir de las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento y la conservación de la masa. Para una *parcela de fluido*[1] de volumen diferencial, las ecuaciones de movimiento que satisfacen estas condiciones están expresadas en el siguiente sistema de ecuaciones. En este caso se agregan las propiedades de flujo incompresible y *fluido newtoniano*[2].

$$\nabla.\mathbf{v} = 0 \tag{2.5}$$

$$\rho_o \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\rho_o\, g\, \hat{\mathbf{k}} + \nabla.\mathbf{T} \tag{2.6}$$

$$\mathbf{T} = -p(\rho_o)\, \mathbf{I} + 2\mu\, \mathbf{D} \tag{2.7}$$

Donde ρ_o y μ son la densidad y viscosidad del fluido, $\mathbf{v}$ su campo de velocidades, $g\ \hat{\mathbf{k}}$ es la aceleración gravitatoria, $\mathbf{I}$ la matriz identidad, $\mathbf{T}$ el tensor de tensiones y $\mathbf{D}$ el tensor de deformaciones [8]. El primer tensor muestra las tensiones y esfuerzos internos presentes en el medio, y el segundo cuantifica la deformación que experimenta el fluido.

Se puede sustituir la expresión (2.7) en (2.6) y se obtiene la ecuación de Navier-Stokes para fluidos incompresibles (2.8) dado que $\mathbf{D}$ es una matriz simétrica con traza nula para un fluido incompresible[3].

$$\rho_o \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\rho_o\, g\, \hat{\mathbf{k}} - \nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} \tag{2.8}$$

[1] Parcela de fluido: Es una muy pequeña cantidad de fluido, identificable a lo largo de su historia dinámica mientras se mueve con el flujo.

[2] Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante.

[3] Si se desea profundizar en la demostración se recomienda [9]

Donde el primer término se atribuye a las fuerzas de masa, el segundo a las fuerzas de contacto y por último el término que considera los esfuerzos por viscosidad.

Esta ecuación es no lineal en la velocidad, debido a que el término de aceleración es la derivada total de la velocidad (2.9).

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \tag{2.9}$$

Es posible simplificar (2.8) si los efectos viscosos son despreciables, por ejemplo, lejos de las superficies, obteniéndose lo siguiente:

$$\rho_o \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\rho_o \, g \, \hat{\mathbf{k}} + -\nabla p \tag{2.10}$$

2.2.1. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensionado definido en (2.11) que relaciona una velocidad característica v, una longitud característica L_c y la viscosidad cinemática del fluido $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. Este número relaciona la escala de las fuerzas inerciales del flujo respecto a la escala de las fuerzas viscosas (2.12).

$$Re = \frac{v \, L_c}{\nu} \tag{2.11}$$

$$Re = \frac{Fuerzas\ Inerciales}{Fuerzas\ viscosas} \tag{2.12}$$

En flujos laminares las fuerzas viscosas son relevantes, por lo tanto, el valor de Re calculado es bajo. Mientras que en flujos turbulentos, las fuerzas inerciales son más relevantes, entonces son caracterizados por Re elevados. En particular, al aumentar el valor de Re en un flujo, se puede alcanzar la condición de flujo automodelado, esto quiere decir, que el efecto de Re deja de ser relevante.

2.3. Turbulencia

En la presente sección se darán nociones generales acerca de la turbulencia, resumida a partir de [8], con el fin de brindar mayor entendimiento a los posteriores análisis realizados para los campos de velocidades.

2.3.1. Características

Los flujos turbulentos se caracterizan por presentar todas las siguientes propiedades:

- Fluctuaciones de las variables dependientes. Tienden a ser irregulares, caóticas e impredecibles
- Proceso no lineal

- Mayor difusión de momento, calor y especies comparado a flujos laminares equivalentes.
- Elevados niveles de vorticidad fluctuante.
- Cumplen con las ecuaciones de Navier Stokes.

Para poder analizar estos flujos se descomponen las variables de interés $\mathbf{X}$ en dos componentes, la componente media y la componente fluctuante que cumple la siguiente propiedad, dado que los flujos turbulentos pueden ser modelados con comportamiento ergódico.

$$\mathbf{X} = \overline{\mathbf{X}} + \mathbf{X'} \tag{2.13}$$

$$\overline{\mathbf{X'}} = 0 \tag{2.14}$$

Donde la media se calcula mediante:

$$\overline{\mathbf{X}} = \lim_{t_0 \mapsto \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \mathbf{X}(t) dt \tag{2.15}$$

Para el caso de la velocidad, se define u_{rms} como una escala de velocidad turbulenta (2.16). Por otro lado, se define la intensidad de turbulencia como una medida de la turbulencia (2.17), donde σ_u es la desviación estándar de la velocidad.

$$u_{rms} = \overline{u^2}^{1/2} \tag{2.16}$$

$$I = \frac{\sigma_u}{u} \tag{2.17}$$

2.3.2. Escala de vorticidad

Para poder relevar completamente un flujo turbulento, existen dos escalas que son de interés: la escala integral de turbulencia l y la micro escala de Kolmogorov η. Ambas escalas representan el orden de magnitud del diámetro de los vórtices mayores y menores, a su vez, traen asociadas una frecuencia de aparición que es de interés conocer para el relevamiento.

La escala integral de turbulencia, es la escala de los vórtices de mayor tamaño presentes en el flujo, los cuales reciben energía del flujo medio (componente estacionaria del campo de velocidades). Los vórtices presentes en esta escala, brindan información de las fluctuaciones de menor frecuencia en el campo de velocidades.

Por otro lado, microescala de Kolmogorov, es la escala de los vórtices más pequeños, los cuales disipan la energía del flujo mediante la disipación viscosa.

Estas magnitudes brindan información de las escalas máximas y mínimas que se pueden encontrar dentro de un flujo turbulento. Por lo general, estas escalas difieren en varios órdenes de magnitud y, en muchos casos, es de interés solamente una fracción o un rango de vórtices.

2.3.3. Vórtice de Rankine

Vórtices reales presentan un núcleo que gira aproximadamente como un cuerpo sólido, mientras que su campo lejano lo hace de forma irrotacional. Una forma de modelarlo es como la conjunción de ambos giros, un vórtice con estas características es llamado un vórtice de Rankine, donde el campo de velocidades está descrito en coordenadas polares:

$$\begin{cases} u_\theta &= \omega_o\, r \quad si\ r \leq R \\ u_\theta &= \frac{\omega_o\, R^2}{r} \quad si\ r > R \end{cases} \tag{2.18}$$

donde u_θ es la velocidad puntual de rotación en coordenadas cilíndricas, ω_o es la velocidad de rotación de cuerpo rígido del núcleo del vórtice, R es el radio del núcleo y r es la distancia radial desde el centro del vórtice.

2.4. Capa límite

2.4.1. Descripción cualitativa

Durante el escurrimiento de un fluido viscoso, la capa límite es una región formada debido a la condición de adherencia (velocidad nula) del fluido sobre las superficies con las que entra en contacto. Dentro de dicha zona, las fuerzas viscosas tienen órdenes de magnitud similar al de las fuerzas inerciales y provocan grandes variaciones de velocidades en distancias muy pequeñas (principalmente sobre la dirección transversal a la superficie) [8], ver figura 2.1.

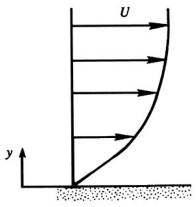


Figura 2.1: Distribución de velocidades características. [8]

El espesor de la capa límite δ, es mucho menor que la longitud característica del objeto en el que se produce. Entre otras definiciones de esta magnitud, se utiliza la del espesor δ_{99}, de ahora en más se tomará esta definición como δ. Esta establece la altura de la capa límite, como la altura a la cual el gradiente de velocidades es despreciable, y se parece al 99 % de U_∞, es decir, la velocidad del flujo alejado de la capa límite en condiciones de uniformidad[4].

$$\delta \;=\; \{y \;/\; u(x,y) \;=\; 0{,}99\, U_\infty\} \tag{2.19}$$

[4]Video explicativo sobre la altura de la capa limite

El orden de magnitud de la altura de la capa límite laminar y turbulenta respectivamente, se muestran a continuación:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu L}{U_\infty}} \tag{2.20}$$

$$\delta \sim \left(\frac{\nu L}{U_\infty}\right)^{1/5} \tag{2.21}$$

Donde L es una distancia característica definida para cada flujo y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

2.4.2. Capa límite en una placa plana

En el caso de una capa límite desarrollándose sobre una placa plana, se tiene un flujo libre a una velocidad uniforme U_∞ que incide sobre el borde de la placa plana dispuesta en el mismo sentido del flujo, ver figura 2.2.

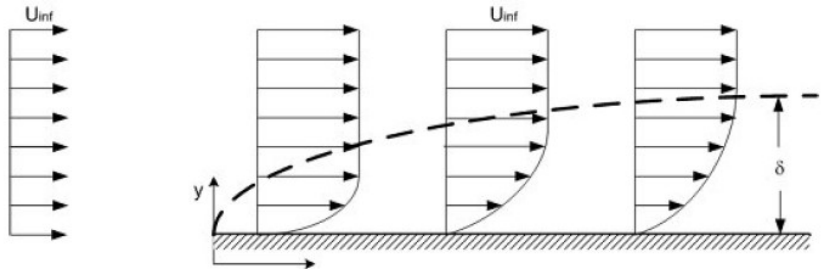


Figura 2.2: Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana. [8]

Se define el número de Reynolds asociado a este flujo como Re_x:

$$Re_x = \frac{U_\infty\, x}{\nu} \tag{2.22}$$

Donde el subíndice en Re_x índica que se toma la distancia característica del flujo como x, la distancia medida desde el borde de incidencia del flujo sobre la placa plana hasta el punto en cuestión.

El régimen del flujo en el interior de la capa límite es laminar hasta alcanzar valores críticos de $Re_{cr} = 10^6$, luego del cual el régimen del flujo se transforma en turbulento.

Las diferentes relaciones para las magnitudes involucradas en la capa límite turbulenta se ven expresadas en la figura 2.3.

Dado el mismo experimento a dos velocidades U_∞ distintas (y por ende distintos δ), los perfiles de velocidades adimensionados son iguales. Para adimensionarlos se considera el cambio de variable y/δ, y u/U_∞.

Por otro lado, a partir de (2.20) y (2.21) surgen relaciones teóricas para los valores de U_∞ y δ, detalladas en las siguientes ecuaciones, para capa límite laminar y turbulenta respectivamente.

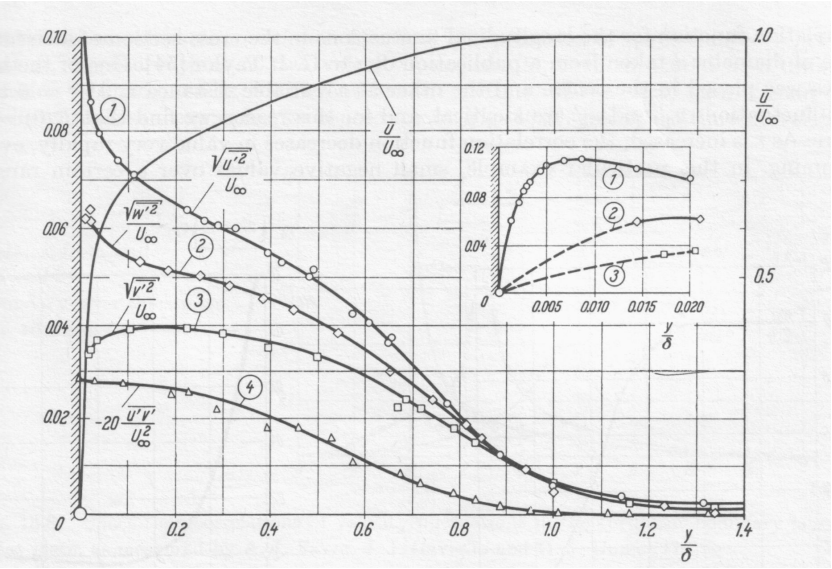


Figura 2.3: Componentes de la velocidad dentro de la capa límite. [10]

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} \sim \left(\frac{U_{\infty_2}}{U_{\infty_1}}\right)^{1/2} \tag{2.23}$$

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} \sim \left(\frac{U_{\infty_2}}{U_{\infty_1}}\right)^{1/5} \tag{2.24}$$

Donde los subíndices 1 y 2 diferencian las magnitudes de δ y U_∞ de cada experimento.

2.4.3. Desprendimiento de capa límite

El desprendimiento de capa límite es un fenómeno común que puede ocurrir cuando existen una desaceleración del flujo. Un ejemplo de desprendimiento de la capa límite puede verse en la figura 2.4. Esta región se caracteriza por presentar flujo turbulento, y se observa en la parte inferior al flujo ordenado (por encima del límite blanco de la geometría).

Una de las propiedades de la capa límite, es que copia la presión del flujo libre. El fenómeno de desprendimiento ocurre al existir gradientes adversos de presiones en el flujo. De esta forma, la geometría de las superficies presentan gran relevancia en el fenómeno, ocurriendo cuando se tienen cambios de direcciones, en especial cuando las mismas son de forma abrupta.

Analíticamente, en un flujo que presenta gradientes adversos de presiones ($\frac{dp}{dx} > 0$), se tiene un punto de inflexión en el perfil de velocidades, mientras que el punto de desprendimiento se da cuando $(\frac{du}{dy})_{pared} = 0$. En la figura 2.5 se detalla los aspectos mencionados sobre el fenómeno de desprendimiento de la capa límite[5].

[5]Video explicativo sobre el desprendimiento de la capa limite

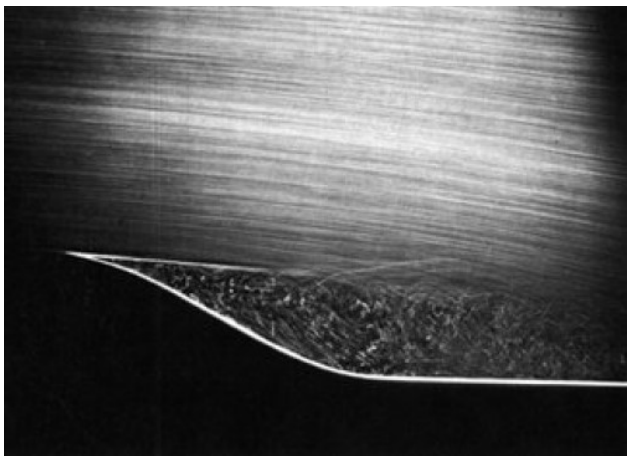


Figura 2.4: Desprendimiento de capa límite. [8]

El punto S señala el sitio donde se da el desprendimiento de la capa límite e I el punto de inflexión del perfil de velocidades para la sección que contiene a S.

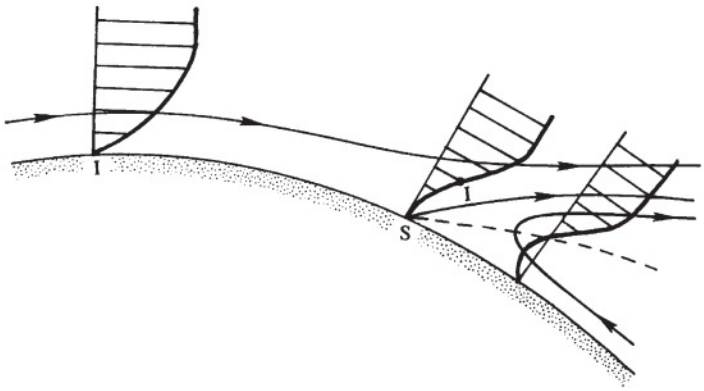


Figura 2.5: Líneas de flujo del desprendimiento de la capa límite. [8]

Al desprenderse la capa límite, se genera una estela turbulenta aguas abajo, caracterizada por tener esencialmente la misma presión que el punto de desprendimiento y elevada mezcla.

Capítulo 3

Sistema de adquisición

3.1. Introducción

Observando un fluido, como por ejemplo aire, muchas veces no es posible identificar patrones o direcciones de movimiento debido a la falta de contraste presente en el mismo. Para poder visualizarlo, es necesario disponer de un trazador, es decir, otro fluido cuyas propiedades físicas no difieran mucho del fluido principal, y que se moverán como si fueran un mismo fluido. Además, cumplirá la función de propiciar el contraste necesario para lograr detectar los patrones de su movimiento.

En la figura 3.1, se observa una adquisición realizada al flujo en torno al modelo de un auto.

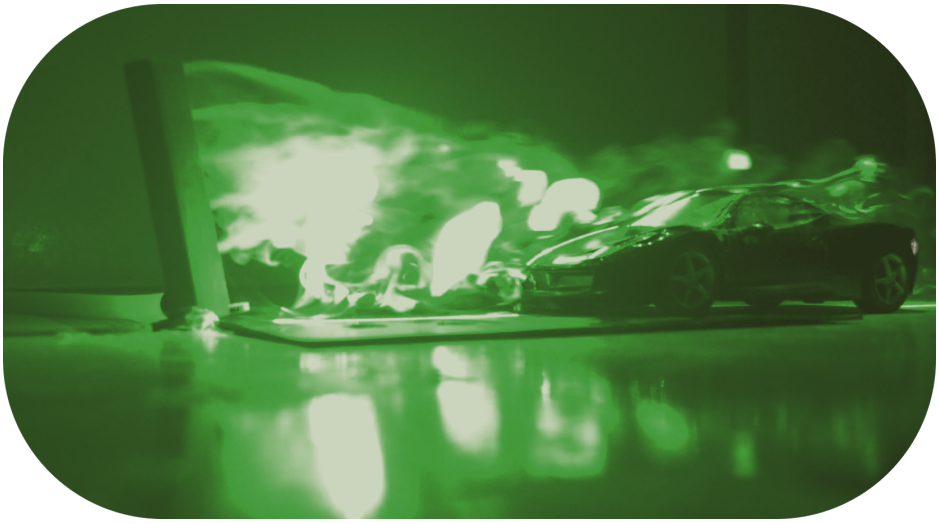


Figura 3.1: Ejemplo de una adquisición realizada.

3.2. Equipos empleados en la adquisición

Para poder visualizar el movimiento del fluido, es necesario disponer de otros equipos que permitan la generación de trazador, su iluminación y posterior filmación. Los componentes de adquisición son: el trazador, la máquina de humo, cámara y plano láser, los mismos se observan en la figura 3.2.

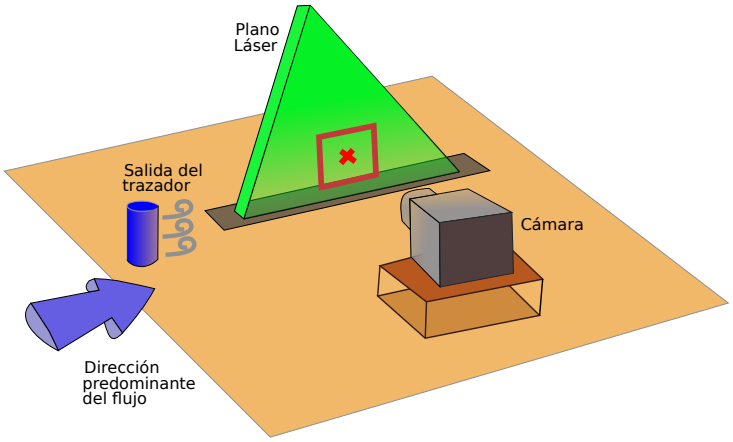
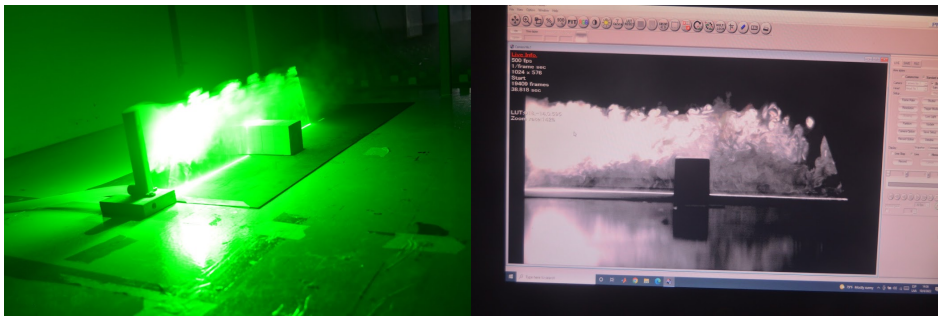


Figura 3.2: Diagrama general de la adquisición

En la figura 3.3 se observa la adquisición de un flujo en torno a un obstáculo de sección rectangular, en la imagen de la izquierda se puede observar el flujo de trazador iluminado por el plano láser. Mientras que en la imagen de la derecha, se observa el sistema desde la perspectiva de la cámara por medio de su programa.



a) b)

Figura 3.3: Ejemplo de adquisición de un flujo en torno a un obstáculo con sección rectangular. En la figura a) se observan componentes de la adquisición y en b) la imagen adquirida por la cámara.

3.2.1. Trazador

Uno de los fluidos más empleados como trazador para aire, es el vapor de propilenglicol $C_3H_8O_2$. Este consiste en una mezcla sobresaturada a temperatura ambiente, es decir, tiene suspendidas microgotículas líquidas que son arrastradas con el movimiento del aire y reflejan la luz incidente. Dado que se quiere ver un flujo bidimensional, es necesario distribuir el trazador lo más posible en una forma planar. Para ello se diseña el aspersor mostrado en la figura 3.4.

Figura 3.4: Aspersor de trazador

3.2.2. Máquina de humo

La máquina de humo se encarga de generar la cantidad necesaria de vapor de propilenglicol para la visualización, para este proyecto se utiliza el equipo existente en el laboratorio. Esta emplea una bomba de $12V$ que succiona el propilenglicol líquido de un recipiente y lo hace pasar por una resistencia eléctrica. A este vapor se le inyecta con aire a una presión impuesta por un compresor y se hace pasar esta mezcla por un intercambiador de calor, el esquema de la máquina de humo es mostrado en la figura 3.5.

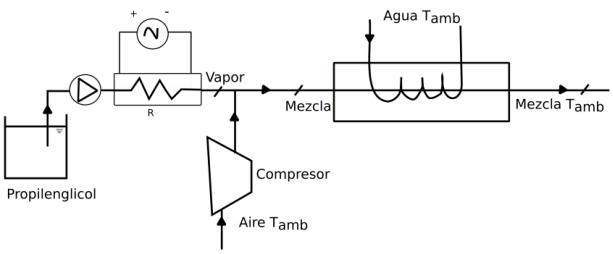


Figura 3.5: Esquema de la máquina de humo

La función que cumple la resistencia eléctrica es la de evaporar el propilenglicol, mientras que el intercambiador usa agua a temperatura ambiente para llevar

la temperatura de la mezcla de vapor y aire a la misma que la del flujo que se quiere visualizar. Este acondicionamiento hace que el trazador pueda acompañar al flujo existente sin introducir fenómenos de movimientos convectivos por diferencia de temperatura. La cantidad de vapor liberada es regulada mediante dos potenciómetros, éstos controlan el caudal de propilenglicol movido por la bomba y el caudal de aire inyectado por el compresor.

3.2.3. Cámara de alta velocidad

Para la adquisición es conveniente contar con una cámara capaz de grabar con alta definición y a varios cuadros por segundo (por sus siglas en inglés, FPS). Para ello se cuenta con la cámara Photron FASTCAM Mini UX100 que es capaz de grabar a 4000 FPS con una resolución de 1280x1024 (por más información referirse a [11]).

Las variables más relevantes que impone el uso de la cámara son los parámetros de resolución: tamaño de imagen y FPS; y los parámetros de la lente: foco, apertura y zoom.

Los parámetros de resolución permiten adquirir con mayor definición tanto espacial como temporal. Sin embargo, se tiene la limitante que la cámara adquiere los datos directamente a su memoria interna de 12 Gb. Por lo tanto, la contrapartida de elegir un tamaño de imagen grande es que cada imagen ocupa más espacio en la memoria. Mientras que elegir valores mayores de FPS implica que la memoria interna se completa más rápido. Entonces, los parámetros de resolución condicionan un tiempo de adquisición máximo.

La elección de los parámetros de resolución afecta directamente el relevamiento de las características del flujo, si este fuese turbulento (ver sección 2.3.2). Por un lado, al limitar el tiempo máximo de adquisición, puede no apreciarse fenómenos turbulentos de baja frecuencia. Por otro lado, los fenómenos turbulentos de alta frecuencia son limitados por el valor de FPS seleccionado.

Por otra parte, los parámetros de la lente son ajustados previo al ensayo, como se describe en la sección 3.3. Es recomendado que la sección de interés ocupe la mayor proporción de la imagen posible, de esta forma se obtiene la mejor resolución espacial posible. La misma determina la mínima variación perceptible del flujo, impidiendo relevar las variaciones de mayor frecuencia.

Es por ello que cuando se dispone a filmar es necesario conocer el fenómeno que se desea observar y analizar, para determinar cuál resulta ser la configuración más adecuada.

3.2.4. Plano láser

Es empleado un plano láser para poder iluminar únicamente las zonas de interés, siendo ésta la única fuente lumínica. De esta manera, la sección destacada del flujo será la que sea revelada por el plano láser que contenga el vapor de propilenglicol. La iluminación requerida depende de la configuración de FPS en la adquisición y el valor de la apertura de la lente.

Para evaluar el desempeño del láser en la visualización se observa el comportamiento de dos planos láser de distinta potencia con misma configuración. En ambos casos, se utiliza la cámara Photron FASTCAM Mini UX100 y el lente disponible a apertura mínima f/1.2, al observar el trazador con el láser de $500\,mW$ a 500 FPS la imagen se observa oscura, mientras que al utilizar el plano láser de $1\,W$ es posible observar el trazador. Por lo tanto, la potencia disponible del láser impone una limitante para la visualización, en particular cuando se quiere disponer de buena discriminación temporal, es decir, altos FPS.

El láser a disposición tiene una potencia de 1 W. Este valor representa un riesgo de daño de la vista. Para poder trabajar con él, debe disponerse de medidas de seguridad pertinentes. Estas son: usar lentes de seguridad, evitar que superficies especulares sean iluminadas por el láser y verificar que ninguna persona se encuentre en el rango de alcance del láser sin previo aviso.

3.3. Procedimiento de pre-adquisición de la imagen

Una rigurosa preparación del sistema de adquisición permite obtener una mejor calidad de imagen. Este paso es de suma relevancia para un procesamiento con errores sistemáticos mínimos. A continuación se detallan distintos puntos del procedimiento.

3.3.1. Recomendaciones para el posicionamiento de los equipos

Es necesario definir el punto de interés dentro de la región iluminada por el plano láser. El cual debe estar centrado en la región donde ocurren los fenómenos a visualizar. Teniendo en cuenta que las regiones más alejadas a este punto presentarán mayor distorsión, debido a la perspectiva. En el diagrama de la figura 3.6 se describen algunas de las recomendaciones de las posiciones de los objetos.

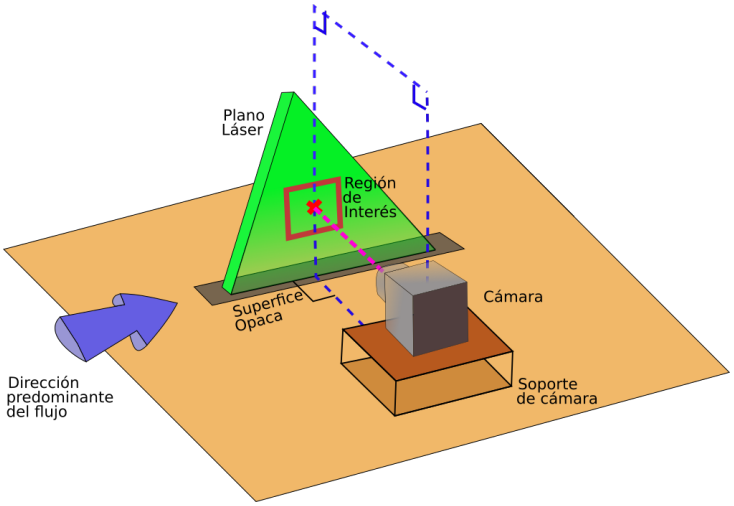


Figura 3.6: Esquema de posición de principales componentes de la visualización

Se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Verificar que el fondo sea lo más uniforme posible.
- El plano láser debe estar alineado en la dirección predominante del flujo.
- Asegurarse que el plano del sensor de la cámara sea aproximadamente paralelo al del plano láser.
- Centrar el punto de interés con el centro de la imagen.

3.3.2. Luminosidad

Es importante que las partículas del trazador sean lo único que refleje luz en la región de interés, en caso contrario, se detectan variaciones de intensidad lumínica producto a reflejos de objetos y no del flujo que se quiere observar.

Las principales recomendaciones relacionadas con la luminosidad son:

- Asegurar que la única fuente de luz sea el láser.
- Cubrir las superficies reflectantes con materiales o coberturas opacas, dada la reflexión del láser sobre las mismas.
- Usar lentes de seguridad durante la manipulación del equipo láser.

3.3.3. Trazador

El trazador debe cubrir toda la región de interés. Además, es necesario observar el movimiento que realiza el mismo con los objetos de su entorno antes de la adquisición, para evitar que el mismo se escape del plano, o tape el lente de la cámara, o la fuente de luz.

Las recomendaciones generales sobre el trazador son:

- Antes de adquirir las imágenes, asegurarse que el trazador cubra la región que se quiere observar y sea visible desde el *preview* de la cámara.
- Tener en cuenta el efecto que produce la turbulencia sobre la dispersión del trazador.
- Minimizar flujos de trazador fuera de la región iluminada, especialmente en la zona comprendida entre el plano láser y la lente de la cámara.
- Es preferible que el plano láser ilumine desde una dirección perpendicular al flujo, debida a la obstrucción de su luz por nubes de trazador.

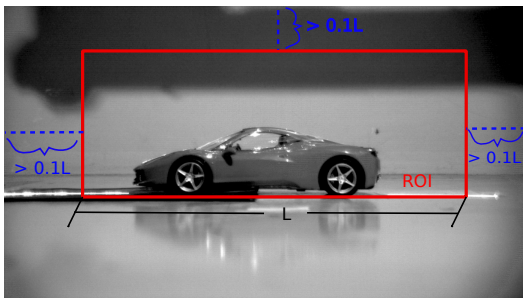


Figura 3.7: Guía para la selección de parámetros de resolución y zoom de la cámara.

3.3.4. Ajuste resolución y zoom de la cámara

Se recomienda que la región de interés (por sus siglas en inglés, ROI) ocupe la mayor parte de la imagen. Un criterio para seleccionar el zoom y la resolución de cámara, es primero definir nuestra región de interés, y luego ajustar el máximo valor de zoom hasta tener un margen mayor al 10 % del largo del ROI. En la figura 3.7 se observa un ejemplo.

Debe considerarse, que en este paso queda definida la relación píxel-metros (3.1). Por lo tanto, en caso de necesitar visualizar fenómenos de escalas espaciales más pequeñas, puede ser necesario aumentar el valor zoom a la vez que la resolución de la imagen.

3.3.5. Ajuste focal y de escala

La lente con la cual se cuenta no es automática, por lo tanto, el ajuste del foco debe ser realizado a mano. Por este motivo se imprimió un patrón de cuadrados negros y blancos, ver figura 3.8 parte (a). El objetivo, antes de la adquisición, es variar los valores del foco hasta encontrar un punto dónde el patrón se observe nítido. En las imágenes (b) y (c) de la figura, se observa un ejemplo utilizado para la adquisición en torno al modelo de un auto.

Además, este patrón sirve como referencia espacial. Es posible reescalar todos los datos a valores métricos, asumiendo que el zoom de la cámara no se modifica, a partir de la relación entre el tamaño en metros y píxeles del mismo cuadrado. En el caso de la figura 3.8 (c), los cuadrados tienen una medida de lado $l_m = 0{,}024m$, luego observando la imagen (b) en Fiji [6] se obtiene el largo del cuadrado en píxeles(l_p). De esta forma se obtiene:

$$R = \frac{l_p}{l_m} \tag{3.1}$$

Algunas recomendaciones para realizar estos ajustes son:

- Colocar el tablero en la región del plano láser.
- Asegurarse que su posición esté lo más cercana posible al punto de interés.
- Ajustar los valores del foco.

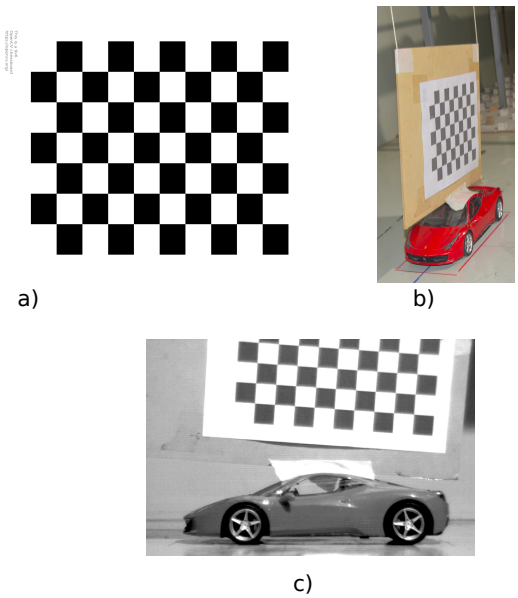


Figura 3.8: Ejemplo de ajuste del foco. En la imagen a) se observa el patrón de ajuste [12], en la imagen b) se observa un ejemplo del ajuste y en la imagen c) el mismo ejemplo desde perspectiva de la cámara.

- Los valores de apertura mayores son deseables, porque enfocan los planos más finos.
- Guardar algunas imágenes del tablero para tener una referencia de la relación de las escalas reales contra las adquiridas.

3.3.6. Selección de Frecuencia de Adquisición

En el caso de la frecuencia de adquisición(FPS), es deseable discretizar temporalmente el movimiento del flujo de manera de evitar grandes desplazamientos del trazador de un cuadro a otro. Para definir el rango de valores de FPS admisibles en la visualización, es necesario tener una estimación de la velocidad media a observar en el experimento.

En la figura 3.9 se describe una gráfica para guiar la selección de FPS a partir de la velocidad característica de algunos experimentos realizados en el laboratorio. La misma define tres áreas de calidad de imagen considerando la relación $\frac{R}{FPS}$ y la velocidad del experimento v. Los límites de cada región de calidad de imagen se obtienen de manera empírica para pocos casos.

Para determinar los límites de estas curvas, se relevan 5 datos de experimentos distintos a velocidades diferentes, se observan las imágenes adquiridas y se clasifican las mismas en tres categorías de calidad: deseable, intermedia e indeseable.

En el proceso de adquisición se pretende que el usuario utilice la gráfica de la figura 3.9 como guía para determinar un valor de FPS, una vez realizado el ajuste del foco y Zoom, ya que se obtiene la relación R y suponiendo que conoce la velocidad v.

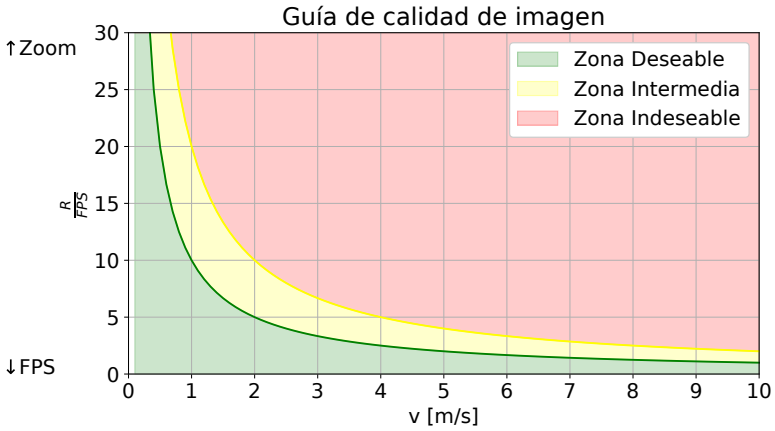


Figura 3.9: Guía para determinar la calidad de la imagen con los parámetros de R, FPS y la velocidad del experimento v.

Observando los valores de $\frac{R}{FPS}$ y v de cada una de ellas, se fijan umbrales para separar los datos. De esta forma se define que una imagen es de calidad: deseable si se cumple $\frac{R}{FPS} \leq \frac{10}{v}$, intermedia si se cumple $\frac{10}{v} \leq \frac{R}{FPS} \leq \frac{20}{v}$ y calidad indeseable si $\frac{R}{FPS} \geq \frac{20}{v}$. Es preciso más datos para definir con más exactitud los límites de estas regiones.

Sin embargo, una vez seleccionado el valor de FPS, cómo existe la limitación de memoria interna de la cámara, es necesario observar la duración del video que nos indica la cámara, y el usuario debe analizar el compromiso entre una buena calidad de imagen o más tiempo de adquisición.

Por ejemplo, en el caso de realizar la adquisición de un flujo tipo capa límite, dónde uno de los requerimientos es un tiempo mínimo de adquisición de $T \approx 0{,}5\ s$. El cual se desarrolla a una velocidad en torno a $v = 1{,}98\ m/s$. Además, se trabaja con una resolución de imagen de 1280×1024, cuyo valor máximo de FPS es de 4000, y se selecciona el zoom de la cámara de manera de obtener una relación $R = 1736\ píxeles/metros$. A partir de la figura 3.9 se obtiene el valor de $\frac{R}{FPS} < 5$ para lograr una calidad óptima. Analizando ambos límites sobre los valores de FPS, se concluye que es necesario pertenecer al rango de $347 < FPS < 4000$ para corresponder a la zona deseable. Sin embargo, en la práctica no es posible adquirir a muy altos FPS producto la falta de iluminación en la imagen. Basándose en varios experimentos, a la misma velocidad, el trazador es apreciable en la imagen con valores de FPS menores a 500, por lo tanto, el rango admisible se actualiza a $347 \leq FPS \leq 500$.

Empíricamente, la gráfica de la figura 3.9 está limitada cómo se representa en la figura 3.10. Dónde la zona oscura irregular indica el efecto desconocido de las limitaciones sobre la adquisición, estas dependen del flujo que se quiere visualizar, de la iluminación disponible, la restricción por parte de la memoria interna de la cámara y la cantidad de trazador.

Por lo tanto, la calidad de la imagen está afectada por varias limitantes del sistema adquisición, provocando que la zona de calidad óptima sea menor a la

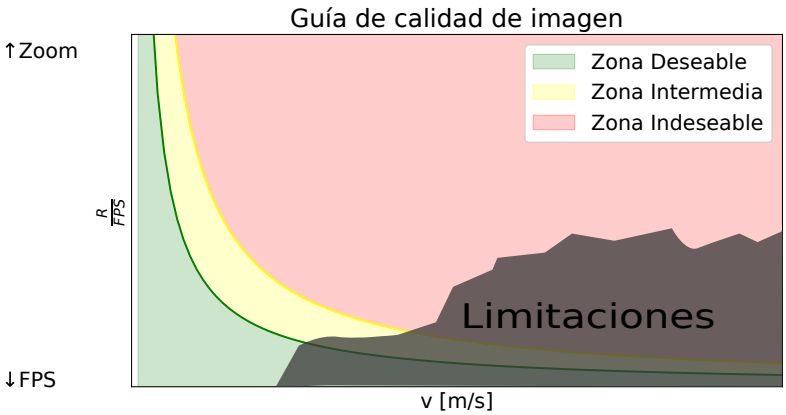


Figura 3.10: Efecto indeterminado de las limitaciones sobre la calidad de imagen.

esperada por la gráfica 3.9.

Capítulo 4

Campo de Velocidad

4.1. Introducción

El campo de velocidad de un flujo, es un campo vectorial que describe la velocidad de un fluido en movimiento. En caso de comportarse como incompresible[1], se rige bajo el siguiente sistema de ecuaciones. Donde ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{v}$ es el vector velocidad, $\mathbf{g}$ es el vector de aceleración gravitatoria y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

$$\rho_o \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\rho_o \mathbf{g} - \nabla p + \mu \Delta \mathbf{v} \tag{4.1}$$

$$\nabla . \mathbf{v} = 0 \tag{4.2}$$

Existen casos particulares donde es posible obtener una solución analítica a la misma, mientras que en casos más complejos se resuelve mediante métodos numéricos, los cuales necesitan una validación empírica [13].

Entre los métodos de medición de velocidad, se destacan tres categorías: por medio de medidas de presión, métodos de anemometría y por último los métodos ópticos. Los primeros dos métodos se realizan punto a punto, por lo tanto, para obtener un campo de velocidad es necesario adquirir varios puntos en el mismo instante, volviéndose inviable de realizar para muchos casos. En el caso de los métodos ópticos, es posible obtener la velocidad de varios puntos al mismo tiempo. Siguiendo con este razonamiento, se prueban dos enfoques ópticos: utilizando velocimetría por imágenes de partículas, y flujo óptico.

Es importante destacar que para validar una medida de velocidad obtenida por un método óptico, es necesario relevar el mismo punto por uno de los otros métodos.

[1] Esto quiere decir que su densidad no varía de forma sustancial bajo cambios de presiones.

4.2. Velocimetría por Imágenes de Partículas

Velocimetría por Imágenes de Partículas (siendo su sigla en inglés PIV) se basa en generar un registro fotográfico de partículas que siguen el movimiento del fluido en una región iluminada por un plano láser. El método requiere que las partículas queden registradas por medio de una cámara, en el instante que el láser es activado. Luego, el procesamiento de datos consiste en determinar el desplazamiento promedio de las partículas, en una pequeña región de la imagen o de una partícula individual, entre dos cuadros contiguos. [14]

El sistema de adquisición típico de PIV se muestra en la figura 4.1. El mismo consiste en seis subsistemas [15]:

- Sembrador de partículas: Cuyo objetivo es agregar trazadores al flujo.
- Iluminación: El sistema debe iluminar a las partículas en un plano.
- Grabación: La luz reflejada por las partículas tiene que ser registrada por dos cuadros fotográficos contiguos.
- Calibración: Es necesario determinar la relación entre el desplazamiento de la partícula en el plano de la imagen y el desplazamiento real de la partícula.
- Procesamiento: Se obtiene el desplazamiento de la partícula a través de las grabaciones.
- Post Procesamiento: Es la etapa en que se detecta y se descartan medidas incorrectas.

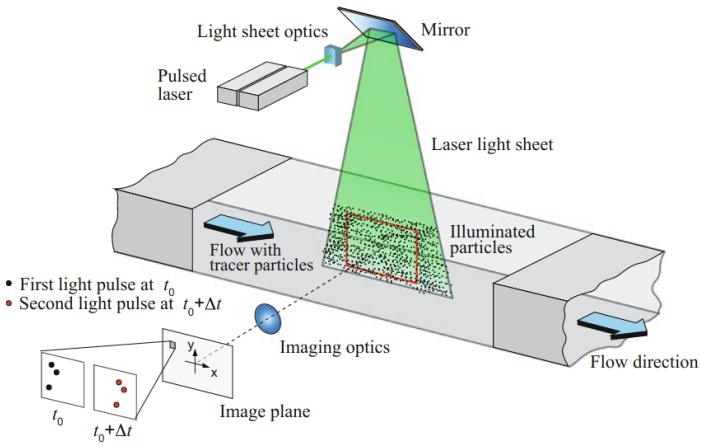


Figura 4.1: Sistema de adquisición típico de PIV [15].

Las últimas dos etapas corresponden al procesamiento de las imágenes luego de ser adquiridas. Existen varios software que realizan este procedimiento, entre los que destacan, `PIVLab` [3] y `OpenPIV` [2].

Todas las opciones se basan en la misma idea, por un lado, las imágenes son adquiridas a un intervalo de tiempo constante, pero la dispersión de las partículas en distintas zonas de la imagen puede variar. Por lo tanto, para observar localmente regiones se divide a la imagen en secciones llamadas ventanas de interrogación, el objetivo consiste en asociar a cada ventana un vector de velocidad.

Para hallar el desplazamiento de las partículas, se considera una ventana de interrogación en la primera imagen. El objetivo es ubicar estas partículas en el segundo cuadro. Para esto, se calcula la función de correlación con la ventana elegida comparando con todas las ventanas posibles del segundo cuadro, la correlación en este caso simboliza que tan bien se superponen las ventanas cuando se desplaza una sobre la otra. Por lo tanto, el valor máximo indica la dirección predominante de las partículas.

De esta forma, como el tiempo entre cuadros es constante, con el desplazamiento entre ventanas queda definida la velocidad resultante.

4.2.1. OpenPIV

`OpenPIV` [2] es un software abierto y libre, el cual es desarrollado en Python. Una de sus ventajas es que existe comunicación directa con los creadores mediante foros, en los cuales es posible resolver los problemas encontrados utilizando la herramienta, y de esta forma permite mejorar los resultados. Además, es posible reportar errores, sugerir y agregar mejoras.

En la figura 4.2 se presenta un diagrama simplificado del funcionamiento de `OpenPIV`.

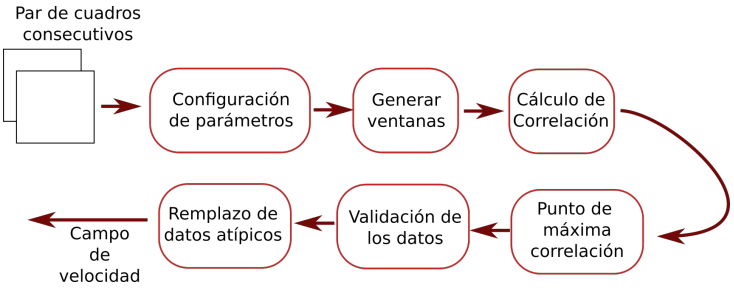


Figura 4.2: Diagrama simplificado del funcionamiento de `OpenPIV` para una iteración.

Primero se toma una muestra en el primer cuadro, luego se generan las ventanas de interrogación en el segundo cuadro. El tamaño típico de las mismas es de $2^n \times 2^n$ píxeles, generalmente, entre valores de 64×64 a 8×8 píxeles. Las ventanas pueden solaparse entre sí, generalmente se utiliza una superposición de la mitad del ancho de la ventana. De esta forma, el usuario define las ventanas de interrogación con los parámetros: tamaño de ventana y superposición.

Una vez definidas las ventanas de interrogación, se correlaciona la ventana obtenida en el primer cuadro con todas las posibles ventanas de interrogación. `OpenPIV` permite la opción de utilizar el método de correlación circular o lineal,

dónde el primero es más rápido, pero tiene menor precisión. El pico de correlación se obtiene mediante el ajuste de la correlación con una función: gaussiana, parabólica o centroide.

Luego, se aplican filtros adicionales para validar y remover datos atípicos a partir de la relación señal a ruido o basado en la estadística del campo del flujo. La validación utilizando la relación señal a ruido, consiste en calcular la misma y aplicar un umbral para descartar aquellos datos ruidosos.

Además, es posible generar varias iteraciones del algoritmo para mejorar los resultados a partir de deformaciones de las ventanas de interrogación [15].

4.2.1.1. Pruebas de OpenPIV

Antes de adquirir imágenes experimentales con trazador continuo, primero se verifica que el sistema en sus condiciones de diseño (trazador con partículas) obtenga un campo de velocidades cualitativamente correcto. Es decir, que las direcciones sean adecuadas y se respeten relaciones de proporcionalidad entre las velocidades real y medida.

Imágenes Estándares

El artículo [16] genera una secuencia de imágenes que simula la adquisición de partículas en un plano, bajo determinado flujo, y lo que permite evaluar el desempeño del algoritmo.

Primero, considera una imagen artificial de las partículas, utilizando un modelo de intensidad lumínica, distribución y forma de las partículas. Tomando en cuenta el efecto tridimensional dado por el espesor del plano láser. Luego, utilizando velocidades calculadas por un método numérico, genera el cuadro consecutivo determinando la nueva posición de las partículas.

De esta forma, se obtienen dos cuadros consecutivos de partículas, trasladadas dentro del flujo conocido, simulando la adquisición realizada por velocimetría de partículas.

Las imágenes pre-generadas por los autores, presentan los siguientes parámetros:

- $\bar{v}$: Velocidad media de las partículas (píxeles/intervalo[2]).
- v_x: Velocidad máxima de las partículas (píxeles/intervalo).
- $|\bar{W}|$: Velocidad media saliente al plano (1/intervalos).
- $|W|_x$: Valor máximo de la velocidad saliente del plano (1/intervalos).
- N: Número de partículas.
- $\bar{d}$: Diámetro medio(píxeles).
- σ: Desviación estándar del diámetro (píxeles).

[2]Tiempo transcurrido entre dos cuadros consecutivos

La validación se realiza en el primer caso de las imágenes pre-generadas por los autores [16], ya que cuenta con la distribución teórica de los datos observada en la figura 4.3. Los parámetros de la misma se detallan en la tabla 4.1. Las imágenes resultantes se observan en la figura 4.4.

Tabla 4.1: Parámetros de la simulación

$\bar{v}$ [píxeles/intervalo]	7.4
v_x [píxeles/intervalo]	15
$\lvert\bar{W}\rvert$ [1/intervalos]	0.017
$\lvert W\rvert_x$ [1/intervalos]	0.10
N [partículas]	4000
$\bar{d}$ [píxeles]	5
σ [píxeles]	1.4

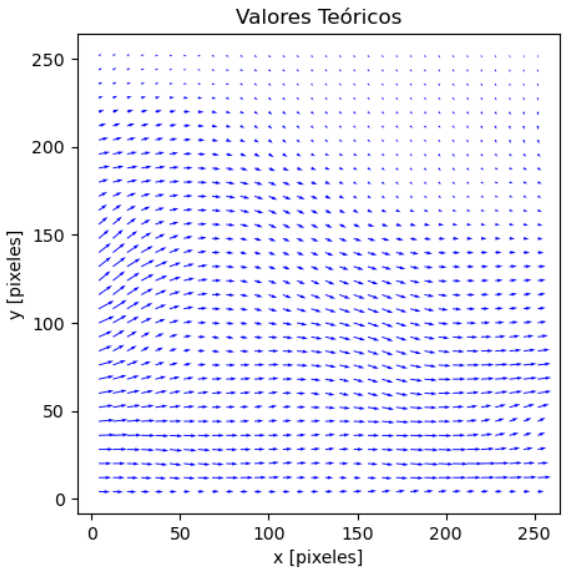
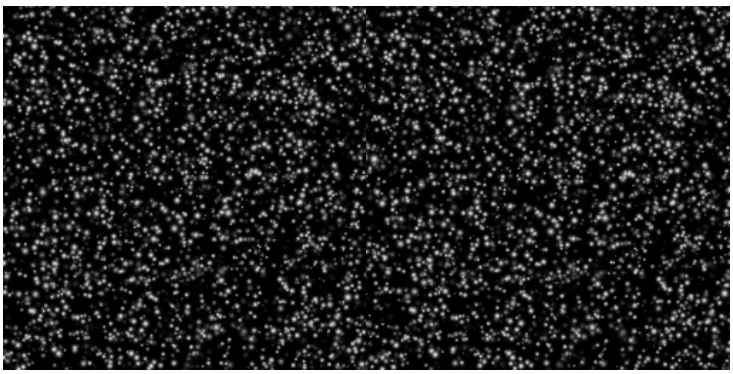


Figura 4.3: Distribución teórica de las velocidades en el plano en el caso n°1.

El objetivo es correr `OpenPIV` sobre estos dos cuadros artificiales (figura 4.4) y analizar los resultados comparando con los valores teóricos de la figura 4.3.

Para poder comparar los resultados es necesario tener la misma grilla de puntos teóricos y experimentales. La librería de `OpenPIV`, no permite modificarla. Por lo tanto, es necesario clonar el repositorio y retocar código base. Este cambio no afecta el correcto funcionamiento del algoritmo, simplemente modifica la grilla de puntos que se evalúa.

La configuración de `OpenPIV` utilizada es la predeterminada, a excepción de los siguientes parámetros:



Cuadro 1 Cuadro 2

Figura 4.4: Imágenes generadas en el plano en el caso n°1.

- Cantidad de iteraciones fijada en 2.
- Tamaños de las ventanas en 32, y 16 píxeles en la primera y segunda iteración.
- Superposición de 8 píxeles en ambas ventanas.

En la figura 4.5 se describe el campo de velocidades obtenido con `OpenPIV`. Cualitativamente, se observa que hay similitud entre ambos campos de velocidades.

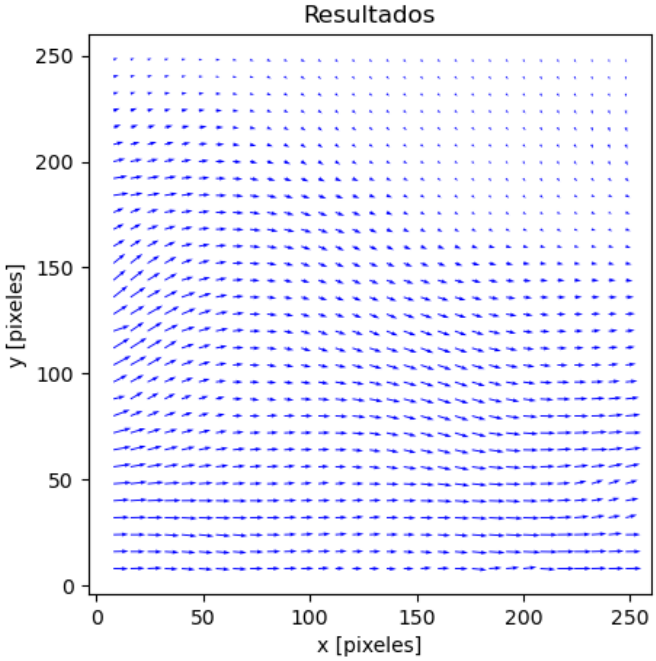


Figura 4.5: Resultados obtenidos con `OpenPIV`.

Es posible evaluar cuantitativamente los resultados, estudiando la diferencia absoluta entre la dirección teórica y experimental, y la relativa para el módulo. Es decir, se divide la diferencia sobre el valor teórico puntual.

En el caso del módulo, se genera el histograma de la figura 4.6, donde la mayoría de los datos presenta un error relativo menor al 20 %. Por otra parte, para la diferencia en las direcciones, se genera el histograma 4.7, donde la mayoría de los datos presenta una diferencia menor a 8°. Para profundizar, se calcula el error cuadrático medio entre ambas distribuciones, para el módulo y dirección en cada punto. El primero es de 12 %, mientras que el error cuadrático medio en la dirección es de $2,85^o$.

Estos resultados muestran que, a pesar de los efectos que provoca la luz, la dificultad de realizar un movimiento plano perfecto, y el propio error de la herramienta; `OpenPIV` genera resultados aceptables para la implementación que se requiere en el proyecto.

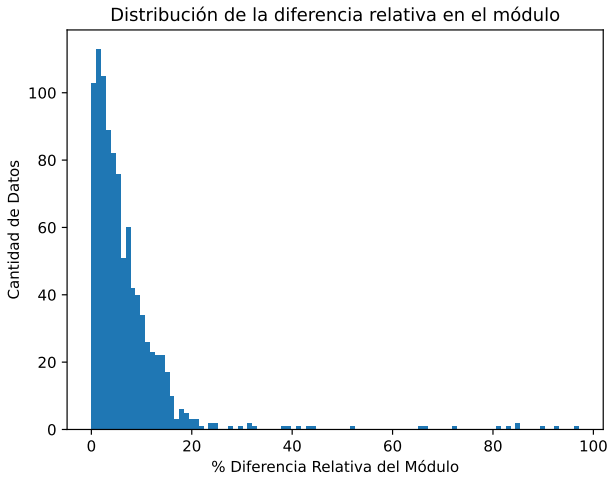


Figura 4.6: Histograma de diferencia relativa del módulo de velocidades

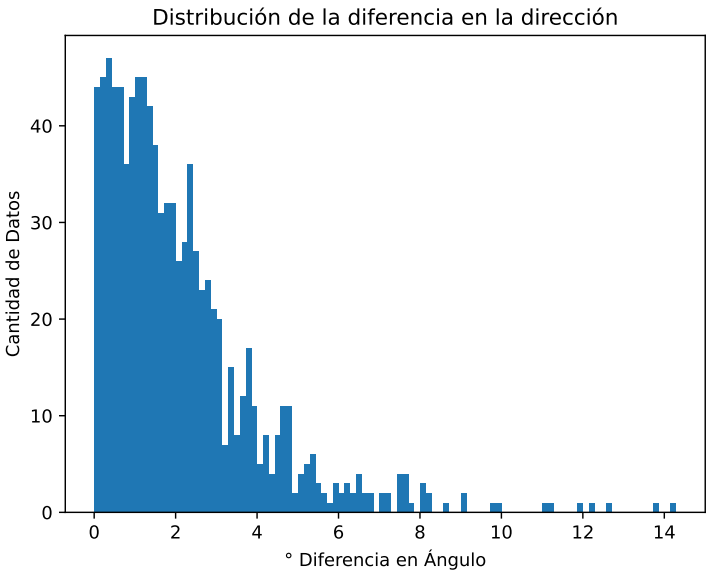


Figura 4.7: Histograma de diferencia de direcciones

4.2.2. Experimento Capa Límite

En esta sección se describen el experimento de capa límite procesado con `OpenPIV`. La metodología utilizada en la adquisición se describe en el capítulo 3. El experimento pretende ser una validación cualitativa, con enfoque en hallar que los campos de velocidades describan las mismas propiedades que describe el movimiento real. Sin embargo, es posible analizar los valores del módulo de velocidad, pero para esta primera instancia, tienen importancia secundaria.

Para analizar el desempeño del método de `OpenPIV` se selecciona una región de interés (ROI por sus siglas en inglés) de un flujo tipo capa límite sobre el suelo del túnel de viento, ver figura 4.8. La teoría desarrollada para este movimiento, se encuentra en la sección 2.4.2.

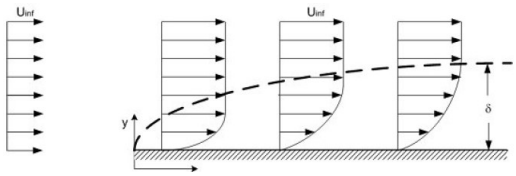


Figura 4.8: Capa límite en el piso del túnel de viento

En la figura 4.9 se describe un diagrama de la adquisición, donde se especifican los elementos de la misma y la ubicación del experimento en el túnel. Además, en la figura 4.10 se observa un fotograma de la secuencia adquirida en el túnel de viento, para el experimento de la capa límite, sobre la que se ha superpuesto la región utilizada para analizar los resultados. El tiempo total del video adquirido es de 4 s, y la velocidad del túnel fue fijada en $1,9\ m/s$.

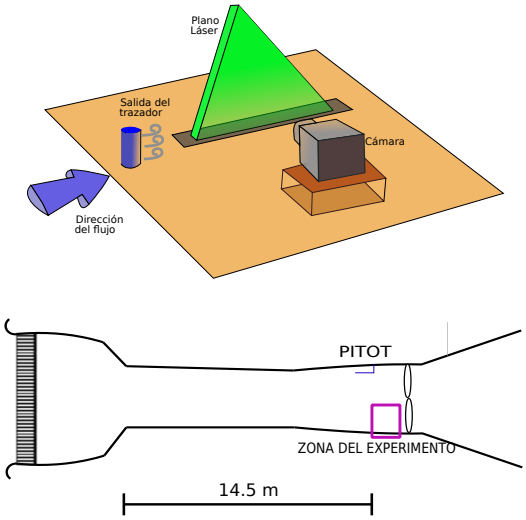


Figura 4.9: Diagrama de la adquisición

Inicialmente, el procesamiento se realiza con `OpenPIV` utilizando tres iteraciones del algoritmo, con ventanas cuadradas de tamaño 32, 16 y 8, y sus superposiciones

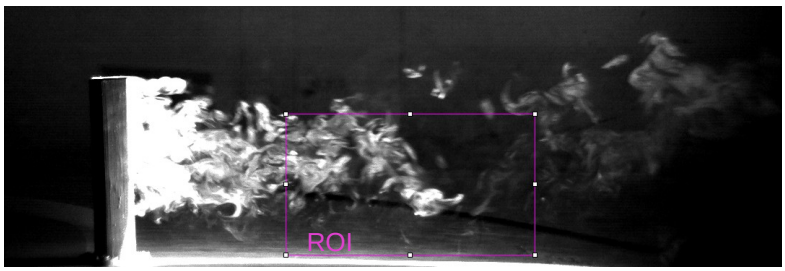


Figura 4.10: Experimento de capa límite a $t = 0,42\ s$. Se ha superpuesto en color violeta la región de interés (ROI) analizada.

respectivas de 16, 8 y 4 píxeles. Cada iteración realiza el proceso del diagrama de bloque 4.2, a excepción que utiliza información de la iteración anterior para obtener el campo de velocidad final. En todas las iteraciones se utiliza el método de correlación lineal. El resultado obtenido para cada par de cuadros consecutivos, es el campo de velocidades instantáneo.

El mayor problema encontrado en los experimentos es la existencia de sumideros y fuentes indeseados. Es decir, el algoritmo detecta un movimiento entrante o saliente a un punto. En la figura 4.11 se pueden apreciar los mismos. Investigando las imágenes, se observa que muchas veces, algunas zonas con trazador además de moverse según la dirección predominante, presentan una pequeña componente de velocidad transversal al plano. La sensibilidad ante pequeñas perturbaciones son facilitadas por una grilla muy discretizada espacialmente. En consecuencia, se resolvió quitar una iteración (de ventana 8 y superposición 4 píxeles), quedando una grilla final separada cada 8 píxeles.

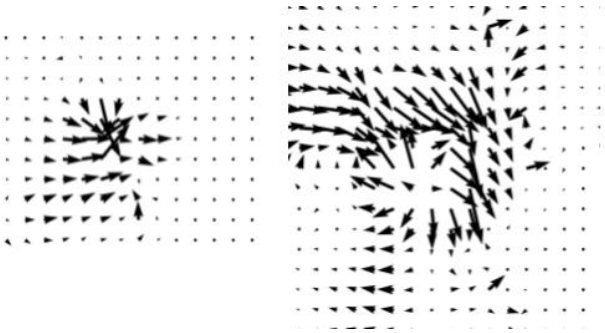


Figura 4.11: Ejemplos de sumideros y fuentes no deseables en el campo de velocidades.

En este caso se trabaja con el flujo medio, por lo tanto, es necesario verificar que el tiempo de adquisición sea el correcto, y de esta forma garantizar que realmente se estén eliminando las fluctuaciones de turbulencia de pequeña escala al promediar los campos de velocidades instantáneos. El método consiste en calcular el período de aparición T del vórtice de mayor tamaño (escala de longitud L_v) estimado en el flujo mediante (4.3). Estos vórtices son aquellos que introducen fluctuaciones turbulentas de menor frecuencia en el flujo.

$$T \approx \frac{L_v}{U_\infty} \tag{4.3}$$

Considerando una escala de vórtices de tamaño $L_v = \delta_2$ [3], y su correspondiente velocidad de flujo libre $U_{\infty 2}$, se calcula un período de aparición de $T = 2s$, por lo tanto, se puede estimar que con un tiempo de adquisición de $4s$ es suficiente para eliminar las fluctuaciones turbulentas al calcular el campo medio de velocidades.

Para realizar la validación, se comparan los datos procesados con mediciones experimentales realizadas en la misma región del túnel de viento. Esta medición se realiza a altas velocidades de flujo (16,8 m/s), debido a que los anemómetros disponibles no cuentan con una calibración a bajas velocidades.

La forma de comparar las velocidades en ambos experimentos consiste en emplear valores adimensionados para las variables y e u, mediante los valores de la tabla 4.2. Donde δ es la altura de la capa límite y U_∞ es la velocidad del flujo por encima de la capa límite. Los subíndices 1 y 2, indican si corresponde a la medición empírica o al procesamiento con `OpenPIV`, respectivamente[4].

Tabla 4.2: Valores obtenidos de la medición y análisis de datos

δ_1 [mm]	2500
δ_2 [mm]	3840
U_{∞_1} [m/s]	16.8
U_{∞_2} [m/s]	1.96

La curva empírica obtenida se presenta en la figura 4.12, donde se grafica con variables adimensionadas y/δ_1, y $u/U_{\infty 1}$.

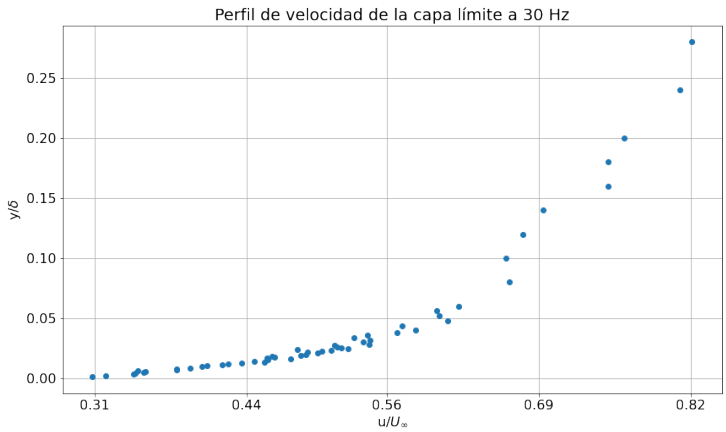


Figura 4.12: Perfile de velocidades de la capa límite experimental a $16,8\ m/s$.

[3]Dentro de la región de la capa límite es la zona donde se produce turbulencia.

[4]En el apéndice A, se cuenta con una descripción del ensayo realizado y análisis de datos.

Por otra parte, el campo medio de velocidades del flujo, detallado en la figura 4.13.

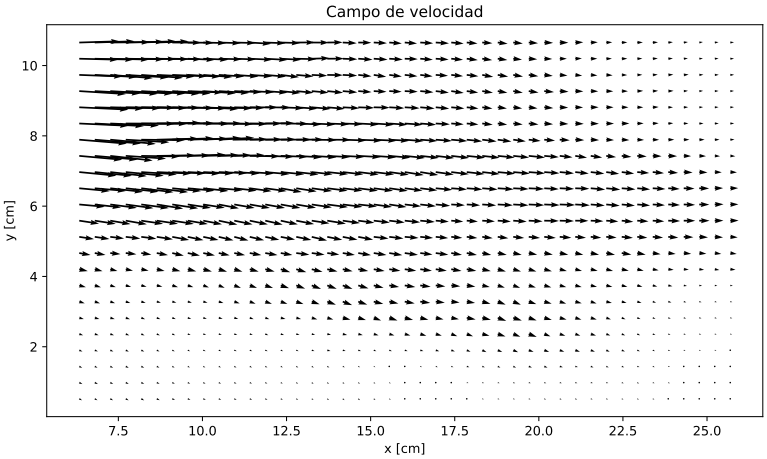


Figura 4.13: Resultado del campo de velocidad obtenido utilizando `OpenPIV`.

Utilizando el campo de velocidad de la figura 4.13, se extrae un único perfil de velocidades para realizar la comparación(ver apéndice A). En este caso, debido a que cada uno de sus perfiles de velocidades deben ser uniformes a lo largo de la dirección x en el ROI, se realiza un promedio espacial en todo el ROI para cada valor de y, y se presenta la desviación estándar, ver figura 4.14.

La figura 4.14 muestra una forma que difiere al de la capa límite presentada en la figura 4.12, observando una concavidad negativa para valores de $y/\delta < 0,015$ y un comportamiento anómalo para $y/\delta > 0,020$.

Para cuantificar la dispersión del trazador en el video, se considera la desviación estándar de la intensidad lumínica de las imágenes, ver figura 4.15. La intensidad lumínica presenta mayor dispersión en alturas mayores a $y = 0,05$, indicando que para esta área, el trazador presenta mayor dispersión. Es decir, esta zona no presenta trazador en algunos momentos del video.

El problema mencionado altera los valores obtenidos mediante `OpenPIV`, generando velocidades cercanas a cero cuando no hay trazador, y valores más altos cuando si lo hay. Este error puede explicar por qué la desviación de las velocidades horizontales en la figura 4.14 presenta mucha dispersión para alturas mayores a $y = 0,057$.

La comparación entre ambas curvas de capa límite se presenta en la figura 4.16.

En este segundo análisis, se puede observar que los valores de velocidad adimensionados difieren en más de un orden de magnitud para la misma altura adimensionada y/δ e incluso en las alturas intermedias donde la dispersión de trazador es menor. Además, la correlación entre ambos perfiles es de 90 %. Por otro lado, al observar los valores de correlación para cada perfil del campo de velocidad de la figura 4.13, se obtiene la figura 4.17, donde la correlación decae para valores mayores de x. Es decir, a medida que se aleja de la fuente de trazador, lo cual

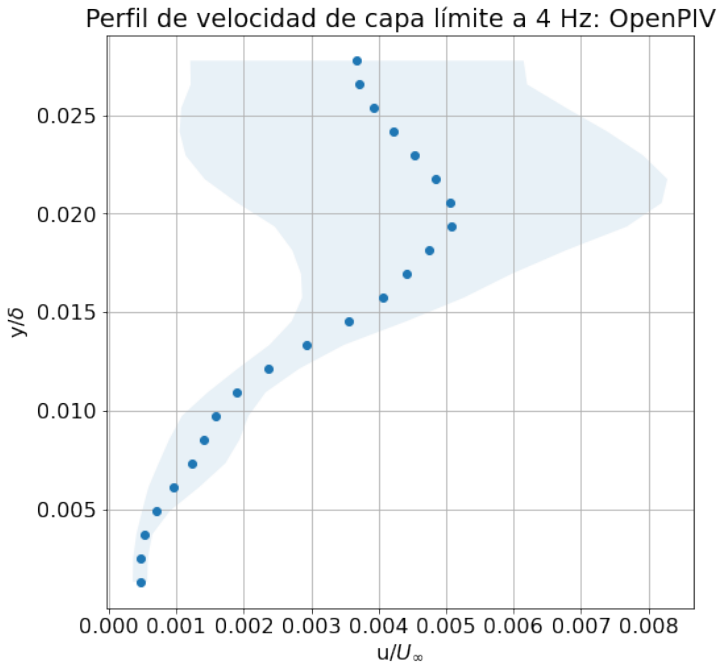


Figura 4.14: Resultado del perfil velocidad en una capa límite obtenido mediante `OpenPIV` a $1,96\,m/s$.

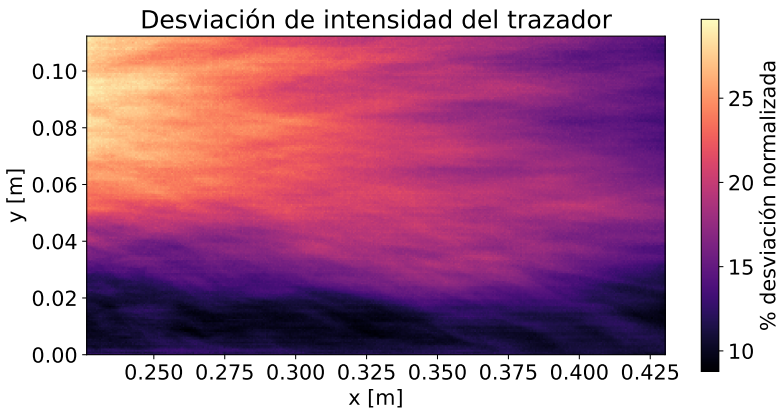


Figura 4.15: Desviación de intensidad del trazador.

refuerza la conclusión de la influencia del trazador sobre los resultados.

A pesar de que el procesamiento realizado con partículas a partir de imágenes artificiales fue exitoso, al relevar un campo de velocidades con errores bajos en el módulo de la velocidad y dirección, no ocurre lo mismo. En este caso, se presentan resultados muy apartados de los reales. Se concluye que el procesamiento con `OpenPIV` no es exitoso para una adquisición con trazador continuo, debido a que no es compatible con el tipo de trazador.

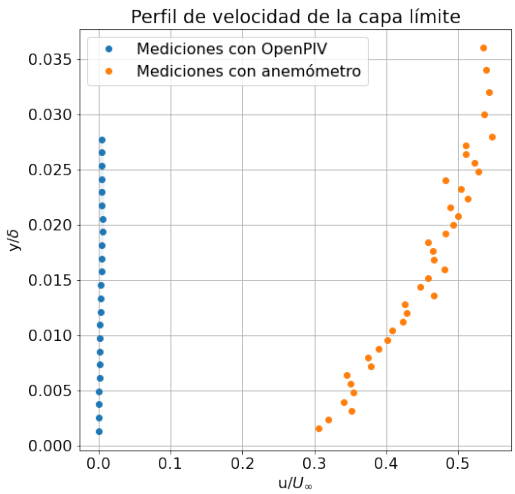


Figura 4.16: Comparación perfiles de velocidades teóricas (figura 4.12) y procesados (figura 4.14)

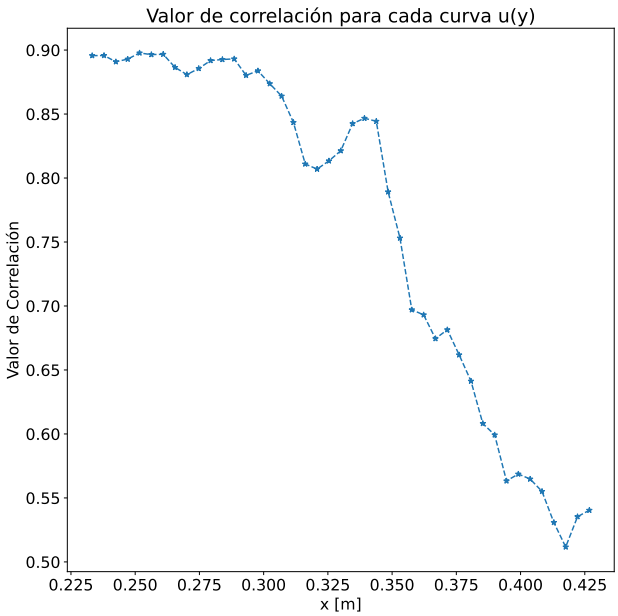


Figura 4.17: Correlaciones para los perfiles de velocidad en el ROI

4.3. Flujo Óptico

4.3.1. Introducción

El flujo óptico es una herramienta que permite representar el movimiento aparente entre dos cuadros consecutivos. Este movimiento puede darse debido al movimiento de los objetos en la escena o el propio movimiento de la cámara. Las aplicaciones de esta herramienta en Visión Artificial son variadas: tracking, estudio de patrones, estabilización de videos, detección de movimiento, navegación de robots y odometría visual.

Este método presenta dos suposiciones: se asume que la intensidad del brillo del objeto a observar se mantiene constante en cuadros consecutivos, y además supone que píxeles vecinos tienen un movimiento similar.

En todas sus variantes se pretende calcular en una ventana espacial el movimiento entre dos cuadros capturados en el instante t y $t + \Delta t$ observando la intensidad de los píxeles.

Sea $I(x, y, t)$ el valor de intensidad en el punto $x,\ y$ de la imagen, bajo la hipótesis de que se mantiene la intensidad, entonces se cumple:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \tag{4.4}$$

A partir de la ecuación anterior se llega a la ecuación de flujo óptico:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v = 0 \tag{4.5}$$

Los métodos de flujo óptico se diferencian en la forma de resolver la misma.

4.3.2. Algoritmo de Gunnar Farnebäck

El algoritmo de Gunnar-Farnebäck fue desarrollado para producir un flujo óptico en una grilla densa de puntos.

El mismo se basa en la aproximación de la intensidad de un píxel con una forma cuadrática, cuyos coeficientes se calculan a partir de la intensidad de píxeles vecinos. Esto implica que, dada las coordenadas de un píxel $\mathbf{x}$, la intensidad del píxel $f(\mathbf{x})$ puede ser aproximada cómo:

$$f(\mathbf{x}) \sim \mathbf{x}^T\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}^T\mathbf{x} + c \tag{4.6}$$

Donde $\mathbf{A}$ es una matriz simétrica, $\mathbf{b}$ es un vector y c un escalar. Los coeficientes son obtenidos mediante un ajuste de mínimo cuadrado ponderado en la vecindad del píxel $\mathbf{x}$. El peso considerado depende de dos factores: la certeza y aplicabilidad. El primero implica cuantificar la confianza hacia los datos, mientras que el segundo determina un peso relativo a la distancia de un punto vecino respecto a $\mathbf{x}$ [4].

El objetivo del algoritmo es encontrar el desplazamiento de la intensidad de un píxel. Es decir, dado un píxel con intensidad $f_1(\mathbf{x})$ en el primer cuadro, y ocurre un desplazamiento global del flujo de una distancia $\mathbf{d}$ en el segundo cuadro, se tiene

que en las coordenadas $\mathbf{x}$ la intensidad de píxel es $f_2(\mathbf{x})$ tal que: $f_2(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}-\mathbf{d})$. Lo que equivale a que la intensidad en la coordenada $\mathbf{x}$ en el segundo cuadro es igual a la intensidad en el primer cuadro con coordenadas $\mathbf{x}$ menos el desplazamiento $\mathbf{d}$.

Sea f_1 y f_2 definidos de la forma:

$$f_1(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T\mathbf{A}_1\mathbf{x} + \mathbf{b}_1^T\mathbf{x} + c_1 \tag{4.7}$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T\mathbf{A}_2\mathbf{x} + \mathbf{b}_2^T\mathbf{x} + c_2 \tag{4.8}$$

Idealmente, se cumple la relación:

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1 \tag{4.9}$$

$$\mathbf{b}_2 = \mathbf{b}_1 - 2\mathbf{A}_1\mathbf{d} \tag{4.10}$$

$$c_2 = \mathbf{d}^T\mathbf{A}_1\mathbf{d} - \mathbf{b}_1^T\mathbf{d} + c_1 \tag{4.11}$$

Por lo tanto, se asume que la señal (la intensidad de un píxel) se puede aproximar a un polinomio y que la traslación global entre dos señales puede ser calculada mediante la ecuación (4.10).

Generalizando el razonamiento anterior, se obtiene para el primer cuadro la expansión polinomial con coeficientes $\mathbf{A}_1(\mathbf{x})$, $\mathbf{b}_1(\mathbf{x})$, $c_1(\mathbf{x})$ y para el siguiente cuadro $\mathbf{A}_2(\mathbf{x})$, $\mathbf{b}_2(\mathbf{x})$, $\mathbf{c}_2(\mathbf{x})$. En este caso se esperaría cumplir la ecuación (4.9), sin embargo, en la práctica se utiliza la siguiente aproximación:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{A}_1(x) + \mathbf{A}_2(\mathbf{x})}{2} \tag{4.12}$$

Definiendo $\Delta\mathbf{b} = -\frac{1}{2}(\mathbf{b}_1(\mathbf{x}) - \mathbf{b}_2(x))$. Se obtiene la ecuación:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{d}(\mathbf{x}) = \Delta\mathbf{b}(\mathbf{x}) \tag{4.13}$$

Donde ahora $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ es un desplazamiento que varía espacialmente.

En la ecuación (4.13) los coeficientes $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ y $\Delta\mathbf{b}(\mathbf{x})$ son datos y el objetivo es encontrar el desplazamiento. Es posible encontrar una solución de $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ punto a punto de la misma, sin embargo, su solución es ruidosa.

Por esto mismo, se itera en una vecindad del punto, asumiendo que el desplazamiento varía poco, y se realiza mínimos cuadrados ponderados (4.14).

$$\sum_{\Delta\mathbf{x}\in I} w(\Delta\mathbf{x}) \left\|\mathbf{A}(\mathbf{x}+\Delta\mathbf{x})\mathbf{d}(\mathbf{x}) - \Delta\mathbf{b}(\mathbf{x}+\Delta\mathbf{x})\right\|^2 \tag{4.14}$$

En términos prácticos, implica que para resolver el desplazamiento se depende de las matrices $\mathbf{A}$ y $\Delta\mathbf{b}$, el desplazamiento $\Delta\mathbf{x}$ en la vecindad I del punto $\mathbf{x}$ y los coeficientes $w(\Delta\mathbf{x})$.

Para mejorar la robustez del algoritmo, supone que el vector desplazamiento $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ se comporta como un polinomio de grado dos en $\mathbf{x}$.

Es posible agregar información a priori del desplazamiento. En este caso, se realiza el procedimiento anterior, pero se calcula el desplazamiento relativo al valor agregado.

Dado que con esta técnica solo es posible calcular desplazamientos pequeños, se emplea una estructura piramidal para detectar desplazamientos más grandes. Esta se basa en submuestrear consecutivamente la imagen, generando varios niveles. Para cada nivel, se calculan los coeficientes de la expansión polinomial y se calcula el desplazamiento en cada vecindad.

4.3.2.1. Implementación en OpenCV

Una de las librerías más populares de procesamiento de imágenes es `OpenCV`. La misma presenta varios algoritmos de flujo óptico, en este caso la sección se basa únicamente en el algoritmo de Gunnar Farnebäck. La función recibe dos cuadros y retorna una matriz de dos canales con los valores de (u, v) en cada canal.

Es posible modificar varios parámetros. Por ejemplo, se puede agregar información a priori sobre el fluido. Además, es configurable la estructura piramidal, siendo posible definir la cantidad de niveles (`levels`), la relación de submuestreo de la imagen en cada nivel (`pyr_scale`), y el número de iteraciones que se realiza en cada uno (`iterations`). Es configurable el tamaño de la vecindad analizada (`winsize`) y el orden del polinomio utilizado para aproximarla (`poly_n`).

4.3.3. Experimentos

4.3.3.1. Capa Límite

A los efectos de analizar el desempeño de la herramienta, y de comparar los resultados obtenidos con `OpenPIV`, se analiza el mismo video que en la sección 4.2.2: flujo tipo capa límite. Analizando de forma análoga al caso anterior, se asume que los perfiles de velocidades son uniformes en la dirección longitudinal. Las alturas de las capas límites calculadas son ($\delta_1 = 2500\ mm$ y $\delta_2 = 3840\ mm$) para velocidades U_∞ de 16,8m/s y 1,96 m/s[5].

Procesando las imágenes, se obtiene el campo de velocidades de la figura 4.18.

A partir del campo de velocidades, se grafica el perfil de velocidades que se muestra en la figura 4.19. Donde la curva azul es el valor medio de todos los perfiles verticales para todos los valores de x, y se presenta en un azul más claro la dispersión de los datos.

La desviación del perfil de velocidad es calculada mediante desviación estándar de los datos de los perfiles verticales del campo de velocidad. La misma no presenta cambios considerables según la vertical, siendo menor al 17,5 % de la medición. Este resultado sugiere que la herramienta es menos sensible a los cambios de intensidad del trazador que `OpenPIV`.

En la figura 4.20 se comparan la curva de la figura 4.19 (en azul) y los valores teóricos a velocidad 16,8 m/s (en naranja). Allí se aprecia un desfasaje hacia la izquierda de la curva experimental, el mismo puede deberse a un error en la escala de velocidades seleccionada en el apéndice A, o a que el algoritmo subestima las velocidades. En un estudio futuro, se lo puede verificar midiendo bajo un mismo

[5]El cálculo de las alturas de las capas límites se detallan en el apéndice A

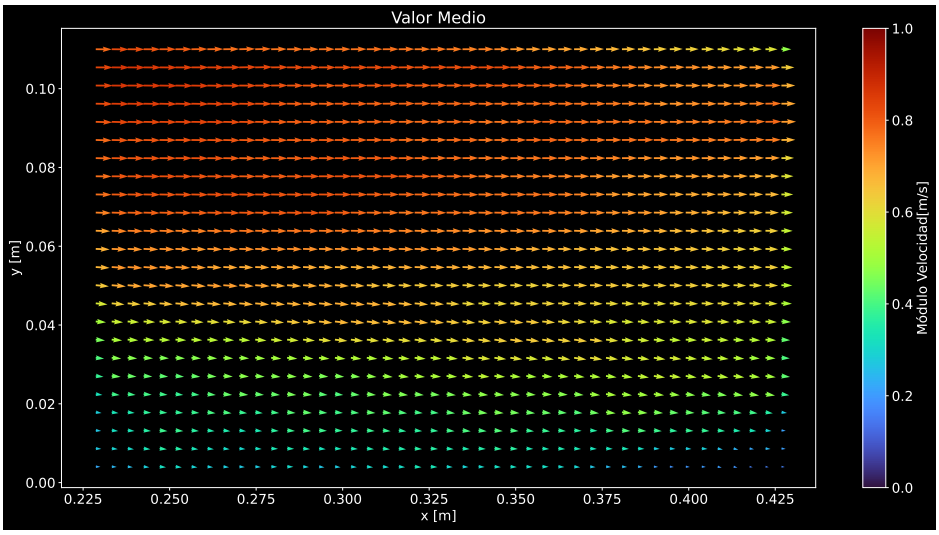


Figura 4.18: Campo de velocidad media obtenido con flujo óptico.

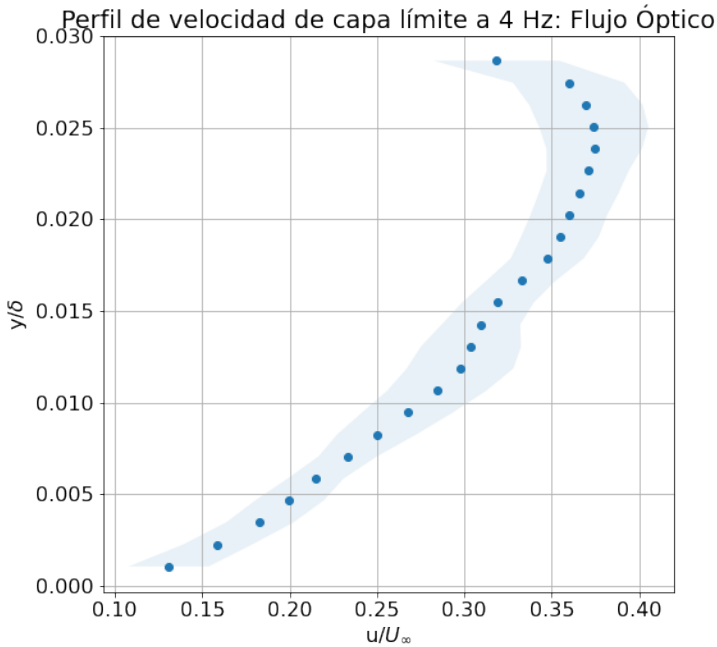


Figura 4.19: Resultado del perfil de velocidad en una capa límite obtenido mediante flujo óptico

flujo, con instrumentos calibrados a bajas velocidades y VIV. Sin embargo, la curva sigue el mismo patrón que la relevada, ya que la correlación obtenida en este caso es de 0,98.

Luego de analizar el comportamiento medio de las columnas, se verifica que cada perfil de velocidades, para distintos valores de x, sigue un comportamiento similar, ver figura 4.21.

Cada perfil de velocidad de la figura 4.21 se correlaciona con los datos teóricos,

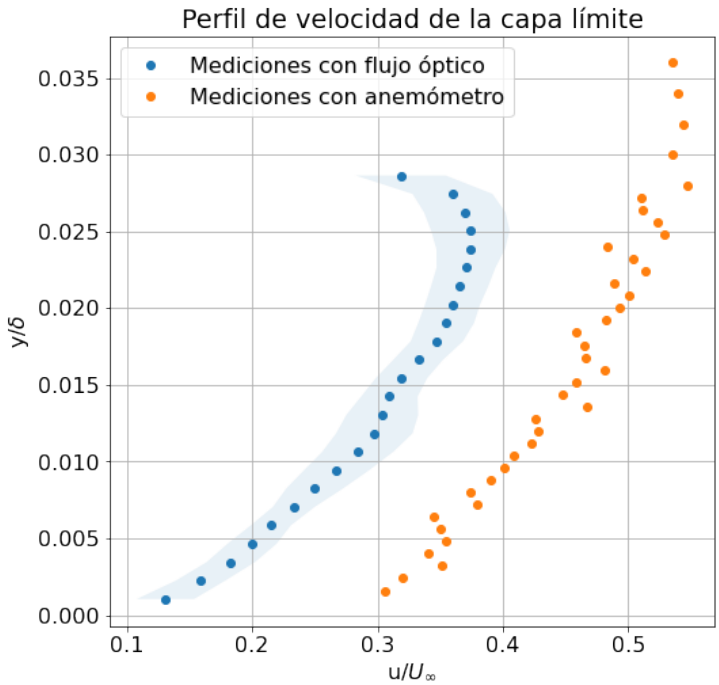


Figura 4.20: Comparación de perfiles de velocidades teóricos y procesados

en todos los casos se verifica una correlación alta (ver figura 4.22), dónde la correlación promedio es de 96,7 % y su desviación estándar de 1,6 %. El valor más bajo de correlación es de 0,93. Este se da cuando x se encuentra en los valores 0,375 y 0,400 m. Al observar en los mismos valores de x en el campo de velocidad de la figura 4.18, se puede apreciar que el perfil de velocidades no alcanza velocidades elevadas para grandes alturas en estos puntos.

En conclusión, la variación en concentración de humo afecta de menor forma los resultados en el flujo óptico respecto al `OpenPIV`. Por otro lado, en condiciones estacionarias, existe una relación de proporcionalidad entre los datos procesados por el flujo óptico y los datos reales.

Debe destacarse que las mediciones fueron realizadas a otra velocidad de túnel de viento y las alturas de capa límite fueron estimadas mediante relaciones teóricas (apéndice A). Esto se debe a que los instrumentos disponibles en el laboratorio no están calibrados para velocidades bajas, y tampoco fueron realizadas el mismo día.

Una mejora a este experimento sería realizar nuevamente las mediciones con anemómetro y luego colocar el trazador para realizar la adquisición a la misma velocidad del flujo. Para ello primero es necesario disponer de anemómetros calibrados para velocidades bajas.

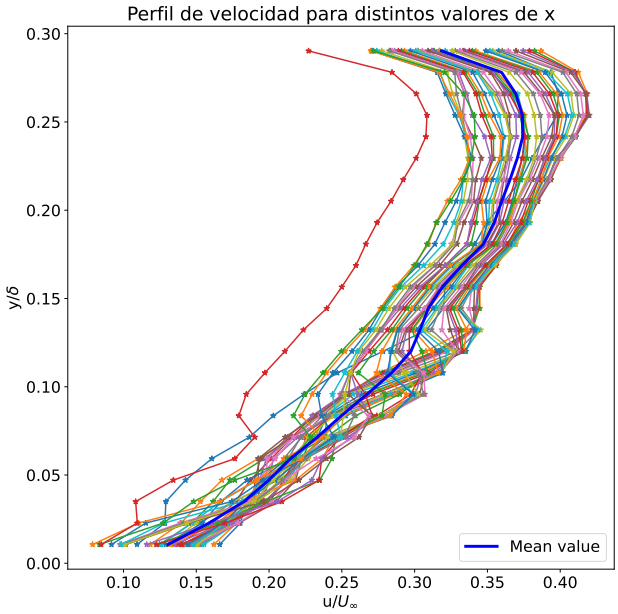


Figura 4.21: Perfiles de velocidades para cada columna

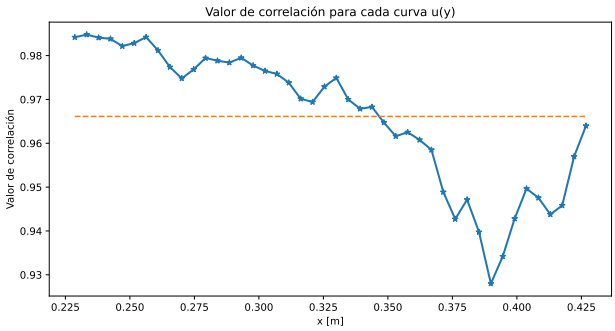


Figura 4.22: Curva de correlación entre perfiles de velocidades y perfil teórico

4.3.3.2. Flujo libre sobre una placa plana

El flujo libre es el que se desarrolla lejos de superficies sólidas, de tal forma que no se tienen los efectos de la capa límite.

Dado que dentro de la sección de trabajo se tienen 4 superficies sólidas, se desarrollará una capa límite en cada una de ellas. Para poder adquirir un flujo libre, es necesario colocar el trazador lo suficientemente alejado de las cuatro caras laterales, a una distancia mayor que la altura de la capa límite.

Para facilitar la adquisición de este flujo, se monta el sistema de adquisición cercano a la salida de la contracción. En dicha zona, se tiene alta uniformidad del flujo, bajos niveles de turbulencia y bajos espesores de la capa límite. Se estima que la altura de la capa límite se encuentra en torno al centímetro. El esquema de un flujo libre se presenta en la figura 4.23.

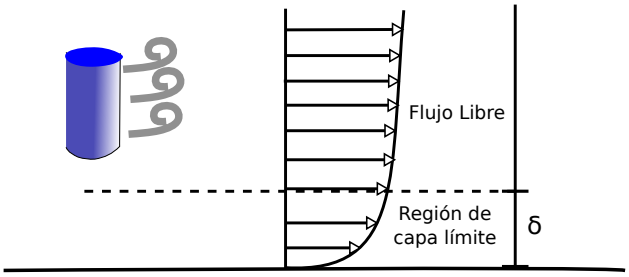


Figura 4.23: Esquema de un flujo libre

El propósito de analizar el flujo libre sobre una placa plana es que, la velocidad en cada punto del espacio debe tener la misma dirección y módulo.

Para el experimento se registra la velocidad media del túnel con un tubo pitot en el mismo momento que se adquiere el video, para obtener una curva de comparación con el resultado de flujo óptico, que se usará en otros experimentos. Las velocidades medidas por el tubo pitot y las velocidades presentes en el trazador, no tienen por qué ser las mismas. Esto se debe a que las secciones de pasaje son distintas y a que los equipos empleados para la adquisición de imágenes (cámara, láser y soporte del láser) reducen el área de pasaje del flujo. Por este motivo, esta configuración no es válida para calibrar la herramienta. El esquema de la adquisición se muestra en la figura 4.24.

Se realizan tres adquisiciones distintas a tres velocidades del túnel diferentes: 1,0 m/s, 2,2 m/s y 3,3 m/s (todas relevadas con el tubo pitot). El objetivo es comparar la velocidad media máxima obtenida con el flujo óptico respecto las velocidades medidas del túnel. Por lo cual en los tres videos, de aproximadamente 77 s, se selecciona la misma región de interés (ver figura 4.25).

Luego, se procesa flujo óptico en cada par de cuadros del video y se obtiene el campo de velocidades medio. En el flujo medio el valor de velocidad debe ser constante para todos los puntos y de valor U_∞.

Dado el campo de velocidad medio, se obtiene el valor de U_∞ promediando espacialmente todos los datos que están en la mitad superior del ROI, dado que presentan velocidades altas y poca variación de su módulo. De esta forma se evita

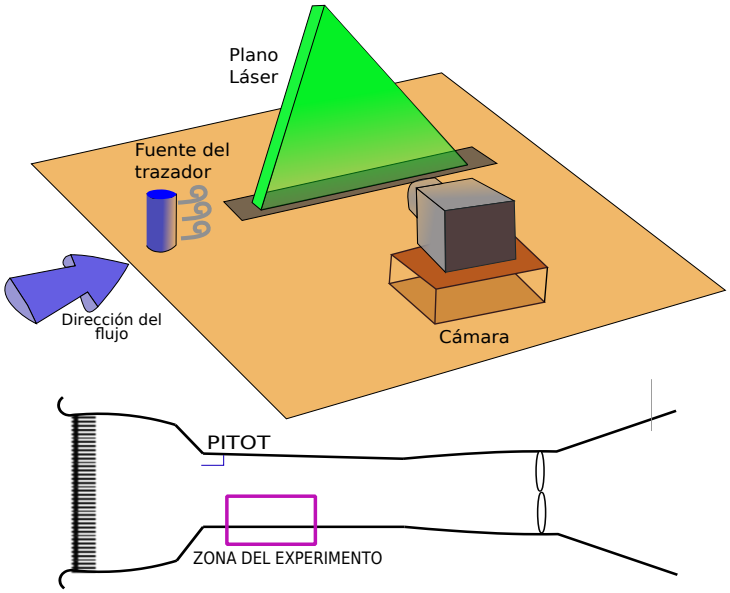


Figura 4.24: Esquema del ensayo para flujo libre

la interferencia del suelo y del aspersor de humo. Además, en los tres experimentos, en esta zona el trazador está presente en todo instante de tiempo. Analizando el campo de velocidad medio, de la región señalada, se obtiene la incertidumbre de U_∞ mediante la desviación estándar espacial. Este procedimiento es repetido para las tres adquisiciones.

En la figura 4.26 se presenta la curva de comparación, donde la línea punteada es la curva de ajuste. Para cada punto relevado, se plotea la incertidumbre obtenida, donde, en el eje horizontal es la incertidumbre del tubo pitot y en el eje vertical la incertidumbre calculada para las velocidades obtenidas mediante flujo óptico.

Analizando los resultados obtenidos en la figura 4.26, se destaca un comportamiento lineal de las velocidades procesadas respecto a las relevadas con el tubo pitot. A pesar de no disponer de las mismas velocidades en ambas secciones, si es esperado un comportamiento proporcional entre las velocidades en ambas secciones.

Las velocidades obtenidas mediante flujo óptico presentan altas incertidumbres respecto a las medidas del tubo pitot. Sin embargo, un análisis similar mediante la medición de velocidades en un flujo libre, puede ser empleado para realizar una calibración del instrumento.

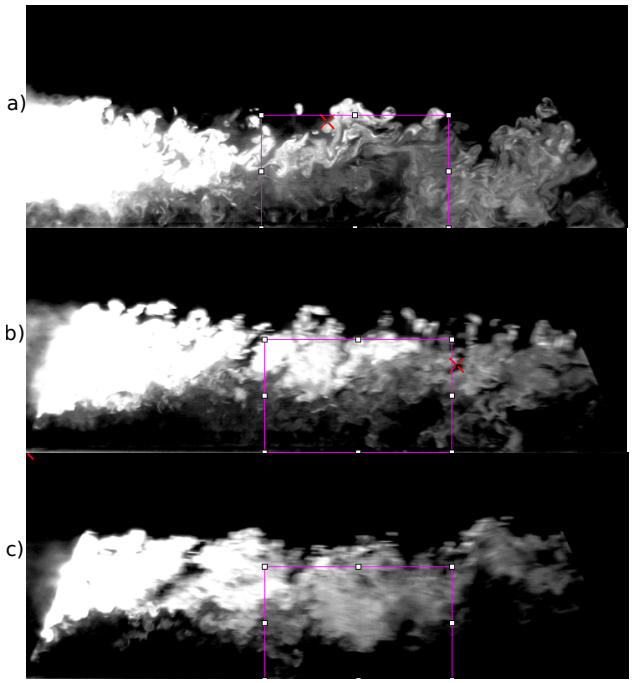


Figura 4.25: Región de interés seleccionada. a) Es una captura de la adquisición con la velocidad del túnel $u_\infty = 1{,}0\ m/s$, b) a $u_\infty = 2{,}2\ m/s$ y c) $u_\infty = 3{,}3\ m/s$

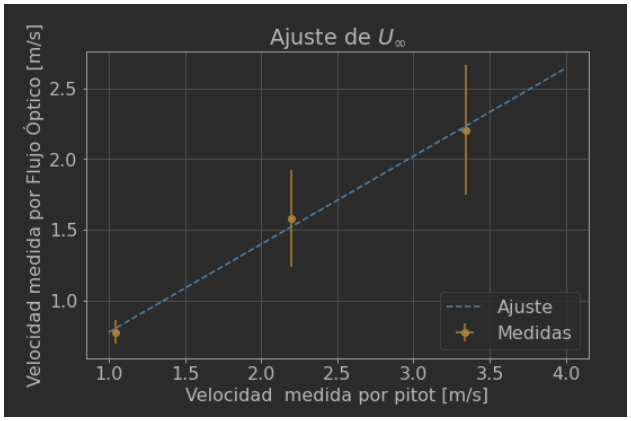


Figura 4.26: Comparación de valores obtenidos con flujo óptico vs reales.

4.4. Conclusiones

En las secciones anteriores fueron analizadas dos metodologías que permiten calcular el campo de velocidades plano, a partir de dos cuadros consecutivos en los cuales capturan el movimiento del fluido sembrado.

Las metodologías analizadas son las de `OpenPIV` y el algoritmo de Gunnar Farnebäck. El primero necesita un trazador particulado, y a partir de la correlación de ventanas obtiene la magnitud y dirección de la velocidad. Por otro lado, el algoritmo de Gunnar Farnebäck no requiere ningún trazador en particular, y calcula el desplazamiento aparente entre dos cuadros consecutivos. Este se centra en observar la vecindad de cada punto y utilizar una expansión polinomial.

Para comparar ambos métodos, se utilizan las mismas secuencias de imágenes para un flujo de tipo capa límite. Para cada caso, se calculan perfiles verticales de velocidades medias obtenidos por ambos métodos. Se compara la influencia de la presencia de trazador sobre los perfiles mediante un promedio espacial, dado que, teóricamente, la variación de los mismos es despreciable en la región de ensayos. Las curvas halladas se llevan a valores adimensionados y son comparados con un perfil teórico, el cual es relevado mediante anemómetro de hilo caliente. La correlación entre los perfiles procesados y el teórico es de 90 % para `OpenPIV` y de 98,5 % para flujo óptico.

La desviación del perfil medio de velocidad en el resultado de flujo óptico se mantiene aproximadamente constante para cada punto. Mientras que, en el caso de `OpenPIV`, los datos presentan mayor desviación a alturas mayores.

Al observar la concentración del trazador, esta se disipa a lo largo de la imagen, presentando mucha dispersión en los resultados en la zona superior del ROI. Esto indica que `OpenPIV` es más sensible a los cambios de concentración del trazador que el flujo óptico.

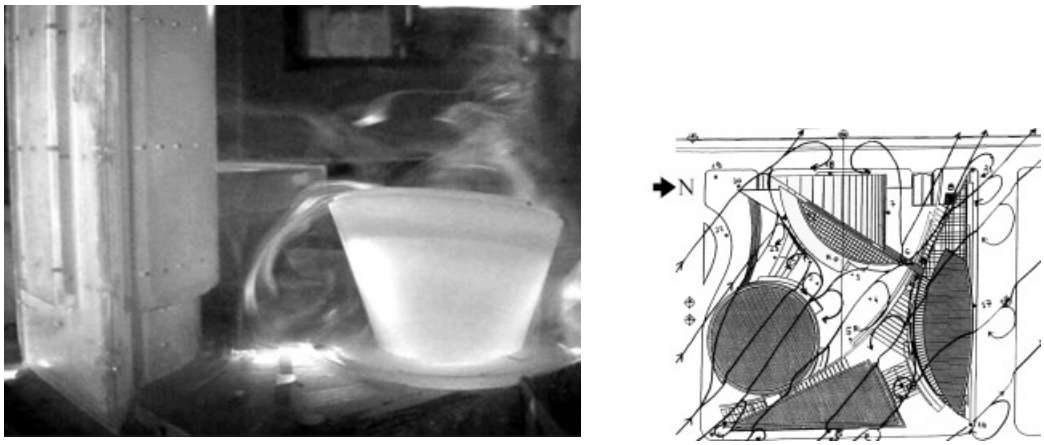
Los campos de velocidades obtenidos mediante la metodología de `OpenPIV` presentan valores de velocidad dos órdenes de magnitud menores a los esperados. Por otro lado, el flujo óptico obtiene valores de velocidad cercanos a los esperados.

Dado este primer análisis, se concluye que para la adquisición con trazador continuo, el algoritmo de Gunnar Farnebäck detecta mejor el fenómeno físico del flujo. Sin embargo, es necesario determinar cuantitativamente las incertidumbres presentes en el método. El algoritmo de `OpenPIV`, a pesar de presentar una correlación del 90 %, no obtuvo buenos resultados en este caso, pero cabe destacar que no se está utilizando el trazador recomendado.

Capítulo 5

Líneas de Flujo

Por ejemplo, para evaluar los efectos del viento sobre la Torre de las Telecomunicaciones de ANTEL realizada en los años 1997-1999, utilizando un modelo a escala en el túnel de viento [17]. En la figura 5.1(a) se observa una imagen de la etapa de visualización, la cual consiste en observar a baja velocidad el flujo alrededor de la torre con humo e iluminado con plano láser. Mediante las grabaciones es posible describir cualitativamente el flujo alrededor de la Torre, ver figura 5.1(b). Al identificarse las zonas más comprometidas desde el punto de vista del confort peatonal se seleccionaron alrededor de 20 puntos de medida.



a) b)

Figura 5.1: Estudio alrededor de la torre de comunicaciones de ANTEL [17]. a) Etapa de visualización, b)Patrón de flujo a nivel peatonal (viento SE)

La herramienta de dibujo de las líneas de flujo pretende reducir el tiempo destinado a analizar los videos, para obtener una descripción de forma cualitativa del flujo, y brindar apoyo a la toma de decisiones para la medición puntual. Para analizar los resultados obtenidos se realiza una comparación con el análisis visual, a partir de la filmación.

5.1. Obtención de las líneas de flujo

Las lineas de flujo verifican la ecuación (5.1).

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \tag{5.1}$$

Dónde (x, y, z) son las tres componentes del espacio, y (u, v, w) es el campo de velocidades.

Un posible método para generar computacionalmente las líneas de flujo está estudiado en [18]. La idea consiste en generar los puntos de inicio de cada línea de flujo, luego se evalúa el campo de velocidades en los mismos, y finalmente mediante integración numérica se calcula los demás tramos, tanto en a dirección del vector velocidad como en el sentido inverso. Una implementación similar es realizada por la función `streamplot` de la librería `matplotlib` de Python [19].

En la figura 5.2(a) se observa un campo de velocidad, y utilizando estos datos y por medio de la función `streamplot` se obtiene las líneas de flujo de la parte b.

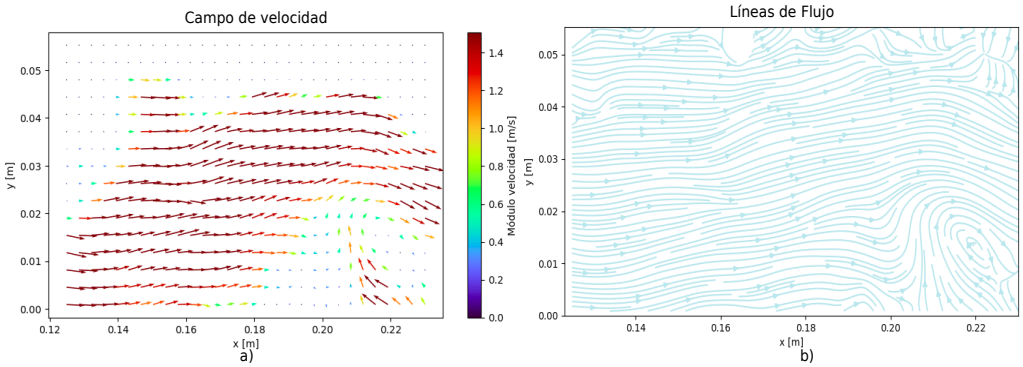


Figura 5.2: Ejemplo del procesamiento de líneas de flujo. En la parte a, se observa el campo velocidades y en la parte b sus correspondientes líneas de flujo.

Para utilizar esta función es necesario asignarle como parámetros los valores de posición, (x, y), y la velocidad en cada punto, (u, v). Además, introduce un parámetro para controlar qué tan cercanas están las líneas de flujo, este parámetro se denomina `density`(densidad).

Luego presenta varios parámetros opcionales, entre los que se destaca `start_points` (puntos de inicio), los cuales definen el comienzo de las líneas de flujo. En caso de no indicar los mismos, el algoritmo los genera.

5.2. Flujo en torno a un obstáculo

Este experimento se describe en la figura 5.3, donde se hace circular aire al rededor del obstáculo de forma prismática. Se visualiza la zona central del prisma donde, por simetría, el flujo debe ser aproximadamente bidimensional. Las dimensiones del prisma son 204 $mm \times 68\ mm \times 68\ mm$[1].

[1] Video de la adquisición.

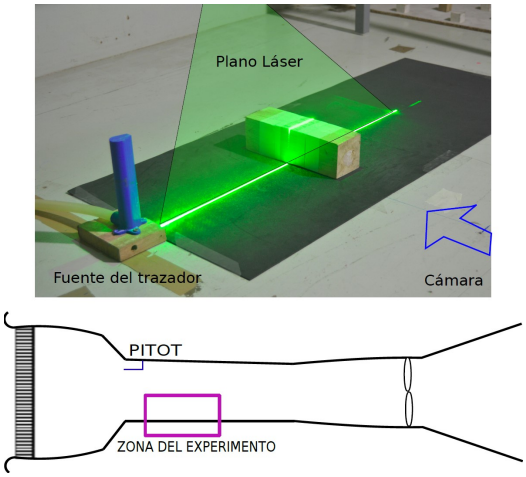


Figura 5.3: Imagen del experimento indicando componentes.

El experimento se realiza a una velocidad de $1,1\ m/s$ medido con el tubo pitot dispuesto como en la figura 5.3. El valor del número de Reynolds para el flujo alrededor del prisma, es del orden de $5,0 \times 10^3$, obtenido mediante (5.2).

$$Re_h = \frac{U_\infty\, h}{\nu} \tag{5.2}$$

En la ecuación anterior, U_∞ es la velocidad del flujo medida por el tubo pitot, h es la altura del prisma y ν es la viscosidad cinemática del aire.

5.2.1. Análisis de filmaciones

Es posible identificar varios patrones observando las imágenes adquiridas. Este proceso requiere varias horas de procesamiento de la imagen por un usuario calificado. El objetivo de la herramienta es reducir este tiempo, por este motivo, primero se analiza el video y se distinguen los patrones característicos del flujo, para comparar el desempeño observando las líneas de flujo. Al analizar las imágenes se diferencian 5 patrones:

1. Vórtice en la zona inferior izquierda del obstáculo.
2. Gran vórtice aguas abajo del objeto.
3. Pequeño vórtice aguas abajo del objeto.
4. Punto de estancamiento[2] del flujo en la zona media del obstáculo.
5. Desprendimiento de capa límite a partir de la arista superior izquierda.

En la figura 5.4 se observa el resumen de los patrones observados. Seguidamente, se describe un análisis a detalle de cada uno de ellos.

1. Vórtice aguas arriba

[2]En un punto de estancamiento, la velocidad del fluido idealmente es nula. Para este estudio se considera el punto de estancamiento aquel cuyas velocidades verticales y horizontales sean nulas.

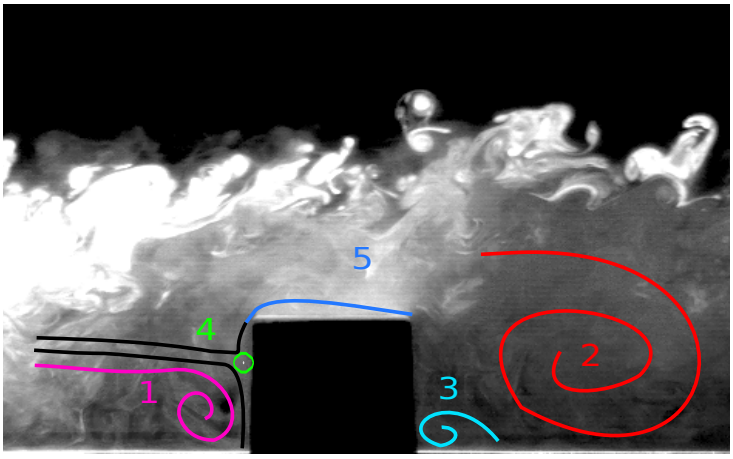


Figura 5.4: Cuadro de la grabación indicando cada uno de los patrones.

Este patrón se visualiza en la figura 5.5, donde se presenta una secuencia de imágenes, las cuales difieren de 0,01 s entre la toma de cada una de ellas. En este caso, el flujo realiza una rotación en sentido entrante al plano. Este patrón es posible observarlo con nitidez en varios momentos del video.

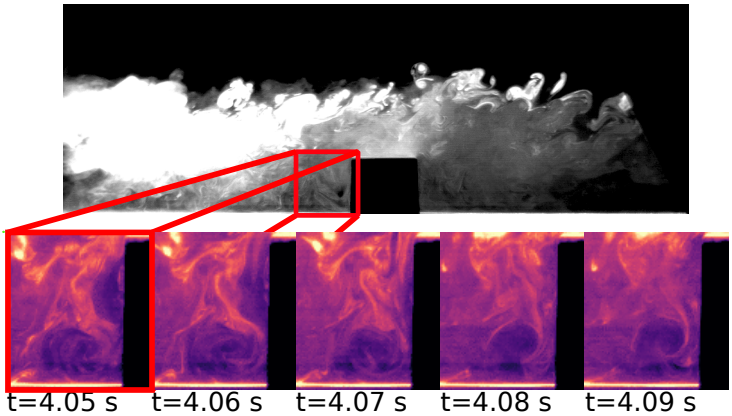


Figura 5.5: Secuencia de imágenes para el patrón 1.

2. Vórtice de gran dimensión aguas abajo

La secuencia de imágenes de la figura 5.6, destaca el patrón del vórtice, cuyas dimensiones varían, pero son del orden del obstáculo. Esta rotación es entrante al plano y es bastante recurrente dada la cantidad de trazador disponible en esa zona.

3. Pequeño vórtice aguas abajo

Este patrón es una rotación en sentido saliente al plano en la esquina inferior del cubo. El mismo es difícil de detectar dado que cuando hay trazador, el humo tiene poca variación. Sin embargo, en la secuencia de imágenes de la figura 5.7 se describe el mismo. Para detectarlo, es necesario esperar que el trazador ingrese a la zona baja de vórtice, por lo que no es un fenómeno recurrente de ver.

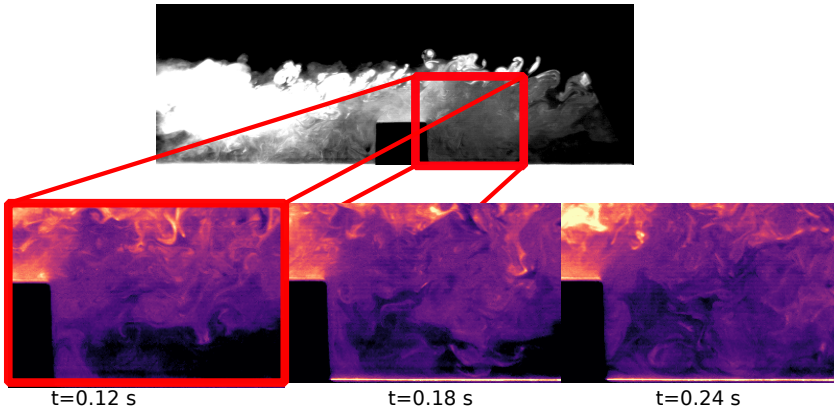


Figura 5.6: Secuencia de imágenes para el patrón 2.

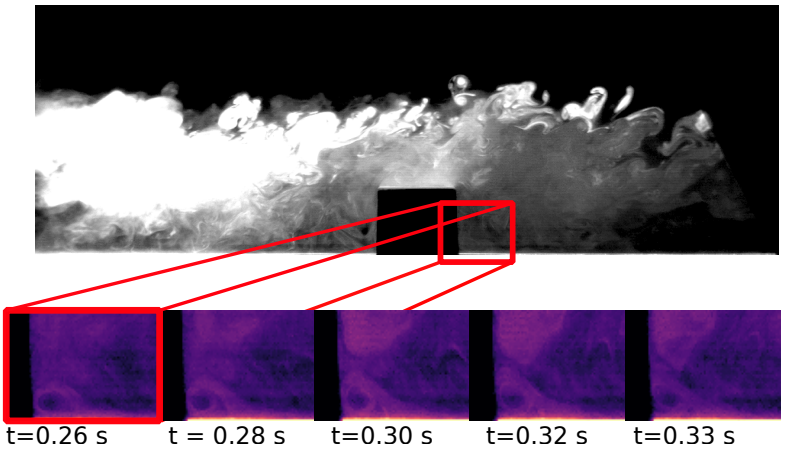


Figura 5.7: Secuencia de imágenes para el patrón 3.

4. Punto de estancamiento

El punto de estancamiento, se observa cuando el flujo evita la superficie del objeto, quedando una zona de velocidad aproximante nula sobre la pared del mismo. A pesar de que la existencia de un punto de estancamiento es evidente, al tener flujos que descienden hacia el vórtice y flujos que ascienden por encima del cubo, se puede concluir que existe un punto intermedio con velocidad vertical nula en la cercanía de la pared. Sin embargo, es difícil de detectar dada la fluctuación del vórtice aguas arriba del obstáculo que hace fluctuar la posición del punto en la dirección vertical. No obstante, la secuencia 5.8, muestra distintos puntos relevados para intervalos de 0,2 s donde se aprecia una parcela de fluido que impacta contra la pared y una fracción entra en el vórtice y la otra asciende.

5. Desprendimiento de capa límite

Finalmente, el último patrón se detecta en la figura 5.9. El cual es un fenómeno estacionario en el tiempo durante toda la filmación.

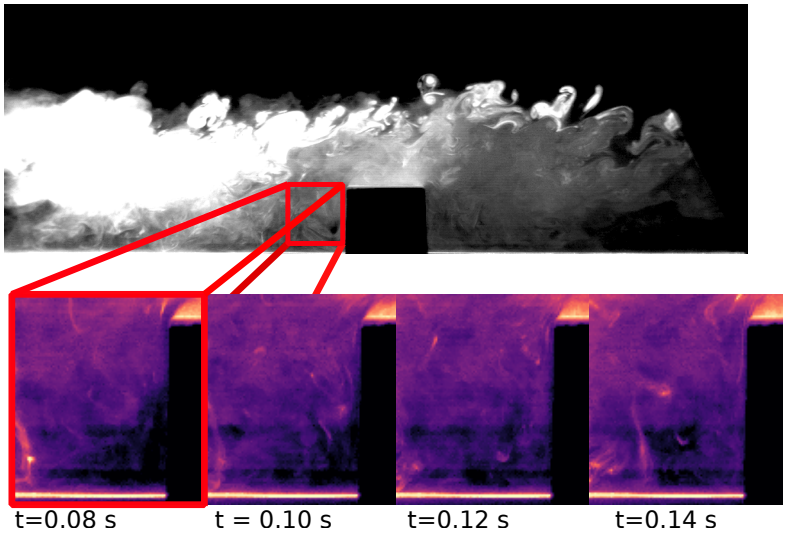


Figura 5.8: Secuencia de imágenes para el patrón 4.

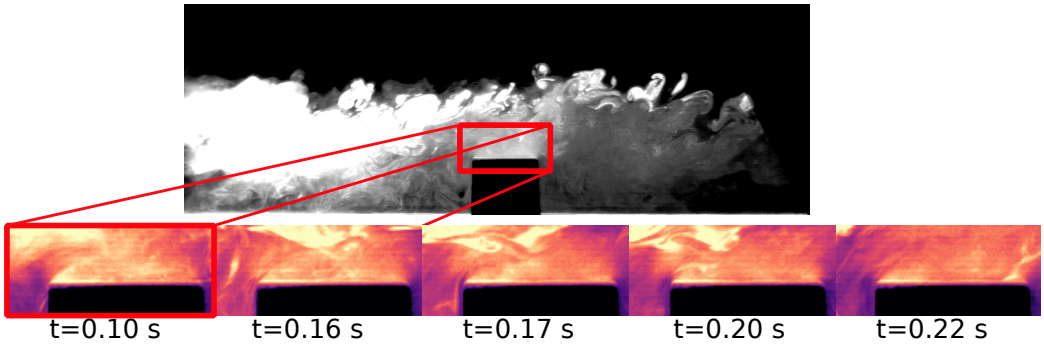


Figura 5.9: Secuencia de imágenes para el patrón 5

5.2.2. Líneas de flujo medio

Este flujo presenta características estadísticas estacionarias, por lo tanto, las líneas de flujo que mejor describen el fenómeno son aquellas trazadas a partir del campo medio de velocidades. De esta forma se elimina el efecto de la fluctuación turbulenta. El campo de valor medio de velocidades obtenido se presenta en la figura 5.10.

A partir del mismo se dibujan las líneas de flujo de la figura 5.11. Las mismas describen los cinco patrones del movimiento del fluido ya mencionados, estos se expresan a continuación y en la figura 5.12.

1. Vórtice en la zona inferior izquierda del obstáculo. Rotación en sentido entrante al plano y el diámetro es aproximadamente de la mitad del obstáculo.
2. Gran vórtice aguas abajo del objeto. Rotación en sentido entrante al plano y tamaño del orden de la altura del obstáculo.
3. Pequeño vórtice aguas abajo del objeto. Rotación en sentido saliente al plano y tamaño diez veces menor a la altura del objeto.

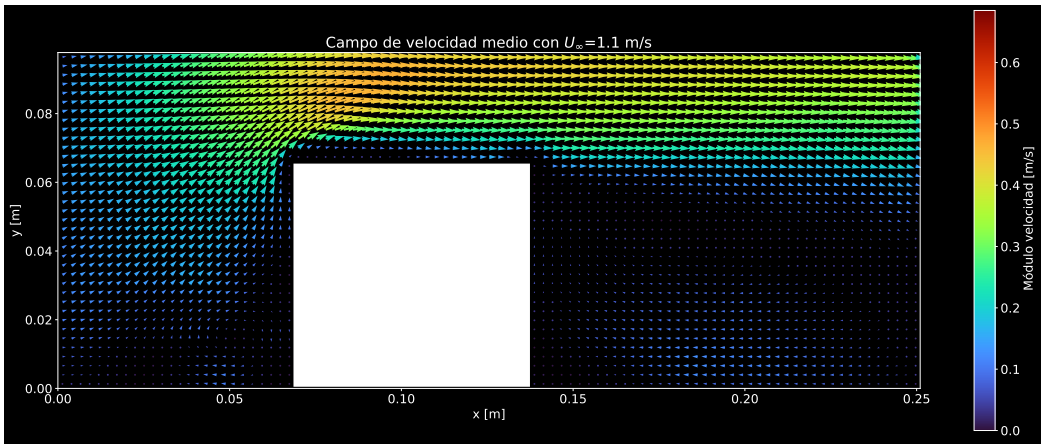


Figura 5.10: Campo medio de velocidades para una velocidad media de 1,1 m/s

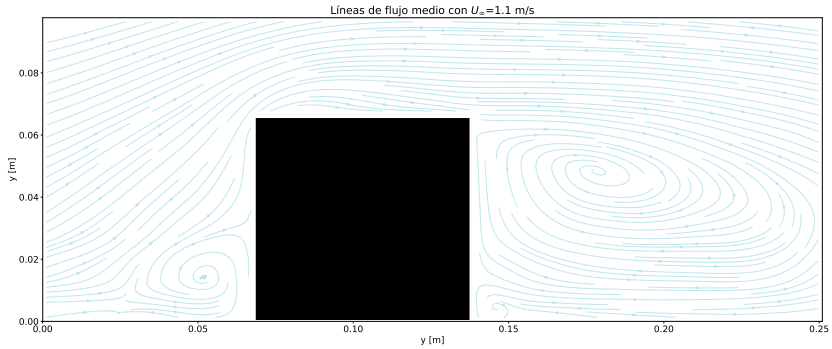


Figura 5.11: Líneas de flujo para el campo de velocidades medio

4. Punto de estancamiento del flujo en la zona media del obstáculo.
5. Desprendimiento de capa límite a partir de la arista superior izquierda.

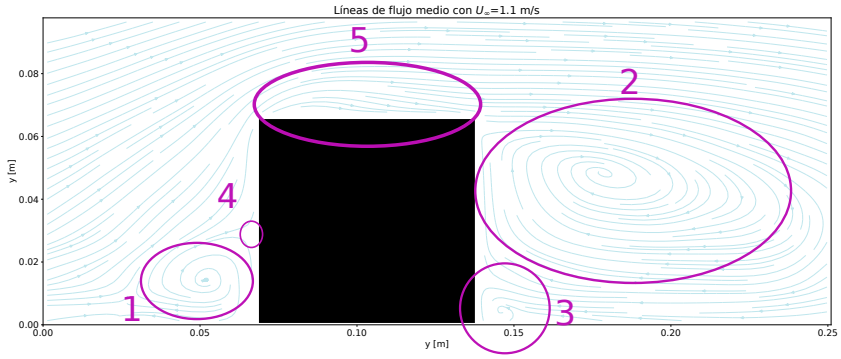


Figura 5.12: Patrones principales del flujo descrito mediante líneas de flujo del campo medio de velocidades.

Por lo tanto, en este caso es posible, al observar las líneas de flujo medio, encontrar los mismos patrones obtenidos al analizar el video.

5.2.3. Comparación con estudio numérico

A modo de reforzar los patrones obtenidos, se compara con el estudio realizado por [20], el cual analiza una simulación de un flujo en torno a un cubo.

La dificultad de realizar dos experimentos comparables, radica en la amplia cantidad de variables que describen este tipo de flujo, como Reynolds para el cubo (Re_h), el Reynolds del flujo interior al túnel de viento (Re_D), la relación entre la altura de la sección de trabajo (H) y la del cubo (h). Además, para poder comparar los resultados, es necesario tener las mismas condiciones en la capa límite que incide al objeto, en el caso de simulación el flujo es completamente desarrollado[3], mientras que para la adquisición no. La comparación de estos valores se describen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Comparación de los parámetros del flujo

Variable	Ensayo en túnel de viento	Simulación numérica
Re_h	5000	1870
Re_D	165000	5610
H/h	33	3

Si bien en el artículo se menciona que para los valores de Re_h entre $2000-7000$, no se encuentran diferencias sustanciales en la visualización del flujo, no se puede garantizar las mismas condiciones debido a las demás diferencias. Sin embargo, este resultado permite comparar cualitativamente los patrones encontrados en este tipo de flujo.

En la figura 5.13 se detallan las líneas de flujo medio calculadas por este estudio, en la cual pueden identificarse todos los patrones analizados en las filmaciones, así como un comportamiento cualitativo de las líneas de flujo.

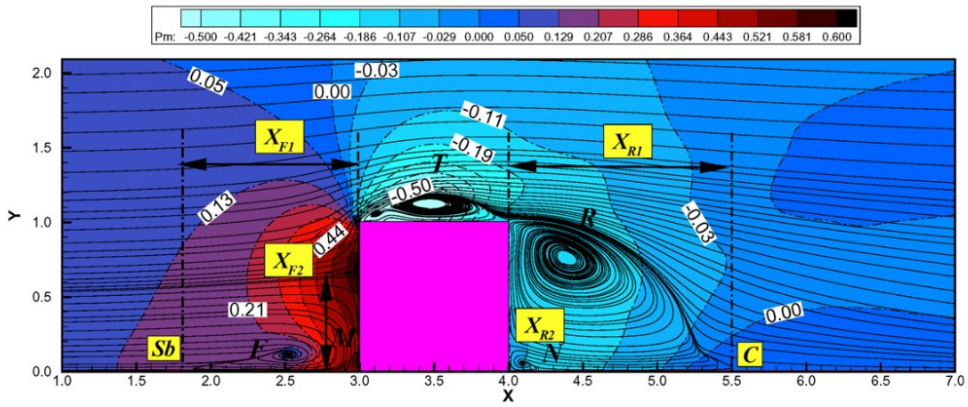


Figura 5.13: Líneas de flujo medio estudiadas por [20]

[3]En flujos que escurren en el interior de ductos, se forman capas límites sobre las paredes que crecen a medida que se avanza en la dirección del movimiento. Luego que estas se juntan, se transforma en un flujo completamente desarrollado.

En la figura se denomina cada patrón con un nombre, donde el vórtice aguas arriba es $F(front)$, el vórtice sobre la caja es $T(top)$, y detrás de la caja $R(rear)$, todos girando en sentido horario. Además, identifica dos vórtices antihorarios M y N. En el fondo se ilustran por medio de colores el rango de valores de presiones y detalla el conjunto a isolíneas de presiones. Luego se presenta, datos sobre las dimensiones de los patrones, los cuales no son de interés para nuestro razonamiento por las diferencias en el flujo detalladas anteriormente.

Los patrones F, R, N, son similares a los descritos por la herramienta en la figura 5.12 señalados como 1, 2 y 3. En el caso del patrón T, la detección en 5 identifica una separación de capa límite; sin embargo, no se observa un vórtice en dicha zona. A lo que refiere al patrón 4, se observa el mismo comportamiento de las líneas de flujo, sin embargo, a mayor altura que en la detección. Además, el punto puede identificarse observando las presiones, dado que en un punto de estancamiento la reducción en velocidad se transforma en un incremento de presión.

5.2.4. Límites de la herramienta

Para la misma configuración descrita en la parte anterior, se realizan dos adquisiciones variando la velocidad media del túnel a: 2,2 m/s y 3,4 m/s.

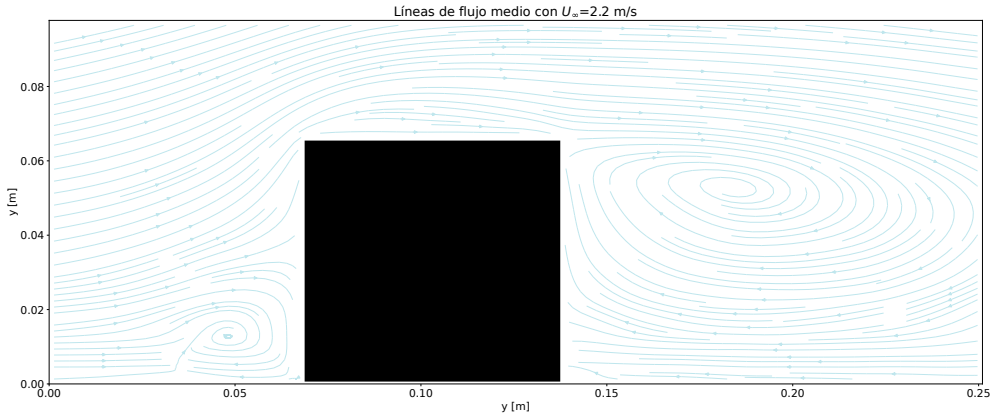
Primariamente, se observa que al aumentar la velocidad del flujo, el trazador no llega a zonas cercanas del piso. Además, la imagen es más borrosa y los movimientos de patrones más lentos no se observan.

Al procesar los datos con la herramienta, se obtienen las líneas de flujo medio descritas en las figuras 5.14 parte (a) y (b).

En ambas figuras se observa el patrón 2, un gran vórtice aguas abajo del objeto. En la primera figura, es posible observar el vórtice aguas arriba del objeto y el desprendimiento de la capa límite. Mientras que estos patrones ya no son notorios para el resultado con mayor velocidad.

En estos casos, la herramienta está condicionada por la etapa de adquisición, ya que no se cumple con el requisito de calidad óptima descrito en la sección 3.3.6, en ambos experimentos $\frac{R}{FPS} = \frac{1513{,}75}{250} \approx 6$, por lo tanto, para el caso a velocidad $2,2\ m/s$ presenta una calidad intermedia($4,5 < \frac{R}{FPS} < 9$) y el caso a velocidad $3,4\ m/s$ la calidad de imagen es baja ($\frac{R}{FPS} > 5,4$). Además, otro problema al aumentar la velocidad, es que el trazador evita la zona al ras del suelo, por lo que existen zonas sin trazador.

a)



b)

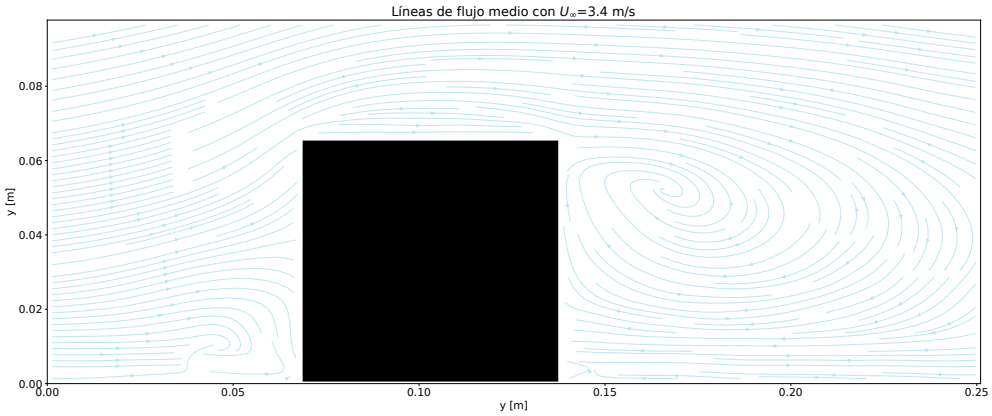


Figura 5.14: Líneas de flujo a velocidad a)$2{,}2\ m/s$ y b)$3{,}4\ m/s$

5.3. Ensayo aerodinámico: Modelo a escala de un vehículo

En esta sección se analiza la herramienta de líneas de flujo con un obstáculo aerodinámico de mayor complejidad. Para ello se emplea un modelo a escala del Ferrari 458 Italia [21] descrito en la figura 5.15[4].

Figura 5.15: Modelo a escala del automóvil.

Para relevar este experimento se realizaron los procedimientos explicados en la sección 3, un diagrama de la adquisición se observa en la figura 5.16, en este caso el área de interés es el plano transversal del auto.

Un ejemplo de adquisición se observa en la figura 5.17, como en casos anteriores, se observa la misma con el mapa de colores magma.

La presente visualización se aparta de los ensayos aerodinámicos realizados en automóviles, dada las bajas velocidades alcanzables por la herramienta. Los valores de Reynolds alcanzados son bajos, del orden de 10^3. Sin embargo, su geometría compleja presenta un desafío para la herramienta de visualización, por lo que se analiza de forma similar al flujo en torno a un obstáculo de la sección 5.2.

5.3.1. Análisis de filmaciones

Primeramente, se analiza el flujo mediante las filmaciones para detectar todos los patrones vistos en este flujo complejo. Para esta parte, se indican los patrones en la figura 5.18. A diferencia de la sección 5.2, se obvia el trabajo exhaustivo de la detección de cada patrón.

Los patrones detectados luego de analizar las filmaciones son:

1. Punto de estancamiento en la parte superior de la toma de aire.
2. Contracción debajo del punto de estancamiento, ya que parte del flujo pasa por debajo del vehículo.

[4]Video de la adquisición.

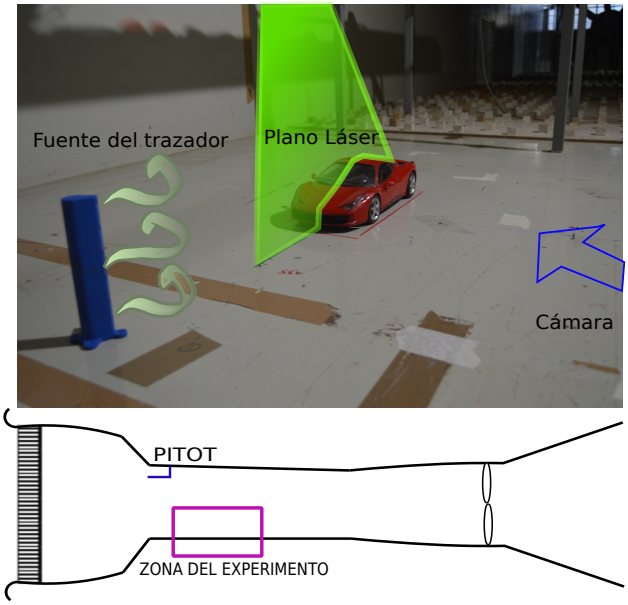


Figura 5.16: Esquema de adquisición del experimento.

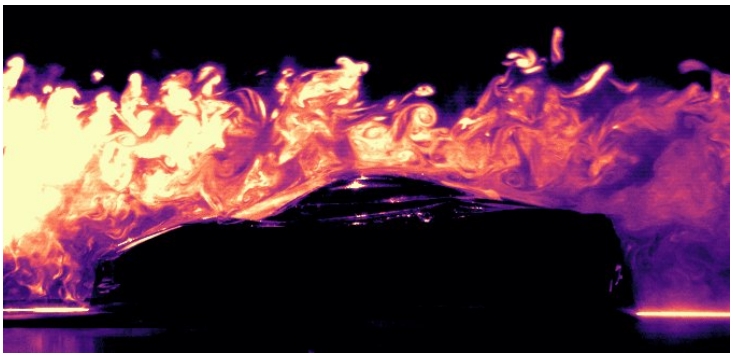


Figura 5.17: Cuadro de adquisición del flujo en torno al automóvil.

3. Leve desprendimiento de capa límite debido al cambio de dirección entre el capó y el parabrisas.
4. Leve desprendimiento de capa límite en el parabrisas trasero, por la difusión debida al cambio de la sección de pasaje del flujo.
5. Vórtice aguas abajo, por la expansión abrupta de la sección de pasaje del flujo.
6. Aceleración del flujo en la zona superior al automóvil, debida a la obstrucción generada por el obstáculo.

Además de los patrones detectados anteriormente, se reconoce que no es posible identificar el flujo de aire que circula debajo del automóvil, debido a la falta de luz en dichas zonas.

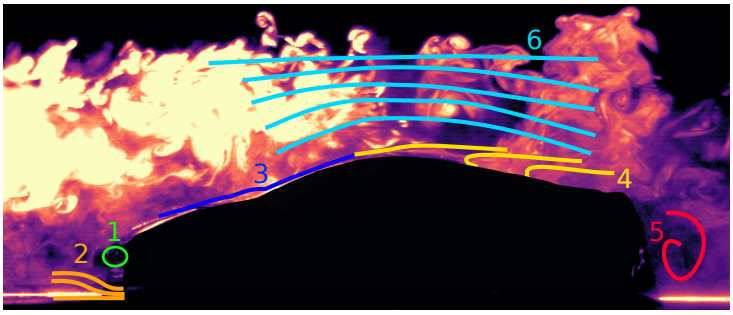


Figura 5.18: Patrones de flujo detectados sobre el automóvil.

5.3.2. Líneas de flujo medio

Procesando las imágenes adquiridas a 500 FPS por el transcurso de aproximadamente 77 s, se obtienen los campos de velocidades instantáneos. Promediando temporalmente los campos de velocidades se obtiene el campo de velocidad medio, a partir del mismo se obtiene las líneas de flujo medio de la figura 5.19.

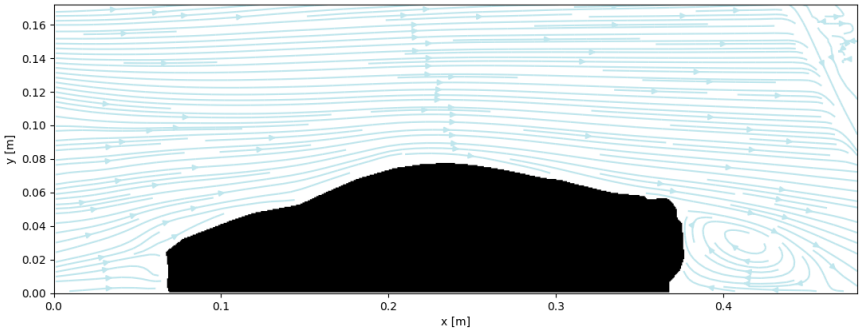


Figura 5.19: Líneas de flujo obtenidas para el campo medio

Analizando las líneas de flujo obtenidas luego del procesamiento, es posible identificar a simple vista los patrones 1, 2, 5 y 6. Sin embargo, para los patrones 3 y 4 se debe observar más en detalle.

En el caso del cambio de dirección en el capó, se puede ver cómo la línea de flujo más cercana a la superficie termina abruptamente en una zona libre de líneas. Justo por encima de esta, el flujo acompaña la forma aproximada del obstáculo. También, es posible identificar la curvatura del flujo en torno al punto anguloso entre el capo y el parabrisas, lo que refleja la existencia de gradientes adversos de presión. Por lo tanto, se puede decir que la pequeña zona de desprendimiento de capa límite es captada por el procesamiento.

Con respecto al patrón de flujo 4, no resulta clara la zona que se desea caracterizar. De todas formas, se puede distinguir un cambio en la proximidad de las líneas de flujo en la zona más próxima al auto. Esto es consecuencia de que

la velocidad media es ligeramente menor en esa zona, producto del incremento de turbulencia que se da allí.

5.3.3. Comparación de resultados con estudio de referencia

Con el objetivo de aportar mayor validez al análisis realizado, se busca un estudio similar. En este caso se destaca [22] para el cual se modela el mismo vehículo con un método de dinámica de los fluidos computacional[5], en sus siglas en inglés CFD. Es importante destacar que más allá de que las condiciones de flujo simulado son distintas en ambos análisis (números de Re de orden de magnitud distintos) se pueden distinguir los mismos patrones identificados en el experimento del túnel de viento.

Esta comparación se realiza observando en detalle el esquema con los módulos de velocidad y presión (ver figuras 5.20 y 5.21 tomadas de la bibliografía mencionada).

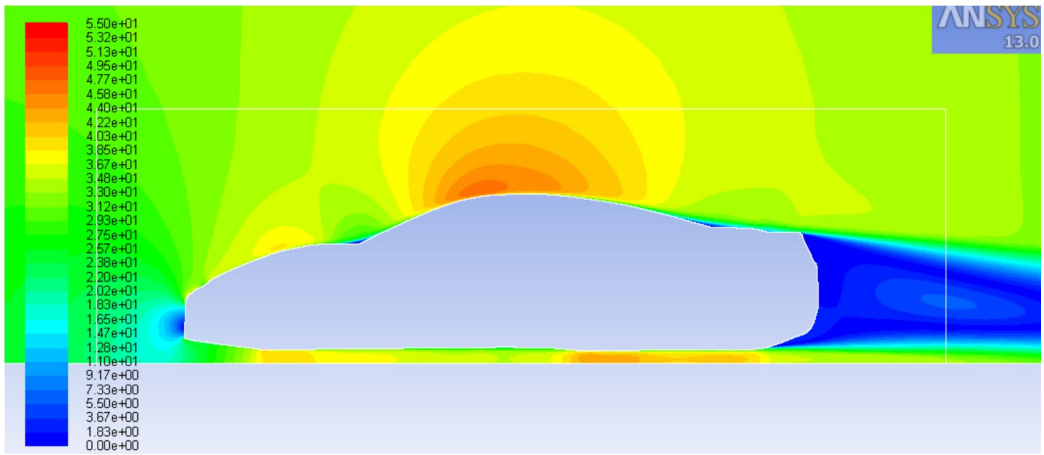


Figura 5.20: Módulo de campo de velocidades

A partir de estos datos, se puede apreciar cómo la velocidad es menor en las zonas donde se estanca el flujo, al igual que donde se dan mayores presiones. Este resultado es comparable con los patrones observados en la zona del parabrisas y la ventana trasera mencionados en la sección anterior.

Así mismo, la contracción de las líneas de flujo obtenidas se presentan en las mismas zonas donde se incrementa el módulo de la velocidad. Esto se corresponde con lo esperado a partir del procesamiento de datos y visualización. Por lo tanto, estos resultados concuerdan con la contracción que se observa en la parte delantera del vehículo y por encima de este.

Por último, se destaca que en la parte trasera, el vórtice presente en la figura 5.19 se corresponde con la baja velocidad y presiones propuestas por el CFD. Estas

[5]La Dinámica de fluidos computacional es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos

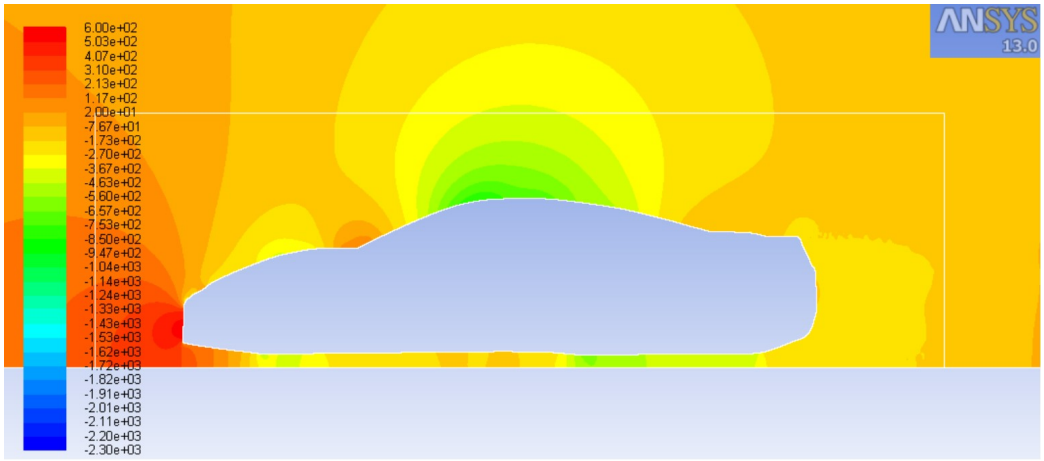


Figura 5.21: Módulo de campo de presiones

características son propias de una estela turbulenta con presencia de un vórtice de gran escala.

5.4. Conclusiones

La herramienta de líneas de flujo muestra los patrones fundamentales del movimiento, los cuales son identificados en los videos. Sin embargo, la misma está limitada por la falta de trazador, la velocidad del flujo y la posible inexistencia de luz en la zona a analizar.

El movimiento de un flujo alrededor de un prisma, es un experimento sencillo de realizar y sus patrones son fáciles de distinguir en las imágenes. El desempeño de la herramienta es satisfactorio, logrando con mayor facilidad visualizar el punto de estancamiento en las líneas de flujo que observando el video. Sin embargo, al aumentar la velocidad característica del experimento, el desempeño de la herramienta baja.

En lo que respecta al vehículo, algunos patrones (como el 4 que muestra el desprendimiento de capa límite en el vidrio trasero) no resultan tan fácilmente identificables. No obstante, al comparar cualitativamente los resultados con un análisis similar se le aporta validez a los resultados.

A partir de los análisis para el flujo en torno al obstáculo y al vehículo, se puede concluir que la herramienta permite apreciar adecuadamente los patrones fundamentales del flujo, lo cual permite ayudar en el análisis del mismo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Detección Vórtices

6.1. Introducción

La detección de vórtices constituye una herramienta adicional para el análisis de un flujo. En muchos casos, durante la visualización se busca saber el tamaño de vórtices generados al rededor de una estructura o los que inciden en la misma, aportando directamente a la calidad del estudio. Como se menciona en el capítulo 5, el análisis de estructuras vorticosas se realiza primero a partir de ensayos de visualización con trazador, analizando visualmente las estructuras formadas por el trazador, o mediante filmaciones. Para este proyecto, dado que se analiza el campo de velocidades medio generado por la herramienta, solamente se busca detectar vórtices cuya posición sea fija en el espacio.

6.2. Vortexfitting

Esta sección se basa en la herramienta `vortexfitting`, cuyo código fue validado detectando un vórtice columnar como se describe en [23].

6.2.1. Método de detección de vórtices

Este es un software aún en desarrollo, en el que se aplican tres de los criterios más importantes de detección de vórtices [5] (artículo en el cual se basa esta sección):

- Criterio Q
- Criterio Δ
- Swirling Strength

Todos los criterios se basan en la información contenida por la matriz $\mathbf{D} = \nabla\mathbf{v}$, esta se puede expresar como la suma de una componente simétrica S y otra asimétrica Ω. La primera representa las deformaciones diferenciales establecidas en

el fluido, mientras que la segunda representa la rotación rígida sobre cada elemento diferencial del fluido. Partiendo de esta matriz **D**, se analizan los valores propios mediante (6.1). Cada componente queda definido en las ecuaciones (6.2) - (6.4).

$$\lambda^3 + P\lambda^2 \ + \ Q\lambda \ + \ R = 0 \tag{6.1}$$

$$P \ = \ -tr(\mathbf{D}) \tag{6.2}$$

$$Q \ = \ \frac{1}{2}(tr(\mathbf{D})^2 - tr(\mathbf{D}^2)) \tag{6.3}$$

$$R \ = \ -det(\mathbf{D}) \tag{6.4}$$

El criterio Q, busca los valores positivos de la función Q (6.3). Esta es una medida local del exceso de la razón rotación respecto a la velocidad de deformación [5].

El criterio Δ define a los vórtices como regiones en las cuales dos de los valores propios de **D** son complejos y las líneas de flujo son espirales o cerradas. Para ello se buscan valores con $\Delta \ > \ 0$, con Δ definido según (6.5), donde R se define como (6.4). [5]

$$\Delta \ = \ \left(\frac{Q}{3}\right)^3 \ + \ \left(\frac{R}{2}\right)^2 \tag{6.5}$$

El último criterio se basa en la idea que en la región donde se encuentre el núcleo de un vórtice, se puede descomponer la matriz **D** según la forma descrita en (6.6) en coordenadas cartesianas. Donde λ_r es el valor propio real correspondiente al vector propio $\mathbf{v}_r$, $\lambda_{cr} \pm \lambda_{c_i} i$ el par conjugado complejo de valores propios cuyos vectores propios complejos asociados son $\mathbf{v}_{cr} \pm \mathbf{v}_{ci} i$. Además, la fuerza del giro local es cuantificado mediante λ_{ci}, el cual es la parte imaginaria del valor propio complejo, que se define como *swirling strength.*

$$\mathbf{D} \ = \ [\mathbf{v}_r \ \mathbf{v}_{cr} \ \mathbf{v}_{ci}] \begin{bmatrix} \lambda_r & & \\ & \lambda_{cr} & \lambda_{ci} \\ & -\lambda_{ci} & \lambda_{cr} \end{bmatrix} [\mathbf{v}_r \ \mathbf{v}_{cr} \ \mathbf{v}_{ci}]^T \tag{6.6}$$

Eligiendo un criterio, se buscan los máximos locales de la variable del criterio escogido (Q, Δ o λ_{ci}) para todo el dominio. Estos ubican la posición aproximada del centro del vórtice. Es realizado un ajuste por mínimos cuadrados con un modelo estándar de vórtice propuesto por los autores, denominado vórtice de Lamb Oseen (6.7)[1].

$$\mathbf{u(r,t)} \ = \ \mathbf{u_c} + \frac{\Gamma}{2\pi r}\left[1 \ - \ e^{-\left(\frac{\Gamma}{r_0(t)}\right)^2}\right] \overline{\mathbf{e}}_\theta \tag{6.7}$$

$$r_0(t) \ = \ \sqrt{4\nu t} \tag{6.8}$$

[1]Este modelo presenta la diferencia con el vórtice de Rankine desarrollado en la sección 2.3.3 por no presentar un punto anguloso en la unión entre la región irrotacional con la rotacional.

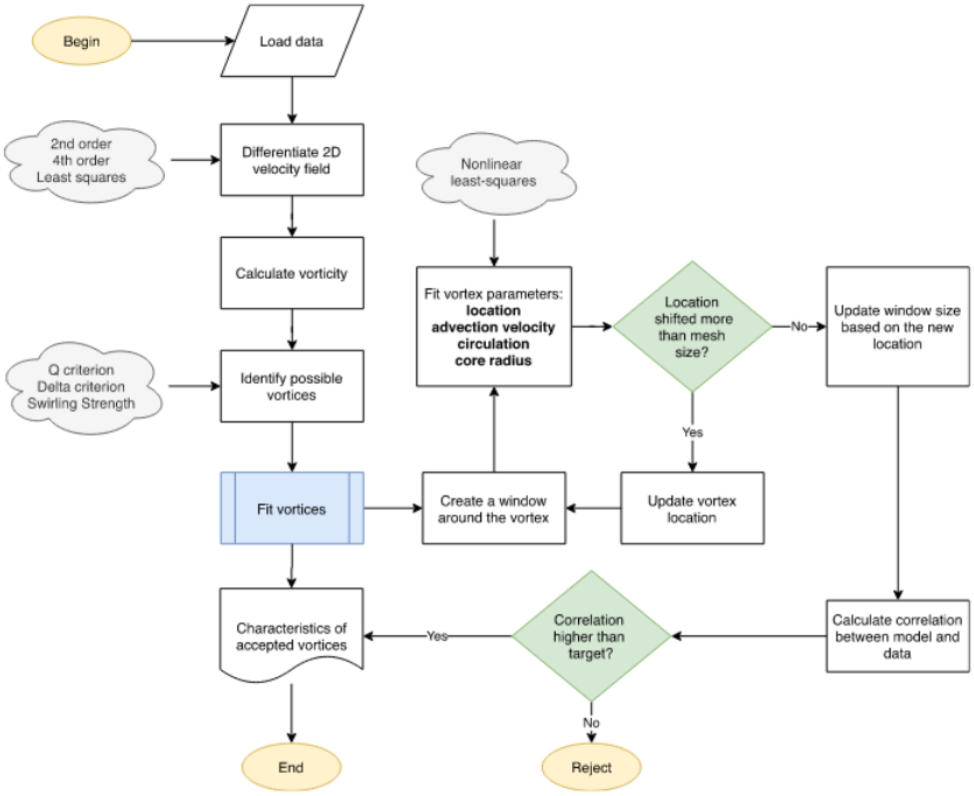


Figura 6.1: Diagrama de flujo del programa principal de `vortexfitting` [5].

Donde $\mathbf{u_c}$ es la velocidad con la que se traslada el centro del vórtice, Γ su circulación, r la coordenada radial en coordenadas polares, ν la viscosidad cinemática, r_o el radio del núcleo del vórtice y $\mathbf{e}_\theta$ es el versor tangencial a la circunferencia en el radio r.

El ajuste realizado devuelve un valor de correlación, este es utilizada posteriormente, para eliminar candidatos a vórtices cuyos ajustes se encuentren por debajo de cierto umbral de correlación especificado por el usuario.

6.2.2. Implementación

El proceso general de detección de vórtices está descrito en el diagrama de flujo de la figura 6.1. A continuación se describe paso a paso como el software detecta vórtices a partir de un campo de velocidades.

Primero se realiza el cálculo de vorticidad, siguiendo la ecuación:

$$\omega = \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \tag{6.9}$$

Para el cálculo de derivadas propone tres métodos: utilizando un filtro de segundo orden, de primer orden y mínimo cuadrados, determinando el mismo mediante el parámetro `scheme`.

Luego, genera el campo de detección(*detection field*), el cual es el resultado de los criterios mencionados anteriormente: criterio Q, *swirling* y delta. El usuario define los mismos mediante el parámetro `detection_method`.

Seguidamente, utiliza el filtro de la librería `SciPy`: `maximumfilter` sobre el campo de detección, es decir, recorre la imagen utilizando una ventana de tamaño `box_size` y va seleccionando el máximo local. Este máximo local es un candidato a ser centro de un vórtice, ya que el criterio utilizado da un valor alto localmente. Además, se debe cumplir que todos los máximos locales sean positivos, por lo que se filtran todos aquellos negativos. La herramienta permite aplicar un filtro más restrictivo sobre los resultados, eliminando aquellos máximos locales menores a `detection_threshold`. Luego, con el dato de vorticidad en el punto se permite saber si el giro del candidato es horario o antihorario.

Para obtener los vórtices se realiza, para cada punto seleccionado en la parte anterior, un proceso iterativo para obtener las características del mismo, estas son: el radio del núcleo del vórtice, circulación, posición y velocidad del centro del vórtice. Luego, se calcula la correlación con el modelo teórico, y si la misma supera el umbral de `correlation_threshold`, se considera que se ha detectado con éxito el vórtice.

El proceso iterativo para obtener las características de un vórtice en un punto, comienza con el cálculo de la circulación en el mismo.

$$\Gamma \;=\; \omega A \;=\; 2\,\omega\,\pi\,r^2 \tag{6.10}$$

Donde ω es la vorticidad en el centro y r el radio del núcleo del vórtice. Para la primera iteración, el usuario puede definir el radio inicial mediante `initial_r`.

Alrededor del punto se define una ventana, cuyo tamaño equivale al radio del vórtice. Seguidamente, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados no lineal, donde se ajustan los datos de la ventana con un vórtice caracterizado por la ecuación de Lamb-Oseen. Mediante este ajuste se actualizan los valores de: radio del núcleo del vórtice, circulación, posición y velocidad del centro del vórtice.

El procedimiento explicado se repite hasta que el valor del radio varíe menos de un 10 % o si la posición del centro del vórtice sale de la ventana definida. En el último caso, se considera que no es posible encontrar un vórtice para el punto.

Para evaluar todos los vórtices encontrados, se comparan con el modelo teórico y se calcula la correlación. Si dicha correlación supera el umbral definido por el usuario, `correlation_threshold`, se considera que es un vórtice válido.

Al agregar esta funcionalidad a la herramienta VIV, se realizan modificaciones a los vórtices detectados. Por un lado, se descartan aquellos vórtices cuyos centros se encuentran cerca del borde de la imagen. Por otro lado, se descartan todos los vórtices cuyo diámetro sea mayor al lado menos predominante de la imagen, por ejemplo, si se tiene una imagen más larga que ancha, se eliminan todos los vórtices cuyo diámetros superen el ancho de la imagen. Por último, se descartan vórtices con similares valores de radio y posición del centro.

6.3. Análisis de resultados

Durante el desarrollo de los análisis se utilizan los valores predeterminados a excepción que se indique lo contrario. Los valores predeterminados están expresados en la tabla 6.1.

Parámetros	Valor predeterminado
`scheme`	lsq
`method`	swirling
`detection_threshold`	0
`box_size`	10
`initial_r`	10
`correlation_threshold`	0.6

Tabla 6.1: Tabla con valores predeterminados de `vortexfitting`.

Para analizar los resultados de la detección de vórtices, se analiza el video de un prisma de base rectangular, ya trabajado en otras secciones.

Para evitar efectos transitorios, se considera el campo de velocidad promediando 0,2 s utilizando una grilla espacial separada cada un píxel. Lo cual es computacionalmente costoso, pero se realiza para evitar errores en la detección de vórtices. Observando todos los resultados de líneas de flujo obtenidas al realizar la media móvil, con los siguientes parámetros: `windowsize=100` y `step=50`. En la figura 6.2, se selecciona las líneas de flujo obtenidas promediando los resultados de $t = 0{,}2\ s$ a $t = 0{,}4\ s$.

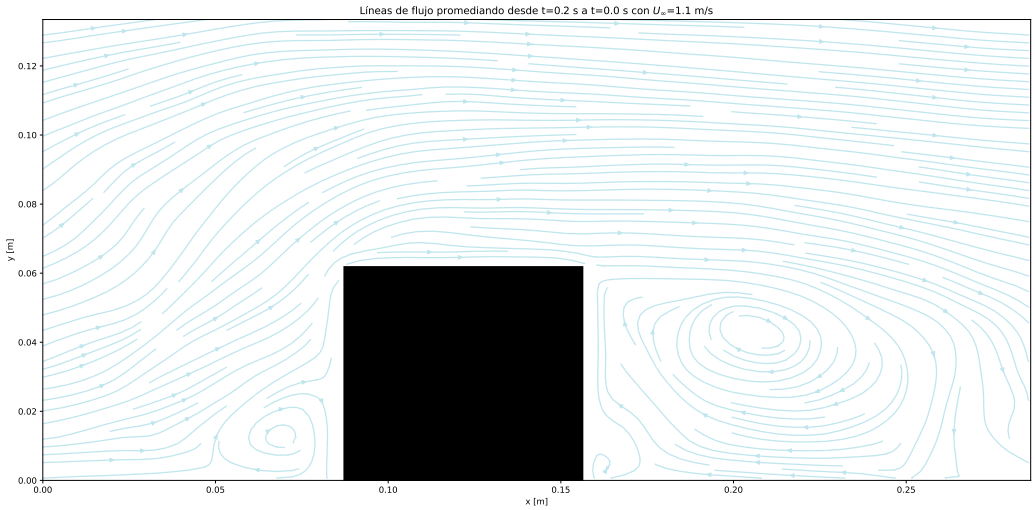


Figura 6.2: Líneas de flujo promediando los resultados obtenidos desde $t = 0{,}2\ s$ a $t = 0{,}4\ s$.

Primero, se plantea el objetivo de encontrar el vórtice pequeño delante del prisma. Para fijar el valor del radio inicial, se considera que el mismo tiene que ser menor a un cuarto de la altura del prisma, es decir 17 mm. Tomando en

cuenta que el video presenta un $R = 1{,}5\ pixel/mm$ (ver sección 3.3), los 17 mm equivalen a 25,5 *píxeles*, entonces se modifica el parámetro `initial_r=25`. Además, se modifica `correlation_threshold=0.9`. Los resultados del mismo se observan en 6.3, donde se obtiene un vórtice cuyo radio es de 6,8 mm y su centro se posiciona a $x = 69\ mm$ y $y = 12{,}6\ mm$.

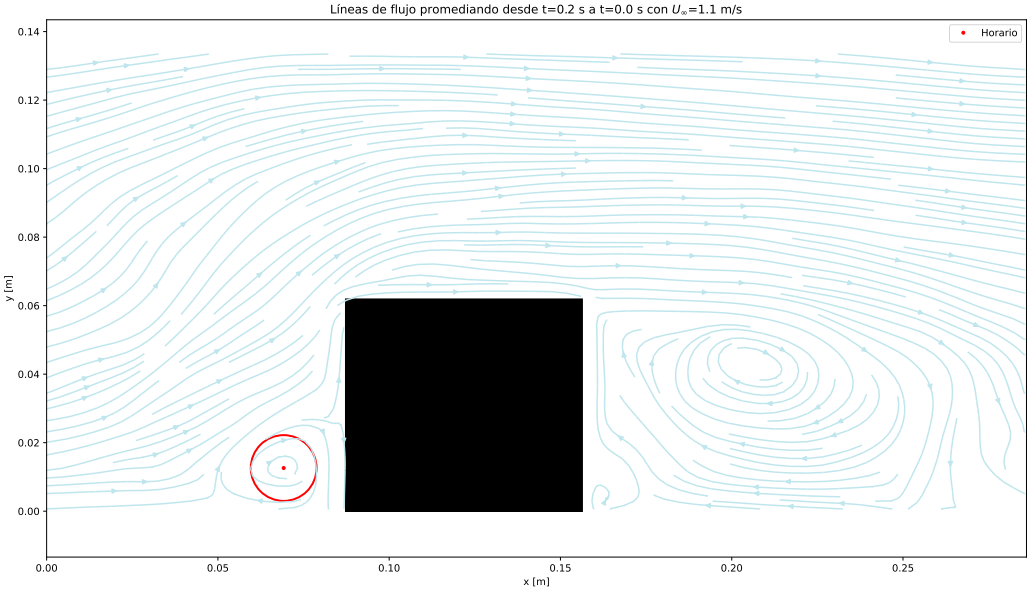


Figura 6.3: Ejemplo de vórtice detectado con un valor de correlación de 0.9 utilizando un `initial_r = 25`.

En la figura 6.4 se dispone la vorticidad en cada punto, donde con azul se observa la zona cuya rotación predominante es horaria y con rojo antihoraria.

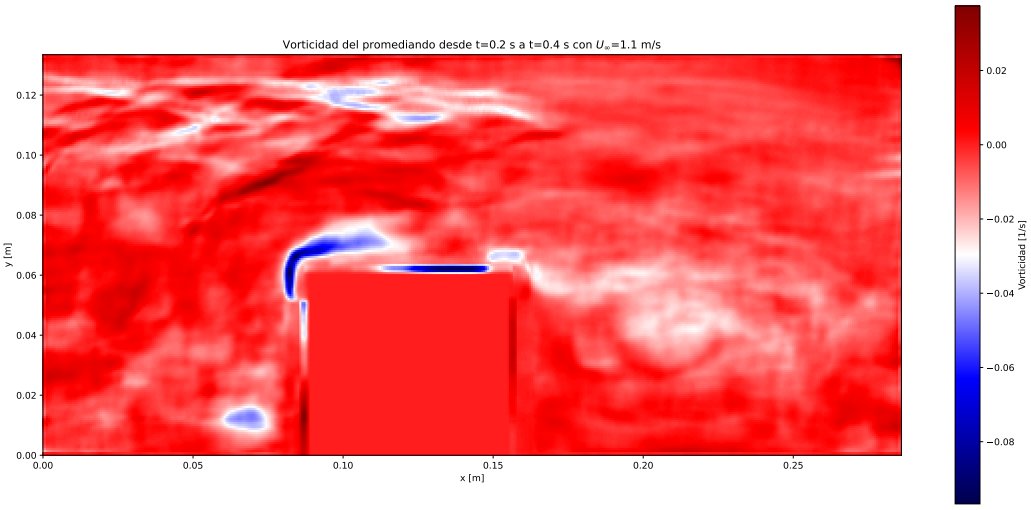


Figura 6.4: Ejemplo de vorticidad del flujo utilizando los parámetros predeterminados.

Luego, el campo de detección se observa en la figura 6.5. En el mismo se puede observar que los valores más altos se dan en la zona donde se detecta el vórtice, y en el desprendimiento de la capa límite, luego en menor nivel presenta valores positivos en la ubicación del vórtice grande aguas abajo del objeto.

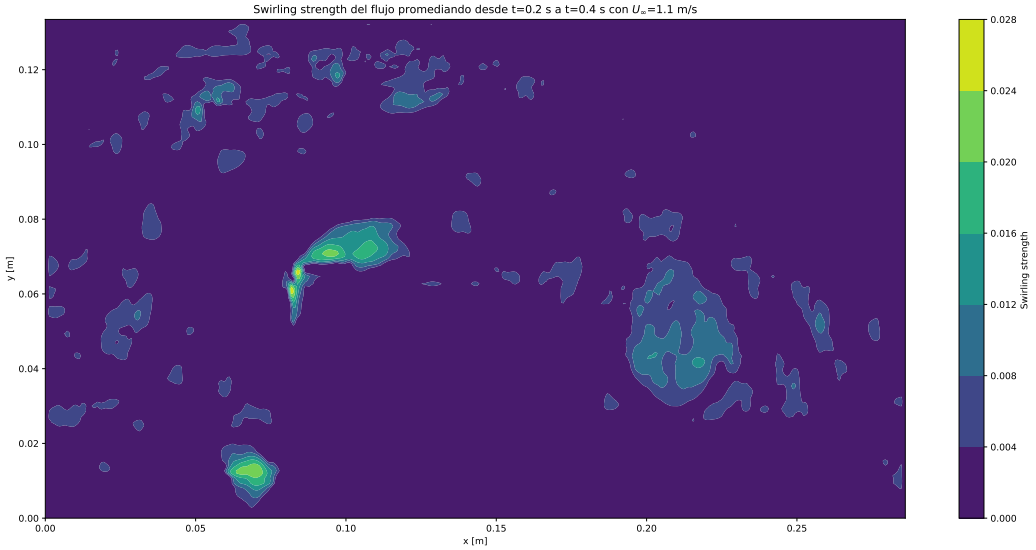


Figura 6.5: Ejemplo del campo de detección del flujo utilizando los parámetros predeterminados.

A partir del campo de detección de la figura 6.5, se realiza el filtro de máximos locales y se obtienen los candidatos a centros como muestra en la figura 6.6. En la misma se ilustra que hay varios posibles centros; sin embargo, ningún otro vórtice logra una correlación mayor a 0.9.

Observando que en el caso anterior, la grilla centros candidatos de vórtices queda muy discretizada, se aumenta el tamaño de `box_size` a 20, lo que equivale a 15 mm. Además, se baja el valor de correlación a 0.75 y se aumenta el valor de `initiail_r=50`; intentando ajustar el vórtice grande aguas abajo de la caja. Los posibles centros detectados se observan en la figura 6.7.

Utilizando los centros seleccionados de la imagen 6.7, se realiza el proceso de ajuste del vórtice cuyo resultado se observa en la figura 6.8. El vórtice grande al ser de forma elíptico provoca que los valores de correlación con el modelo circular sea más bajo que otros casos, incluso se detecta un vórtice de correlación 0.81 que no es coherente con lo visualizado. No obstante, es positivo que se mantenga la detección del vórtice pequeño.

Los datos de radio y posición de los vórtices detectados se escriben en la tabla 6.2.

Para la siguiente prueba se fija el valor de `box_size=100`, lo cual equivale a prácticamente el tamaño de la caja, para observar si se mantiene la detección del vórtice pequeño. En la figura 6.9 se observan los resultados, donde efectivamente se detecta el vórtice pequeño con correlación de 0.9, también el vórtice antihorario con correlación 0.81 y el último vórtice con correlación 0.75.

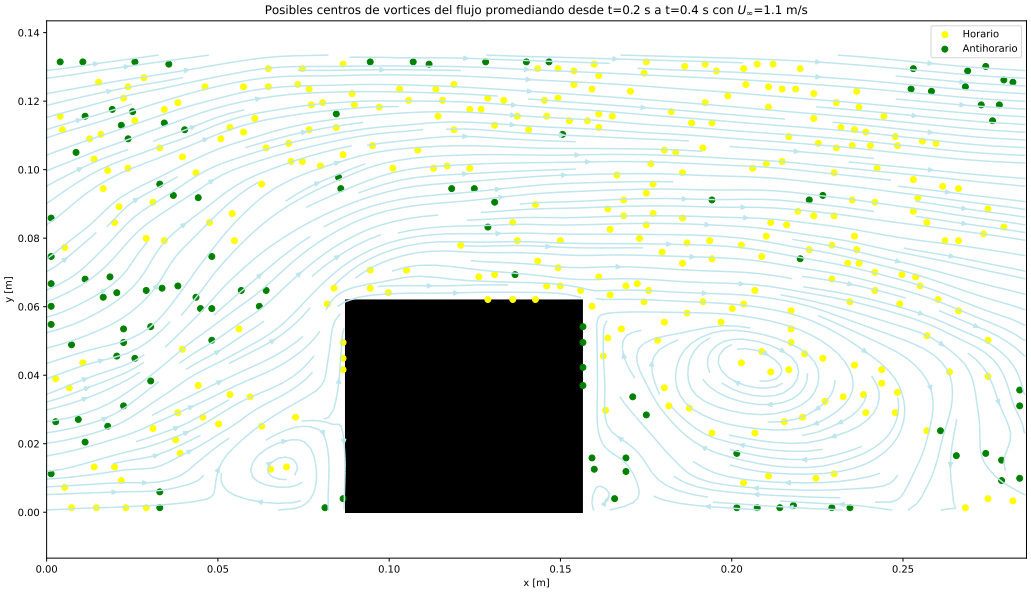


Figura 6.6: Ejemplo de candidatos a centros de vórtices del flujo utilizando los parámetros predeterminados.

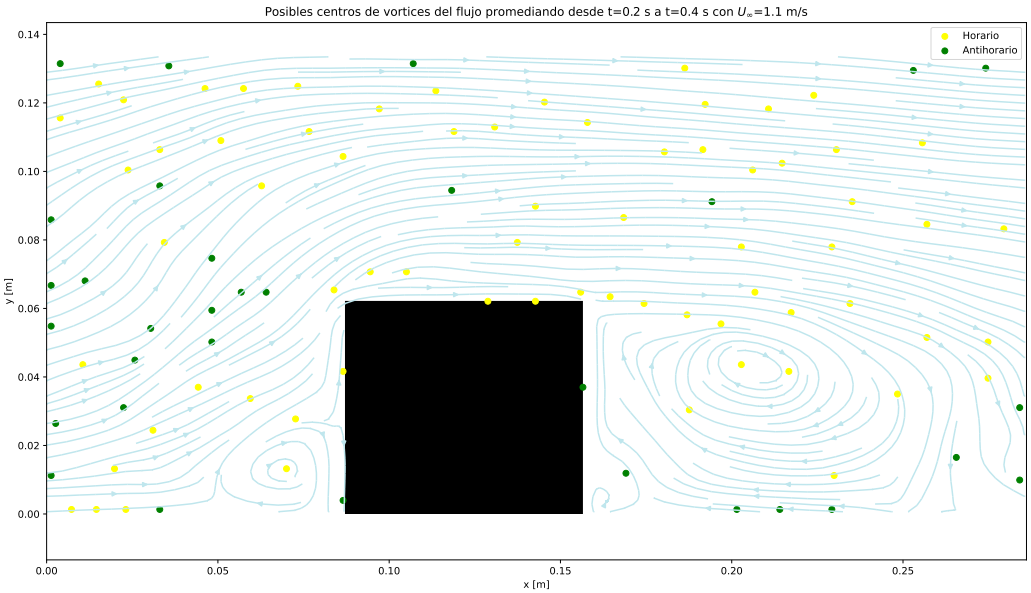


Figura 6.7: Ejemplo de candidatos a centros de vórtices del flujo utilizando un `box_size=20`.

En este caso se decide variar el criterio de detección de vórtices. Los cuales se observan en las figuras 6.10 y 6.11.

Los resultados son prácticamente iguales utilizando el criterio de *swirling* y Q, sin embargo, en el segundo caso, con los mismos parámetros, se detecta únicamente dos vórtices, como se muestra en la figura 6.12, los cuales cumplen: $x = 68{,}8\ mm,\ y = 13{,}3\ mm,\ r = 7{,}2\ mm$ con correlación 0.9, mientras que el se-

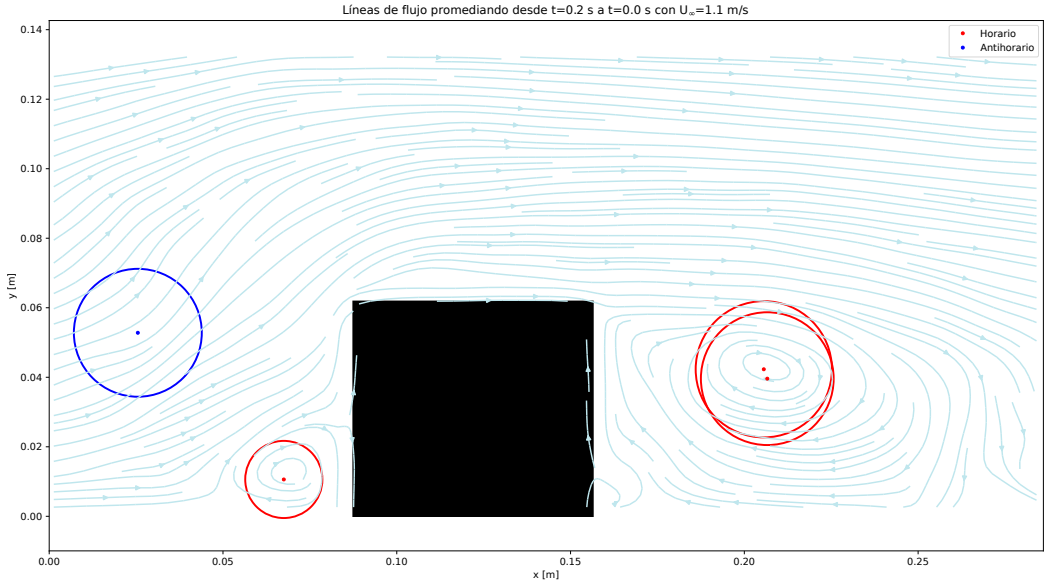


Figura 6.8: Ejemplo de detección de vórtices del flujo utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`.

$x[mm]$	$y[mm]$	$radio[mm]$	$correlación$
68.8	13.3	7.2	0.90
27.3	54.4	11.8	0.81
206.4	41.8	17.7	0.75
213.2	43.8	16.6	0.75

Tabla 6.2: Vórtices detectados utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`.

gundo con una correlación de 0.75 se obtienen los parámetros $x = 213{,}2\ mm,\ y = 41{,}8\ mm,\ r = 17{,}7\ mm$. Evitando la detección del vórtice antihorario.

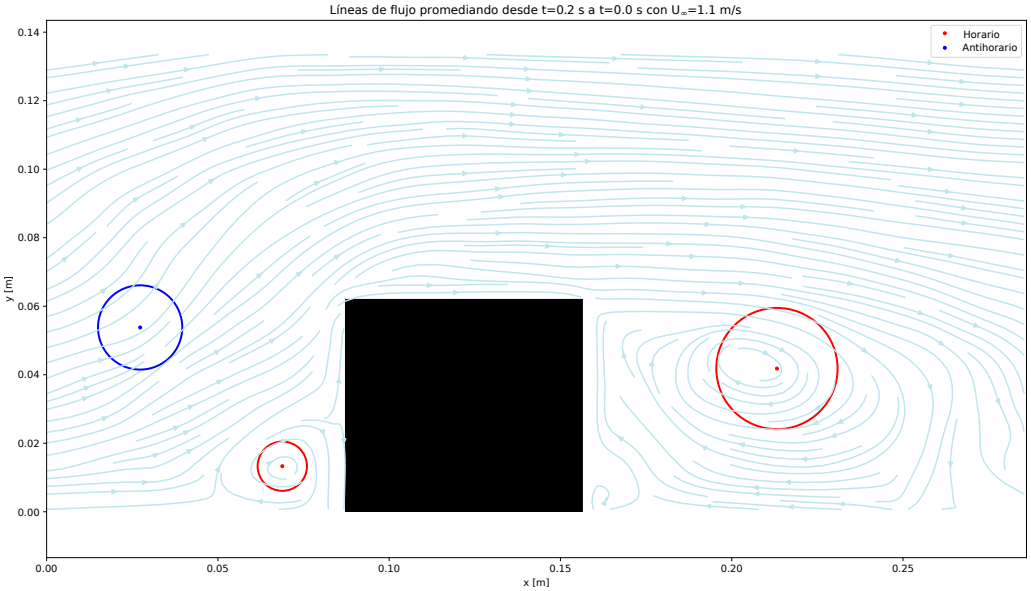


Figura 6.9: Ejemplo de detección de vórtices del flujo utilizando un `box_size=100`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`.

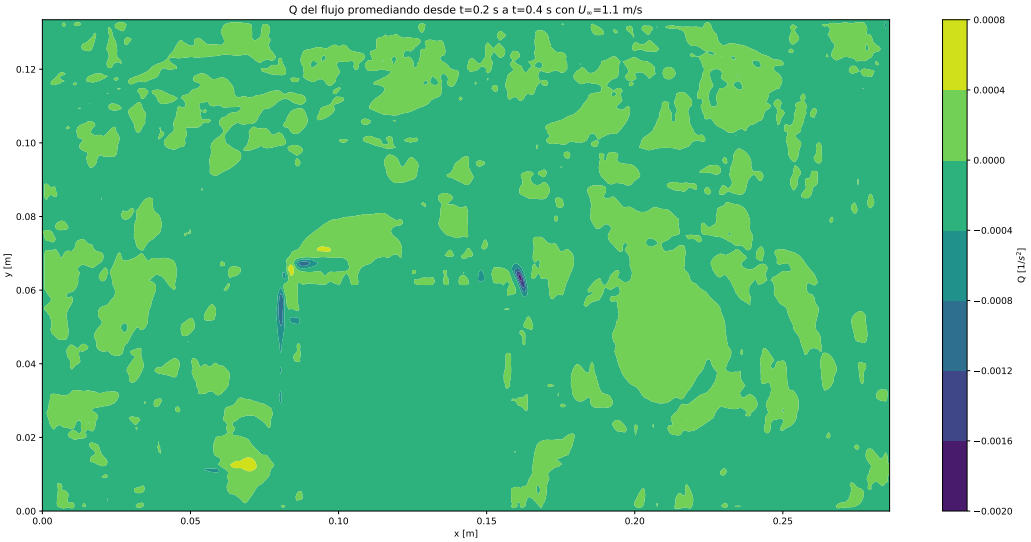


Figura 6.10: Campo de detección utilizando criterio Q.

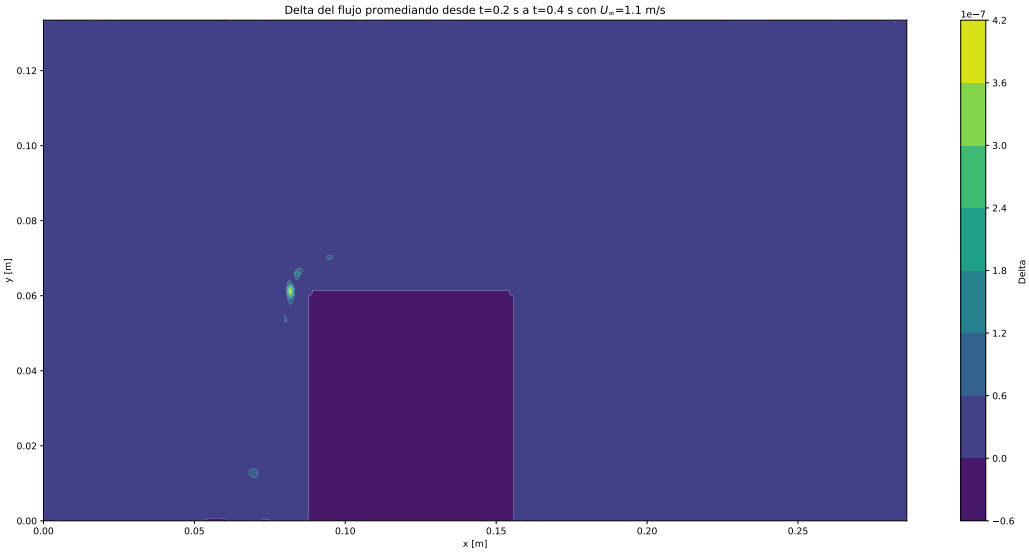


Figura 6.11: Campo de detección utilizando criterio delta.

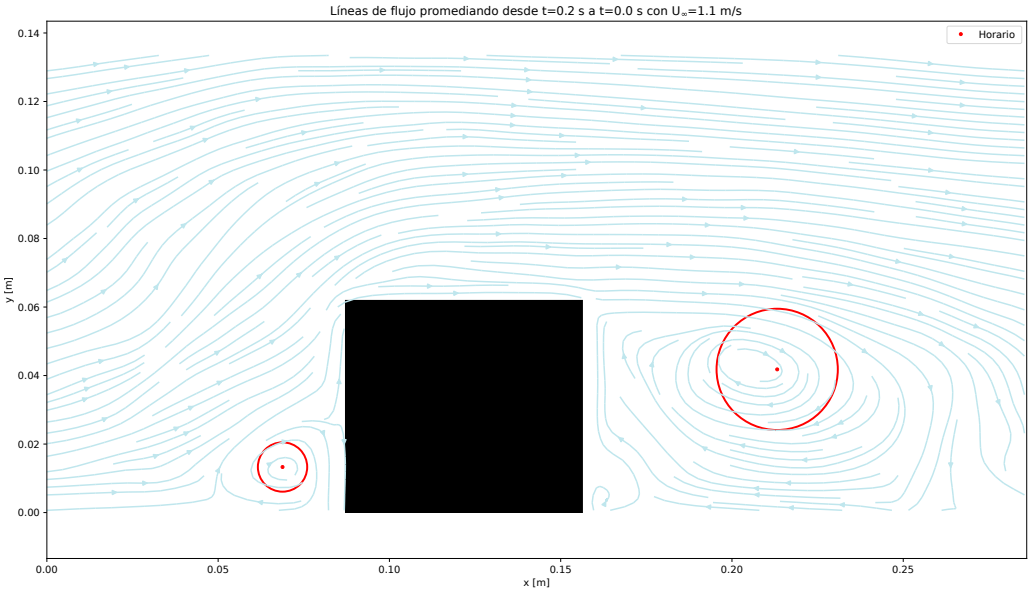


Figura 6.12: Detección de vórtices utilizando criterio delta.

Ahora se estudia la detección de vórtices en el flujo medio. En la figura 6.13, se observa las líneas de flujo.

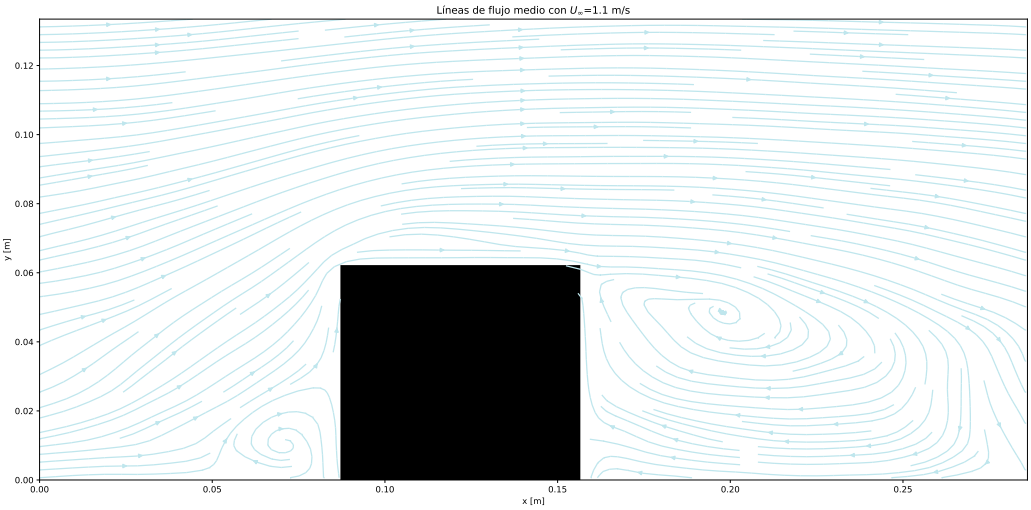


Figura 6.13: Líneas de flujo media.

La vorticidad del flujo medio se observa en la figura 6.14, al comparar la misma con la vorticidad de la figura 6.4, en el caso del flujo medio presenta transiciones más suaves entre los distintos valores de vorticidad.

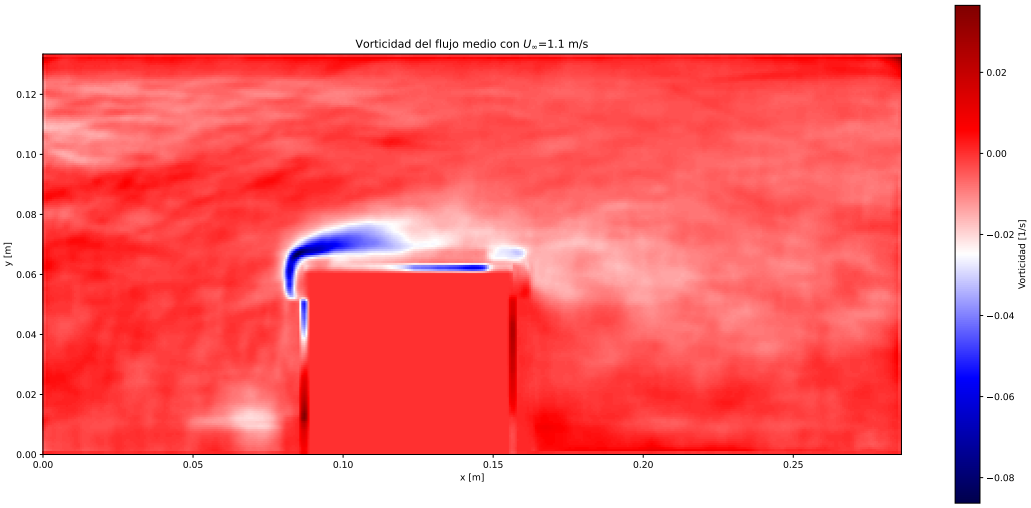


Figura 6.14: Vorticidad del flujo medio con valores predeterminados.

Al comparar el campo de detección de la figura 6.15 con la figura 6.5, se observa que el primero presenta menos variación en la zona alejada al prisma, incluso no se notan valores altos en la zona donde está el vórtice grande.

En la figura 6.16, se observan los candidatos a vórtices y en la figura 6.17, se observan la detección al final utilizando los parámetros: `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.7`.

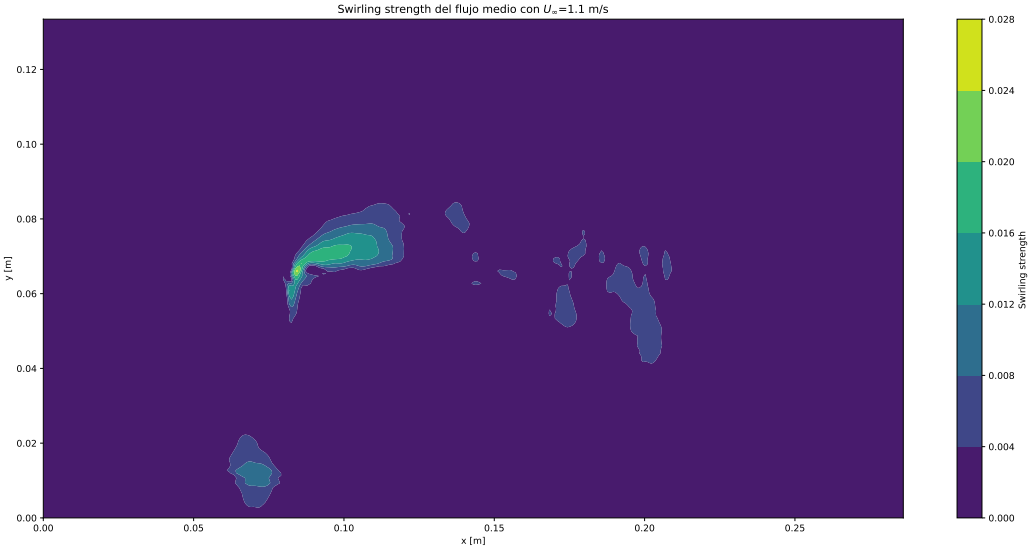


Figura 6.15: Campo de detección en el flujo medio con método *swirling* y `box_size=20`

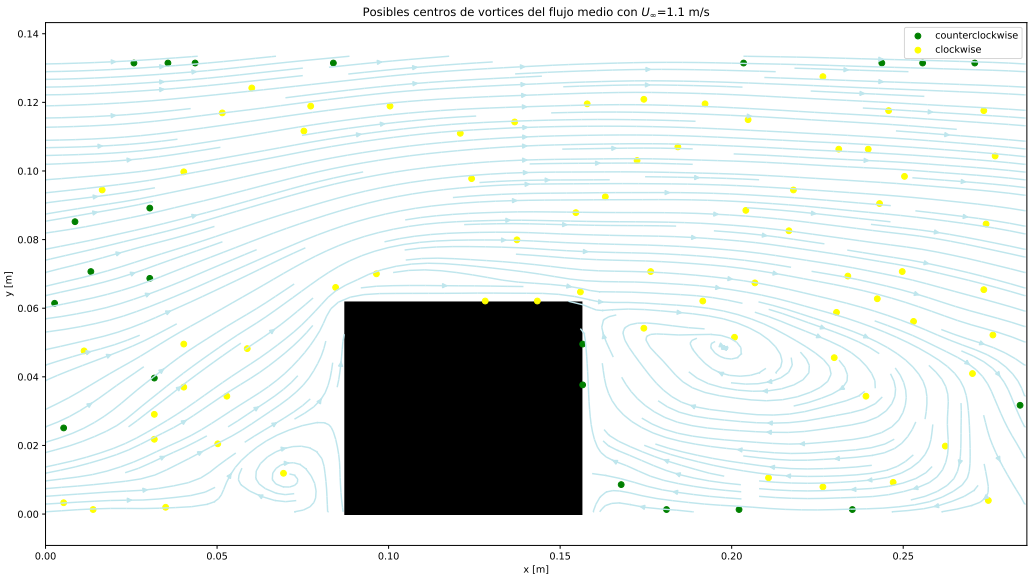


Figura 6.16: Líneas de flujo media con candidatos a vortices.

En este caso se detecta dos vórtices, el primero con correlación 0.9, y valores $x = 69{,}9\ mm$, $y = 12\ mm$, $r = 7{,}6\ mm$, mientras que el segundo con una correlación de 0.77 se obtienen los parámetros $x = 277{,}4\ mm$, $y = 65{,}7\ mm$, $r = 61{,}3\ mm$, el cual no es coherente con lo visualizado en las líneas de flujo.

Para este caso se modifica las derivadas y el criterio utilizado para el campo de detección, pero los resultados se mantienen igual. Por lo que se intenta modificar la posición de los centros iniciales de los vórtices, para esto se modifica el `box_size=10`, `correlation_threshold=0.72`, buscando detectar al vórtice gran-

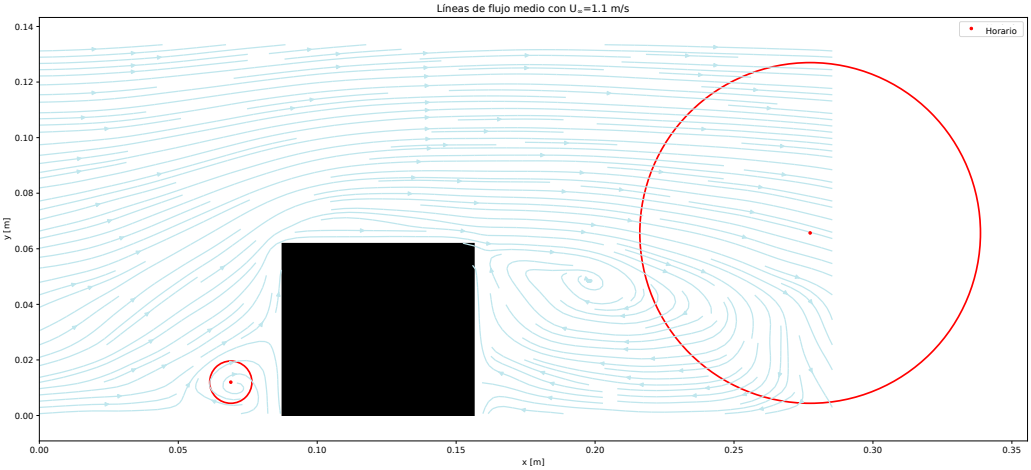


Figura 6.17: Líneas de flujo media con detección de vórtices.

de. Obteniéndose los resultados de la figura 6.18 y los vórtices descritos en la tabla 6.3.

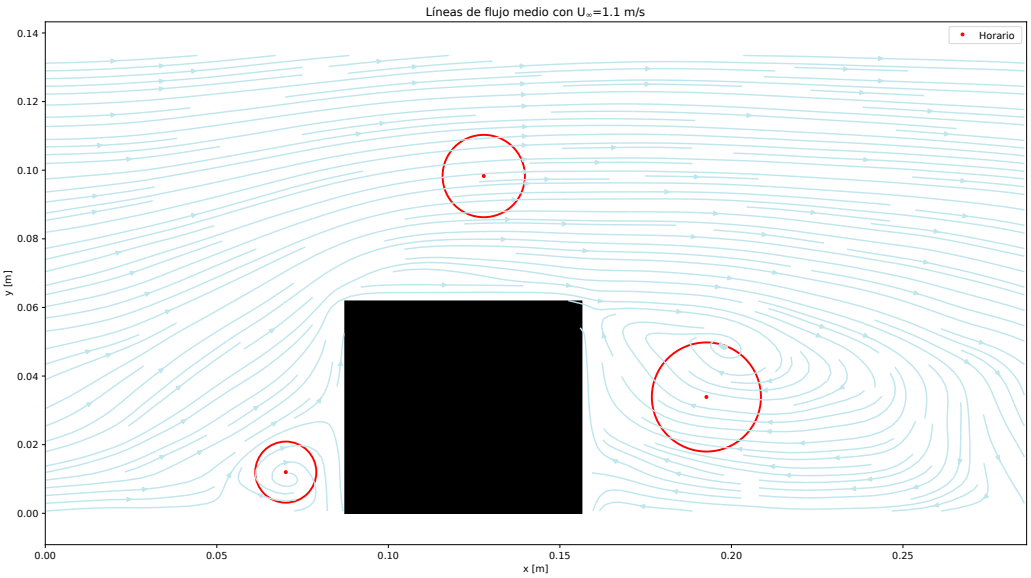


Figura 6.18: Líneas de flujo media con detección de vórtices con `box_size=10`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.72`.

Todos los resultados fueron realizados con un `grid_step` en el campo de velocidades de tamaño 1. Se realiza de esta forma, porque `vortexfitting` supone que el campo de velocidades tiene una discretizacion unitaria. Sin embargo, cuando se utiliza otro tamaño de paso, se llega a detectar los vórtices, pero su origen queda corrido respecto a los datos de líneas de flujo.

$x[mm]$	$y[mm]$	$radio[mm]$	$correlación$
69.9	12.6	9.1	0.90
192.7	33.9	15.9	0.75
127.8	97.6	12.5	0.77

Tabla 6.3: Vórtices detectados utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`.

6.4. Conclusiones

La herramienta de detección de vórtices, es una funcionalidad extra para automatizar el procesamiento, y cuando se trabaja con vórtices circulares, la misma es capaz de detectarlos.

Al observar un vórtice estadísticamente estacionario generado en una zona, a pesar de ser circular, en cada aparición puede variar su radio aparente y su centro, debida a la propia turbulencia del flujo. Por lo tanto, cuando se intenta detectar vórtices en el flujo medio, se está asumiendo que los centros tienen velocidad nula, y sus velocidades tangenciales iguales en módulo, lo cual no es posible en los experimentos, dado que se realizan promedios temporales y la variación del centro y radio antes mencionados, deforman la estructura observada en el campo medio.

Además, en el caso del vórtice elíptico, al observar las líneas de flujo se percibe que el mismo varía su forma a lo largo del tiempo. Provocando que el flujo medio, no se obtenga valores positivos altos en el campo de detección, afectando la elección de posibles centros de vórtices.

La incorporación de un paso no unitario para el procesamiento de `vortexfitting`, es vital para ser coherentes con las líneas de flujo. También, se tiene que analizar la posibilidad de agregar un modelo de vórtice elíptico, para poder conseguir detectarlos con mayor correlación.

Sin embargo, una de las grandes desventajas de esta funcionalidad es la cantidad de parámetros a configurar. Por lo que se sugiere a trabajo futuro, desarrollar un algoritmo para detectar los vórtices que utilice el resultado de las líneas de flujo, intentando que el mismo sea más versátil en la elección de parámetros.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Software

En este capítulo se describe de manera práctica la herramienta desarrollada y la interfaz para configurar. En especial se describe un manual de uso de la interfaz en conjunto con un caso de prueba.

7.1. Desde consola

El objetivo es realizar un código lo más modular posible, para facilitar agregar nuevos métodos para cumplir con cualquiera de las funcionalidades, como: campo de velocidades, líneas de flujo y detección de vórtices.

Primero, se definen tres modos de trabajo, asociados al tipo de promedio de datos con el que se quiere trabajar: instantáneo, medio y media móvil. Luego se consideran tres etapas importantes, asociadas a cada funcionalidad, denominadas: Campo de Velocidades, Líneas de Flujo y Vórtices. El desarrollo de cada una de ellas se realiza en archivos por separado y se separa el procesamiento del método con la visualización del mismo, a excepción del caso de las líneas de flujo.

En la figura 7.1 se describen las principales clases donde se procesan las funcionalidades. La primera rama hace referencia al proceso utilizado para generar el campo de velocidades, en este caso se implementa únicamente utilizando el método de flujo óptico descrito en la sección 4.3. En este caso se deja planteada la posibilidad de agregar otro método, para ello es necesario agregar una nueva clase que herede de la clase `GetVelocityField`. El mismo criterio se utiliza para arquitectura del detector de vórtices, la clase `VortexFittingMethod()` hereda de la clase `VortexDetector()`. Luego, se considera la clase `VelocityField()` para el manejo de datos del campo de velocidades, la misma almacena los datos y computa los campos de velocidades para los distintos modos.

El objetivo es, sin importar el método de generar el campo de velocidad o la detección de vórtices, el formato de la salida para cualquier método tiene que ser la misma, de manera de poder utilizar las clases enfocadas en la visualización de los resultados que se representan en la figura 7.9.

Todas las funcionalidades presentadas tienen varios parámetros, los cuales dependen fuertemente de la imagen a analizar y el objetivo del usuario. Para manejar

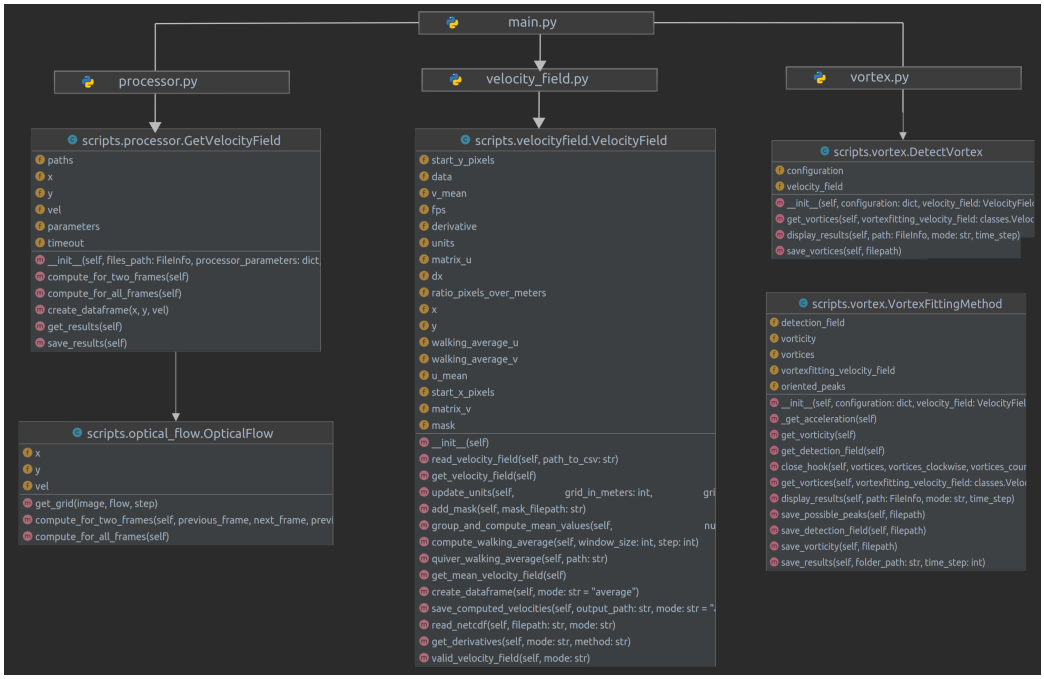


Figura 7.1: Diagrama de estructura de las principales clases asociadas al procesamiento de las funcionalidades.

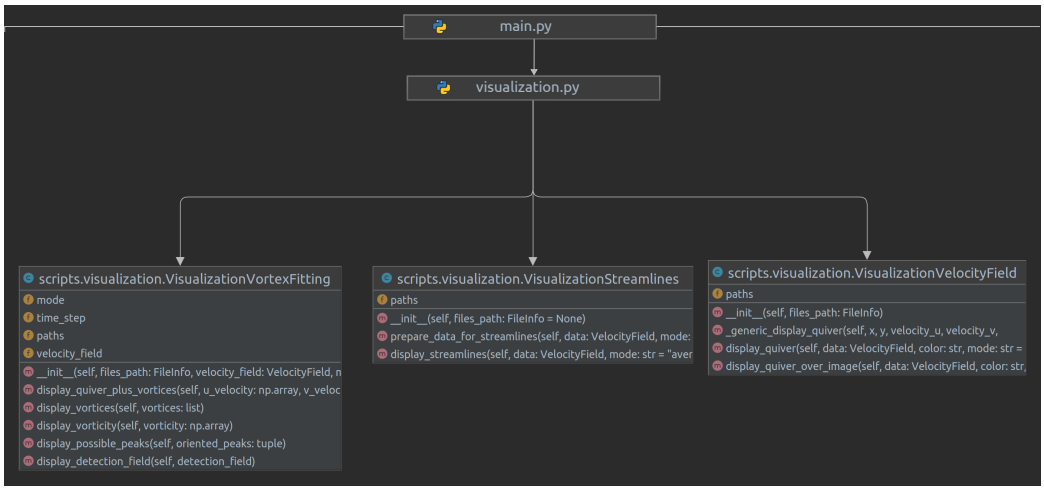


Figura 7.2: Diagrama de estructura de las clases asociadas a la visualización de las funcionalidades.

todas las configuraciones se utiliza un único archivo de configuración JSON. En la figura 7.3 se observa un diagrama visual de la estructura del archivo con algunos elementos, en un primer nivel están los modos de trabajo y definiciones globales, como la existencia de una máscara para enmascarar los datos y datos del ajuste de escala de los resultados. En el siguiente nivel presenta las diferentes etapas del proceso, donde es posible emplear la opción de *skip* para alguna etapa. Por último,

las configuraciones más específicas de cada etapa.

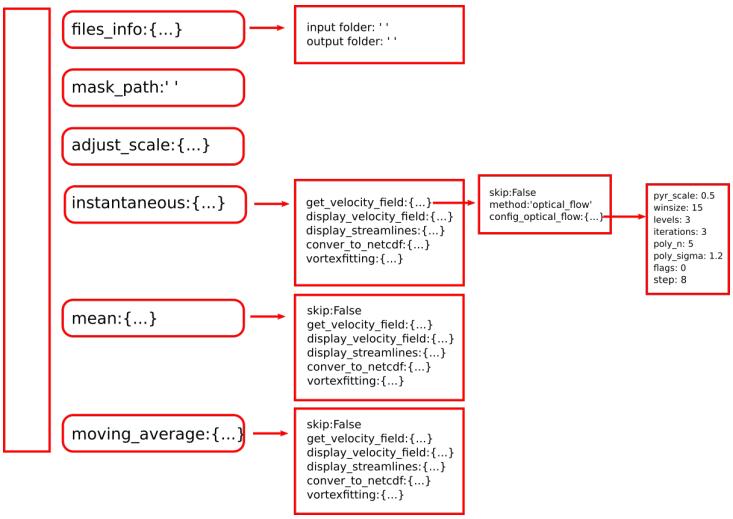


Figura 7.3: Diagrama de estructura del archivo de configuración con algunos elementos.

Finalizando, para ejecutar la herramienta es necesario correr el archivo principal `main.py` utilizando como parámetro `-c` el directorio del archivo JSON. El programa principal se comporta como describe el diagrama de la figura 7.4, el mismo itera en cada modo de trabajo y verifica que se haya seleccionado en el archivo de configuración, y luego sigue la misma estructura para cada modo.

```
for mode in ['instantaneous', 'mean', 'walking_average']:
    mode_configuration = configuration_file[mode]
    if not mode_configuration['skip']:
        velocity_field = get_velocity_field(mode_configuration)
        display_velocity_field(velocity_field, mode_configuration)
        display_streamlines(velocity_field, mode_configuration)
        vortices = get_vortices(velocity_field, mode_configuration)
        display_vortices(vortices, mode_configuration)
```

Figura 7.4: Pseudocódigo del código principal.

Para ejecutar el programa es necesario tener una secuencia de imágenes seleccionadas en una carpeta, este procedimiento se explica en la sección 7.2.2.1.

Para facilitar al usuario se sube un archivo de configuración de ejemplo con valores por defecto, el cual el mismo puede copiar y seleccionar: los directorios de extracción de las imágenes, los directorios donde se guardan los resultados, la configuración de flujo óptico, entre otros.

Sin embargo, la selección de parámetros desde el archivo de configuración puede ser tedioso y por este motivo se implementa una interfaz, donde el mismo pueda ser configurable mediante el uso de botones.

7.2. Interfaz Gráfica

El objetivo es generar una interfaz donde se selecciona la región de interés en cada cuadro y luego se procede a procesarla y seguidamente se visualizan los resultados.

En un principio se pretende diseñar una única interfaz mediante un *plugin* de procesamiento de imágenes con Fiji, pero producto a la incompatibilidad entre Fiji y Python no se pudo realizar. Se opta por construir dos interfaces, una para arreglar las imágenes, y otra para procesar y visualizar los datos. Respecto a la segunda, este texto describe a la versión 0.0.2 de la misma.

En la figura 7.5 se observa que la interfaz propuesta consta de dos partes, la selección de regiones de interés de un video en Fiji, y el procesamiento y visualización por medio de Napari.

Figura 7.5: Diagrama de bloque de la interfaz.

Es importante destacar, que se intenta realizar todas las etapas descritas en la figura en Napari, pero al abrir videos cuyo volumen es aproximadamente 10 Gb, la interfaz fallaba.

7.2.1. Implementación

Esta sección se enfoca en el desarrollo de la interfaz principal en Napari. Este es un visualizador de imágenes desarrollado en Python, que permite explorar archivos, anotar y analizar grandes imágenes multidimensionales. Napari está desarrollado sobre `Qt` (para la interfaz), `vispy` (para renderizar utilizando GPU) y usando librerías científicas como `numpy` y `scipy`. Una característica que la diferencia, es la posibilidad de utilizar un sistema de capas, llegando a soportar seis tipos de capas distintos: para imágenes, etiquetas, puntos, vectores, formas y superficies.

Uno de los grandes beneficios de Napari para este proyecto es que corre en Python, por lo que en primera instancia sería fácil acoplar el código. Con ello se evita generar el protocolo de visualización de imagen o manejar los distintos protocolos que forman parte de una interfaz, como la interacción con el *mouse*. El objetivo es generar un menú de opciones donde sea posible modificar el archivo de configuración y desplegar los resultados.

El problema de generar esta interfaz, se divide en: la generación de un menú funcional y en la utilización de las distintas capas para desplegar todos los resultados.

La primera versión del menú se realiza utilizando la librería `magicgui`, para esto es necesario utilizar el *decorator* `@magicgui` en una función y agregarle `typehints` a sus parámetros. En la siguiente figura, se observa un ejemplo simple de la generación de un menú en Napari.

Código

```
@magicgui()
def config_optical_flow(pyr_scale: float = 0.5, winsize: int = 15, levels: int = 3,
                        iterations: int = 3, poly_n: int = 5, poly_sigma: int = 1.2,
                        flags: int = 0, previous_flow: str = 'null'):
    pass


viewer = napari.Viewer()
viewer.window.add_dock_widget(config_optical_flow)
napari.run()
```

Menú

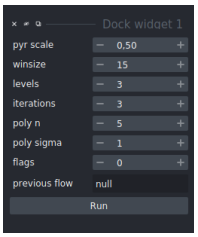


Figura 7.6: Ejemplo simple de generación de un menú.

Además, es posible definir varios parámetros en el *decorator*, permitiendo utilizar otras funcionalidades. En el siguiente ejemplo se observa otro caso simple.

Código

```
@magicgui(call_button=False, method={"widget_type": "RadioButtons",
                                     "orientation": "horizontal",
                                     "choices": [('Optical flow', 1),
                                                 ('OpenPIV', 2)],
                                     })
def instantaneous(compute_velocity_field: bool = True, method: int = 1,
                  grid_step: int = 4, change_configuration: bool = False):
    pass

viewer = napari.Viewer()
viewer.window.add_dock_widget(instantaneous)
napari.run()
```

Menú

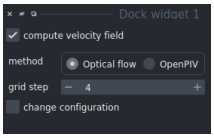


Figura 7.7: Ejemplo simple de generación de un menú.

Al momento de generar toda la interfaz se obtienen varias funciones. Estas se juntan en un contenedor utilizando la función `Container()`. Sin embargo, cuando se manejan varias funciones, con distintos menús y con el objetivo que los mismos interactúen entre ellos, se convierte en un archivo bastante difícil de leer al no estar estructurado.

Por lo que se prosigue a utilizar la librería `magicclass`, en la cual cada clase es un contenedor de menús de `magicgui`. La misma pretende utilizar las características anteriormente mencionadas, simplemente que se organizan las mismas de una forma más compacta en una clase. En la figura 7.8 se muestran los ejemplos anteriores pero utilizando `magicclass`.

De esta forma, el código queda de una forma más *pythonic* y facilita la estructura de la misma. Además de ofrecer la funcionalidad de guardar un historial de la clase, especificando los botones seleccionados u opciones.

La última versión del menú se genera dentro de una clase llamada `Main`, cuya estructura se observa en la figura 7.9, se definen dos atributos para acceder en todo momento: la última configuración del archivo JSON guardada y el estado actual.

Luego, se genera dentro de esta tres clases principales `Configuration`, `Process` y `Display`. Donde la primera es la encargada de modificar los valores a configurar y guardarlos en el archivo JSON. La segunda se encarga de procesar en paralelo el script generado, permitiendo utilizar funciones estéticas de la interfaz mientras se corre el procesamiento, pero no se habilita a modificar el archivo de configuración ni a desplegar datos. Por último, el tercer menú determina qué archivos quieren desplegarse en la interfaz.

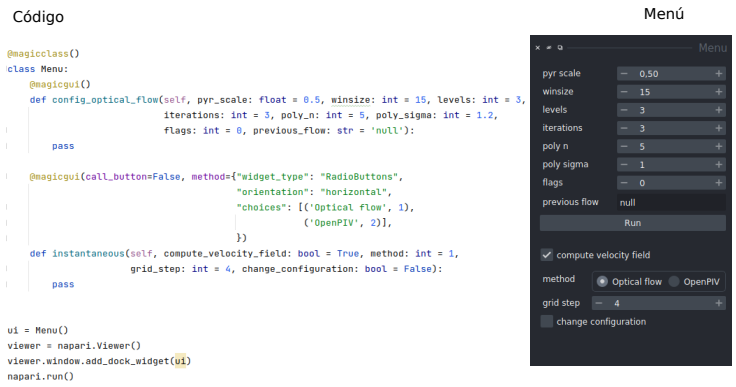


Figura 7.8: Ejemplo simple de generación de un menú.

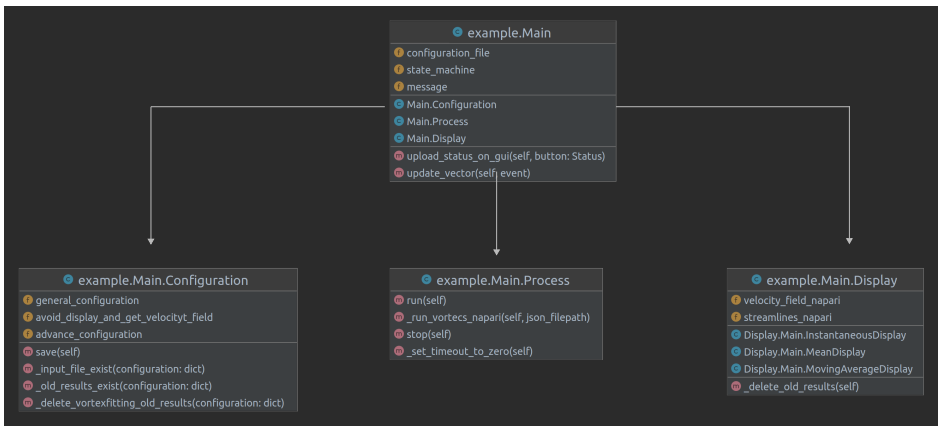


Figura 7.9: Diagrama de estructura interfaz.

Luego, al momento de visualizar los distintos resultados, es necesario acoplar al formato de las distintas capas. En el caso de observar las imágenes, se utiliza la capa `Images`, para líneas de flujo se utiliza la capa `Track`, y para el campo de velocidades la capa `Vectors`. El acoplamiento de estas últimas es dificultoso, debido a que se necesita que los datos de la capa varíen en el tiempo. En el caso de la capa `Track` es posible definirle en qué posición temporal debe de encontrarse, no obstante, para el caso del campo de velocidad, fue necesario controlarla utilizando el evento del movimiento del *slider* temporal. En ambos casos, las capas no tienen implementada la colocación de un indicador de sentido, pero observando el contexto puede inducirse el mismo.

En resumen, se obtiene una interfaz que permite procesar y visualizar los resultados de la herramienta, siendo práctica e independiente del procesamiento de la herramienta.

7.2.2. Manual de usuario

7.2.2.1. Preprocesamiento

Es recomendable tener tamaños de regiones de interés de aproximadamente 200×200 píxeles y utilizar como máximo 1000 cuadros para prueba de configuraciones, con el objetivo que lleve el menor tiempo posible obtener un primer panorama de los parámetros de configuración, luego se corre el mismo procesamiento con todos los cuadros adquiridos. Para realizar esto se utiliza Fiji, ver figura 7.10, primero es necesario hacer una pre configuración de las medidas, `Analyze→Set Measures` y se selecciona únicamente `Bounding rectangle`. De esta forma, es posible guardar las medidas de la región de interés seleccionada.

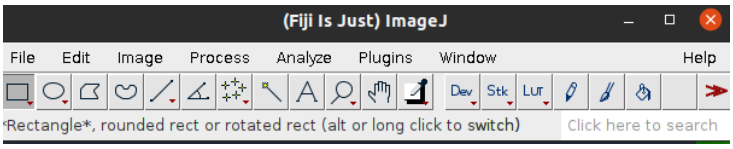


Figura 7.10: Menú principal de Fiji. [6]

Para abrir el video simplemente se arrastra el mismo hacia el menú principal y se selecciona la opción de abrir como `Virtual Stack`, de manera de agilizar la visualización del mismo.

Luego el usuario observa el video y define el área de interés, para ayudar se puede cambiar la paleta de colores, se recomienda utilizar una paleta de colores perceptual como por ejemplo: *magma* o *viridis*. En Fiji se modifica la paleta abriendo el menú `Image→Look Up Table→mpl-magma`. Además, es posible modificar la velocidad de reproducción haciendo clic derecho en el botón de *play*.

Seguidamente, se selecciona la región de interés, para esto debe de presionarse el botón de un rectángulo en el menú. Es recomendable guardar las especificaciones del ROI, usando `Analyze→Measure`. Luego se va a `Image→Stack→Tools→Make Substack` y se elige el intervalo de cuadros a utilizar. De esta forma se genera un nuevo *stack* con el recorte realizado.

Es posible enmascarar los datos no válidos, de esta forma se evita procesar la herramienta en lugares no deseados. Para esto se selecciona el lugar donde no se quiere procesar, con las herramientas disponibles, se genera una máscara utilizando `Edit→Selection→Create Mask` y se guarda el archivo.

Por último, se guardan los datos del ROI, y la secuencia de imagen seleccionando `File→Save As→Image Sequence` y se guardan en una carpeta. Es importante que dicha carpeta solo contenga las imágenes a procesar.

7.2.2.2. Procesamiento y Visualización

Una vez obtenidas las imágenes en una carpeta, se procede a abrir el programa.

En la figura 7.11, se observa que el mismo presenta tres secciones para configurar la corrida: *Configuration*, *Process* y *Display*.

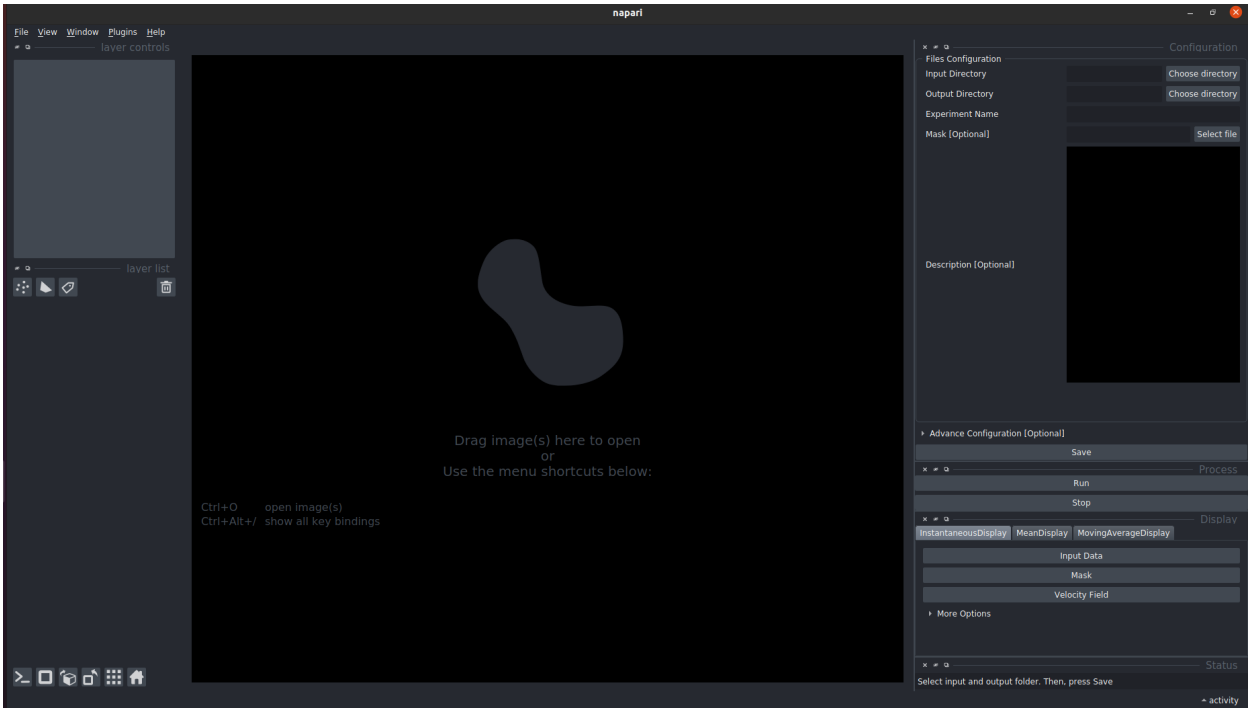


Figura 7.11: Menú realizando utilizando Napari. [7]

La primera sección realiza la configuración de todos los parámetros del archivo JSON. Primero se encuentra la selección de la ubicación de los archivos de entrada y la salida de resultados. Esta configuración es de vital importancia definirla, en caso de que no se seleccione una carpeta de entrada válida, es decir, no se seleccione una carpeta con archivos *.tif* o dicha carpeta presente algún archivo extra, que no es de dicho formato; no es posible seguir con el procesamiento, ya que la propia interfaz lo impide. Además, presenta la posibilidad de agregar un archivo para enmascarar datos y agregar una descripción del experimento que genera un *.txt*, para guardar información relevante sobre el experimento.

Una vez seleccionadas las carpetas, es posible correr las imágenes con la configuración predeterminada apretando el botón de `Run`. Sin embargo, si se desea cambiar alguna configuración, a la misma se accede por medio de `Advance Configuration[Optional]`. La cual despliega una ventana con tres *tabs* como se observa en la figura 7.12, dividiendo en: `Instantaneous`, `Moving Average` y `VortexFitting`.

En la primera opción se realiza la configuración del modo instantáneo, como se observa en la figura, se dejó la opción de elegir el método de procesamiento de las imágenes; sin embargo, la opción de `OpenPIV` no se agregó todavía al script final, por lo que no es funcional. En la ventana se muestra la configuración del parámetro más habitual: el paso de discriminación del campo de velocidad en píxeles, es importante tener en cuenta que cuanto más chico es el valor del mismo, más tiempo de procesamiento va a requerir plotear las líneas de flujo y detectar los vórtices. No obstante, el tiempo de procesamiento del flujo óptico es el mismo,

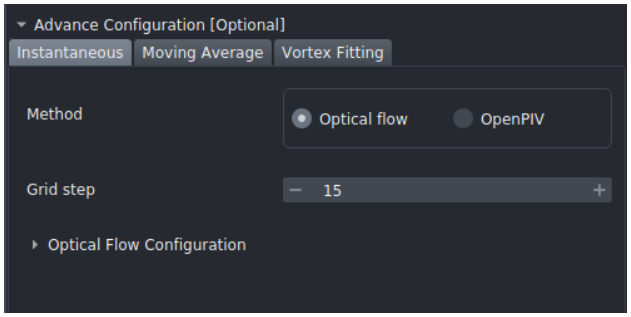


Figura 7.12: Menú de configuración avanzada.

siendo por ejemplo para una imagen de tamaño 433×202 píxeles solamente adquirir todos los campos instantáneos con un paso de 2 requiere de 16 s y es el mismo para cualquier valor del paso. Es recomendable utilizar valores entre $8-15$ píxeles.

Al seleccionar `Optical Flow Configuration`, como se observa en la figura 7.13, se despliega todos los posibles parámetros de configuración del método explicados en la sección 4.3.

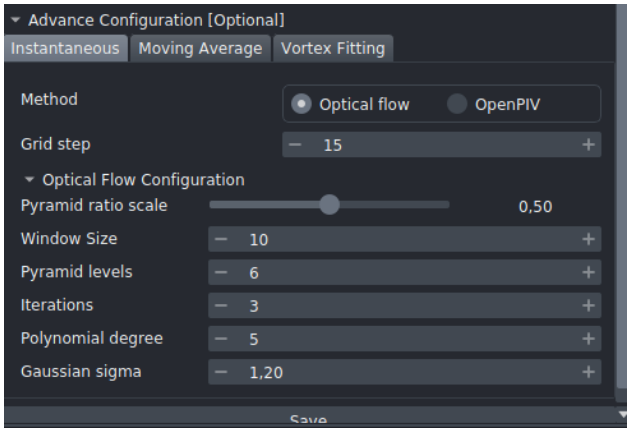


Figura 7.13: Menú de configuración avanzada del algoritmo de flujo óptico.

Luego, la ventana de configuración `Moving Average`, se observa en la figura 7.14, determina el tamaño de ventana y el paso de transición de la media móvil. Es importante tener en cuenta que valores más pequeños en estos parámetros implican mayor tiempo de espera al desplegar resultados, en el caso de observar el campo de velocidad los efectos del mismo no son notorios. Por ejemplo, en una imagen de tamaño 433×202 píxeles, para cada cálculo de media móvil utilizando una ventana de 100 con paso de 50 la obtención del campo de velocidades demora 166 it/s, llegando a en total menos de un segundo. Mientras que cuando se utiliza una media móvil de parámetros 300 y 100, cada iteración se realiza en 45,24 it/s. Sin embargo, en el caso de la generación de líneas de flujo, que es un algoritmo lento, lleva cada iteración 1,06 s. Por este motivo, el mismo se corre en paralelo. Mientras se está procesando, no se le permite al usuario desplegar otro resultado o guardar una nueva configuración.

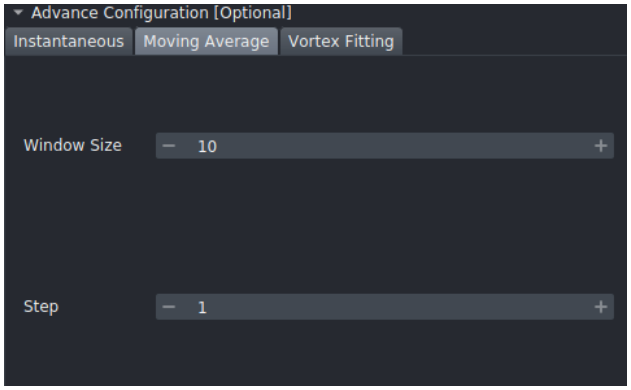


Figura 7.14: Menú de configuración media móvil.

La última ventana es la configuración del método de detección de vórtices, se observa en la figura 7.15, la explicación de cada uno de los parámetros se describen en la sección 6.

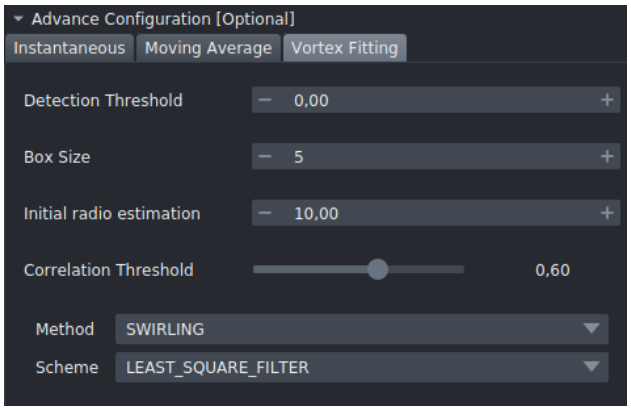


Figura 7.15: Menú de configuración de la detección de vórtices.

Luego, se tiene el botón de guardar los resultados, al apretar el mismo se guarda un archivo JSON con el nombre del experimento en la carpeta de salida. Uno de los beneficios de tener el botón de `Save` separado del botón de `Run`, es que permite utilizar una versión anterior sin la necesidad de volver a correr el campo de velocidad instantáneo si ya se realizó.

En la sección de `Process` se presenta el botón: `Run` y `Stop`, el primero corre el proceso del programa generado en paralelo, en este caso se deshabilita guardar imágenes de los resultados para evitar tiempos de procesamiento innecesarios y además no es posible realizar la detección de vórtices debido a que la misma no acepta ser corrida en paralelo. Una vez seleccionado el proceso de `Run`, para cancelar el proceso se presiona el botón de `Stop`.

La tercera sección tiene como objetivo qué el usuario elija que quiere desplegar, la misma dividida en tres, una para cada modo: `Instantaneous`, `Mean` y `Moving Average`.

Para la primera, es posible desplegar las imágenes de entrada, en caso de haber seleccionado la máscara y los campos de velocidades instantáneos. En la figura 7.16, se observa el resultado al desplegar la ventana `More Options`, la misma realiza operaciones con las imágenes de entrada, esto es de utilidad para poder visualizar las zonas donde predomina o merma trazador, mediante el botón `Mean input Data`; y la variación temporal del trazador mediante el botón `Std input Data`.

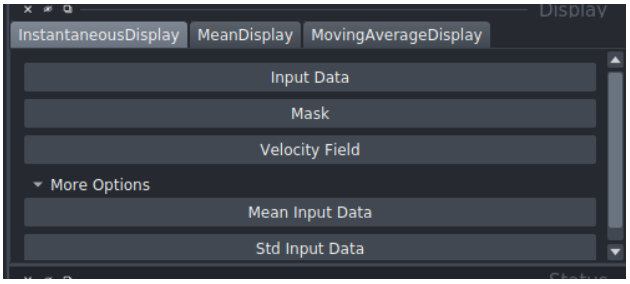


Figura 7.16: Menú completo del modo instantáneo.

El siguiente menú es el modo del flujo medio, es posible visualizar el campo de velocidad, líneas de flujo y vórtices. El mismo posee posibilidades de desplegar más información relacionada con la detección de vórtices, como se observa en la figura 7.17.

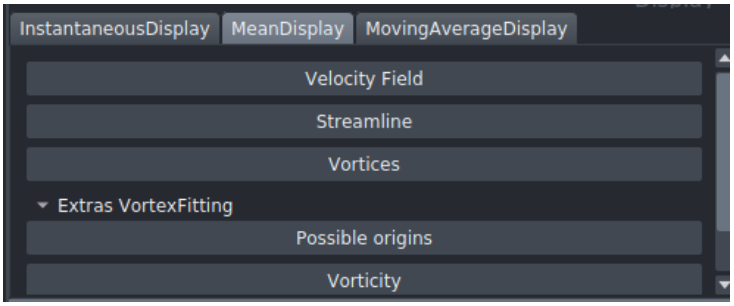


Figura 7.17: Menú completo de la visualización modo medio.

Finalmente, el modo media móvil, presenta la posibilidad de desplegar el campo de velocidad y líneas de flujo.

Por último, se presenta un recuadro donde se indica si los procesos finalizaron, o indicando que la acción realizada no es válida.

Es posible guardar los datos de las distintas capas utilizando `File→Save Selected Layer`.

7.2.2.3. Ejemplo de Uso

El caso de prueba es del flujo en torno a un objeto de sección cuadrada, en este caso la velocidad del túnel es de 1,1 m/s y fue adquirido a 500 FPS.

Preprocesamiento

Primero se procede a abrir el programa, Fiji, luego se cambia la LUT usando una paleta de colores perceptual, los pasos a seguir en el programa son `Image→Lookup Tables→mpl-magma`(ver figura 7.18). De esta forma se visualiza el caso y se deciden los puntos pertinentes a analizar, este análisis fue realizado en la sección 5.

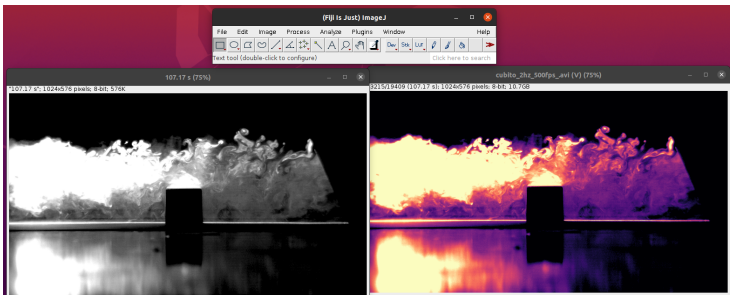


Figura 7.18: En la izquierda se observa un cuadro original, en la derecha modificando el mapeo de los valores de intensidad, en este caso se utiliza magma.

Antes de realizar la selección de distintas zonas de interés es necesario modificar las mediciones, para guardar las dimensiones de las regiones. Para esto se va a `Analyze→Set Measurements` y solo se selecciona `Bounding rectangle`.

En este caso, se seleccionan tres regiones de interés, la primera es antes de la caja, la selección se observa en la figura 7.19. Además, es importante guardar las características de esta sección, para esto simplemente se va a `Analyze→Measure`, a la derecha en la figura se observa la ventana de mediciones. Luego se realiza el recorte y se selecciona la cantidad de cuadros a utilizar, es recomendado como primera prueba analizar únicamente 1000 cuadros, para esto se va a `Image→Strack→Tools→Make Substack`.

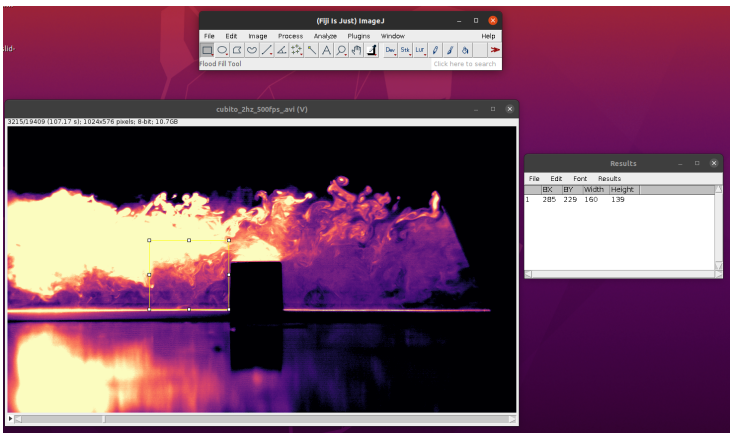


Figura 7.19: Selección de la primera región de interés.

Este procedimiento se repite para todas las regiones de interés que se necesite, en la figura 7.20 se observa la selección de las tres ROI y la ventana de resultados.

Por último, es necesario guardar cada una de ellas en carpetas separadas utilizando, `File→Save As→Image Sequence`.

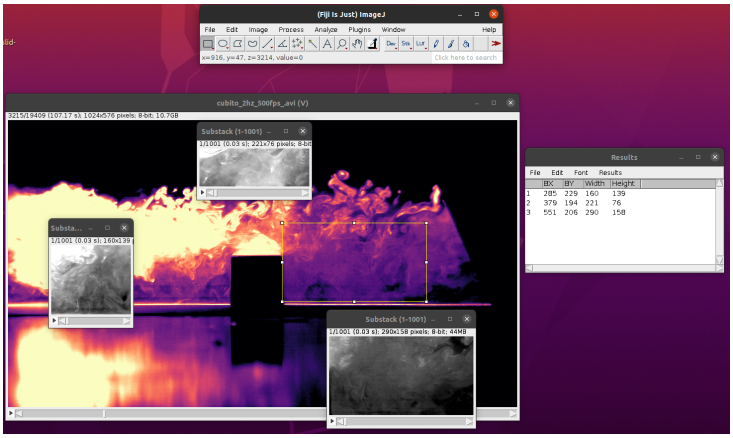


Figura 7.20: Selección de todas las regiones de interés.

Procesamiento y Visualización

Se analiza un procesamiento utilizando el primer ROI seleccionado, intentando detectar el vórtice adelante del obstáculo. Para esto, se selecciona la carpeta de entrada y salida de resultados. Al presionar el botón de `Save` y luego `Run` se corre el programa utilizando los valores predeterminados, en este caso se obtiene el resultado de la figura 7.21, lo cual indica que la discriminación utilizada es muy laxa.

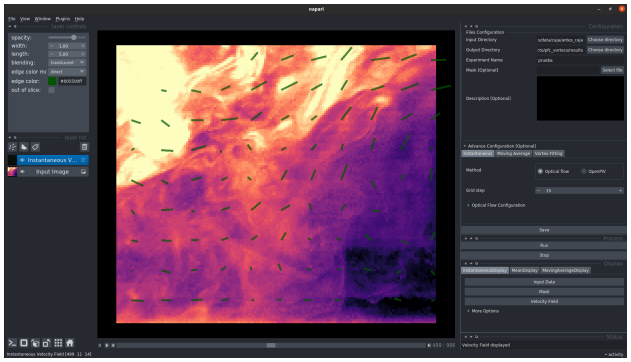


Figura 7.21: Corrida con configuración con valores predeterminada.

Por lo que se modifica el valor de `Step Grid` a 2, se presiona el botón de `Save` y luego `Run`; sin embargo, al observar los resultados de la figura 7.22 se concluye que es muy discretizado.

Finalmente, siguiendo el mismo procedimiento utilizando, se selecciona un `Step Grid` a 6, con el cual se obtiene estéticamente una buena resolución del problema(ver figura 7.23).

En este caso se quiere observar el flujo medio, por lo que se selecciona el campo de velocidad y líneas de flujo medio, se presionan los botones `Velocity Field` y `Streamlines` bajo la ventana de visualización `Mean`, los cuales se observan en la figura 7.24.

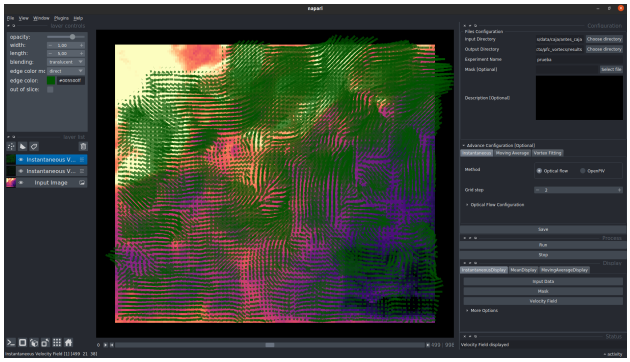


Figura 7.22: Corrida con configuracion con `Step Grid = 2`

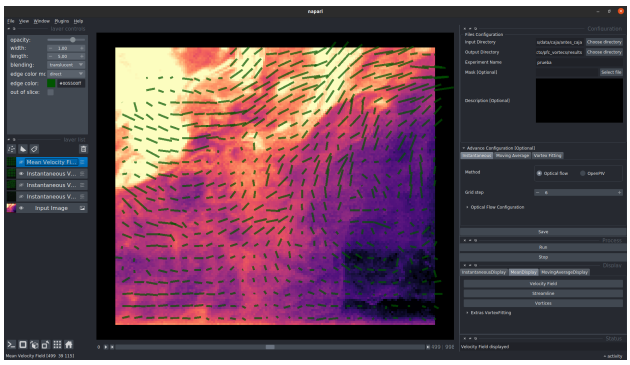


Figura 7.23: Corrida con configuración con `Step Grid = 6`

En la misma se puede observar el vórtice que se quiere detectar con la herramienta, primero se prueba con la configuración del detector predeterminada presionando `Vortices` cuyos resultados se ilustra en la figura 7.25.

Luego, se decide a modificar los parámetros, primero se baja el tamaño de `Box Size` a 2 para obtener más puntos de orígenes posibles, luego se minimiza el radio de `Initial radio` a 7. Se guarda la configuración con `Save` y seguidamente se despliegan los resultados con la nueva configuración utilizando `Vortices`. En la figura 7.26 se observa el resultado donde se puede notar que el vórtice es detectado.

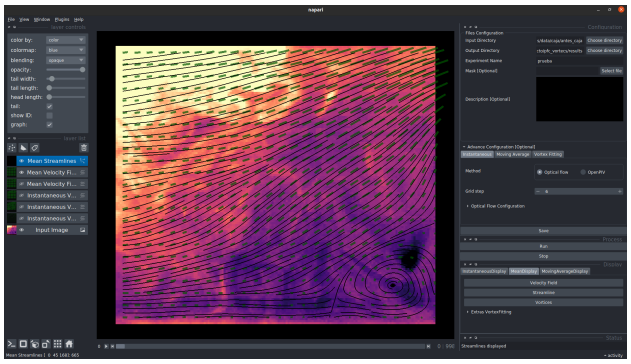


Figura 7.24: Corrida con configuracion con `Step Grid = 6` observando el campo de velocidades y líneas de flujo medio.

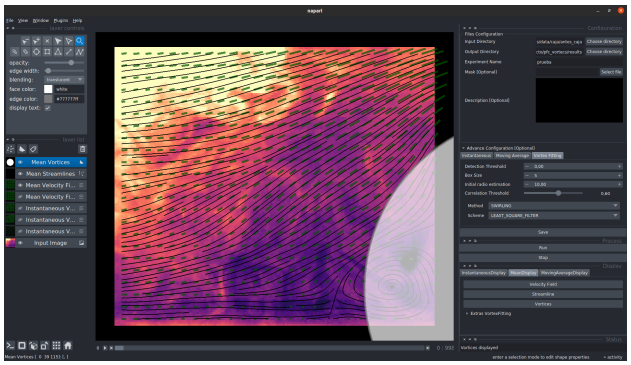


Figura 7.25: Corrida observando vórtices con configuración predeterminada.

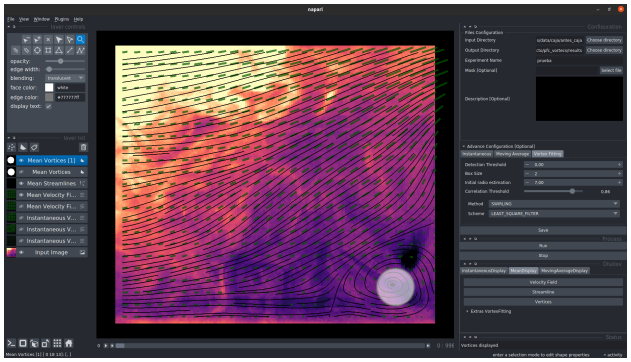


Figura 7.26: Detección de vórtice medio.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 8

Túnel de Viento: Predimensionamiento

Un túnel de viento es una herramienta de laboratorio que busca garantizar una calidad de flujo en una región denominada zona de trabajo. La calidad requerida puede especificarse de diversas formas posibles, entre ellas está la intensidad de turbulencia admisible, factor bloqueo, y no-uniformidad admisible. El requisito de calidad de flujo viene dado por las condiciones de diseño establecidas.

En líneas generales, existen dos características que definen la geometría del túnel de viento, estas son: el circuito del túnel y el tipo de sección de trabajo. Ambas configuraciones son descritas en la figura 8.1.

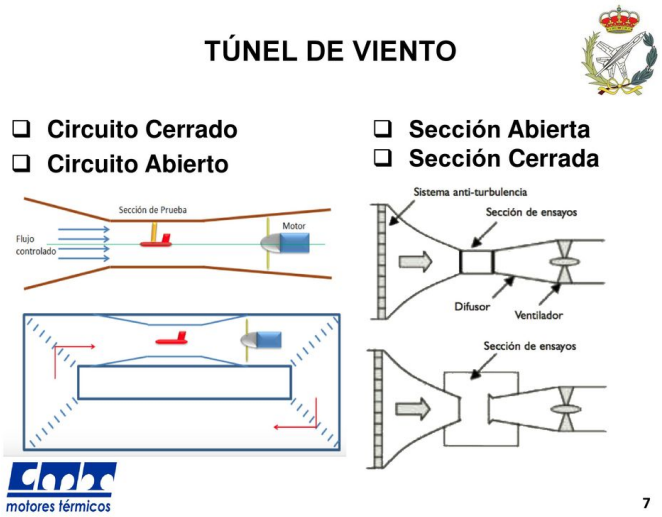


Figura 8.1: Configuraciones generales de un túnel de viento [24]

La configuración de circuito cerrado, por lo general, presenta menores pérdidas de carga que una de circuito abierto, dado que no disipa energía cinética por evacuarse al exterior. Sin embargo, es necesario incorporar un intercambiador de calor, cuyo objetivo sea evacuar al ambiente el calor generado por la refrigeración del motor eléctrico y disipación mecánica. La incorporación de este encarece el proyecto significativamente, sin contar que requiere una mayor cantidad de materiales,

mano de obra, y espacio disponible que uno de circuito abierto. Por el contrario, un circuito abierto resulta más sencillo dado que evita incorporar ciertos elementos. Por las razones antes mencionadas, se elige diseñar un túnel de viento de circuito abierto.

Antes de iniciar a diseñar el túnel, se hace un análisis general de parámetros:

- Potencia total.
- Rendimientos típicos.
- Velocidades a obtener.
- Uso del túnel a diseñar.
- Espacio disponible.
- Pérdida de carga total típica.
- Componentes habituales y características básicas.
- Dimensiones de ventilador y otros componentes como la sección de trabajo.

En las siguientes secciones se describen los materiales disponibles (adquiridos por el instituto y productos habituales en plaza resumidos en el apéndice B.1) y luego se explica el proceso de diseño iterativo tomado. Este se basa en el acondicionamiento del flujo para cumplir con los requisitos que se detallan en 8.1, y reducir las pérdidas de carga para obtener velocidades mayores en la sección de trabajo.

8.1. Condiciones de dimensionamiento

En esta sección se detallan las pautas establecidas para el dimensionamiento del túnel de viento.

8.1.1. Condición para calibración de anemómetros

Las especificaciones para un túnel de viento para calibrar anemómetros están especificadas por la norma IEC 61400-12-1 [25]. En la cual se define que la sección de trabajo no puede tener dimensiones menores a 1 $m \times 1$ m para evitar bloqueos inadmisibles, y debe alcanzar velocidades de por lo menos 16 m/s. De todas formas, se acostumbra a calibrar a mayores velocidades cuando los anemómetros son utilizados en condiciones donde se supera dicho valor regularmente.

Las indicaciones de la norma establecen dimensiones mínimas para la zona de trabajo y para la velocidad que se establezca en la misma. A su vez, se requiere una intensidad de turbulencia axial menor al 2 % en la zona de trabajo, y que la no uniformidad del flujo sea menor al 0,2 % en la zona donde se realice la medición[1].

8.1.2. Condición para ensayar perfiles aerodinámicos

El ensayo de perfiles aerodinámicos comúnmente se trata de un análisis donde se somete el perfil a ángulos de ataque cercanos a cero, llegando hasta la entrada

[1]Esto quiere decir que la máxima diferencia en la velocidad media del flujo, entre dos puntos cualesquiera donde se realiza la medición, no puede superar el 0,2 %.

en pérdida de sustentación. A su vez, se busca someter al perfil a un flujo lo más uniforme posible y donde la presencia de este no genere un bloqueo significativo de la sección de trabajo. Debido a que los requerimientos para calibración de anemómetros son más restrictivos, se toma en cuenta solo el criterio de bloqueo y máximo número de Reynolds.

El bloqueo afecta directamente en el error introducido en las mediciones de velocidad, y crece en el caso de mediciones de fuerzas y potencias. A los efectos del diseño de la sección de trabajo, se toma el criterio de bloqueo como aquel que introduzca errores admisibles en la medición de fuerzas con un perfil previo al Stall, siendo esta la posición que introduce mayor bloqueo sobre la sección de trabajo. El bloqueo máximo se fija en 5 %, basándose en las recomendaciones propuestas por [26], que introduce un error de 10 % en la medición de fuerzas con perfiles en condición de Stall (8.1).

$$\beta = \frac{A - A'}{A} \tag{8.1}$$

Donde A y A' son las áreas de pasaje del flujo en la sección libre y bloqueada respectivamente. En la figura 8.2 se muestran las diferentes secciones donde el perfil genera un bloqueo. Para definir su valor, se toma sección con menor área de pasaje.

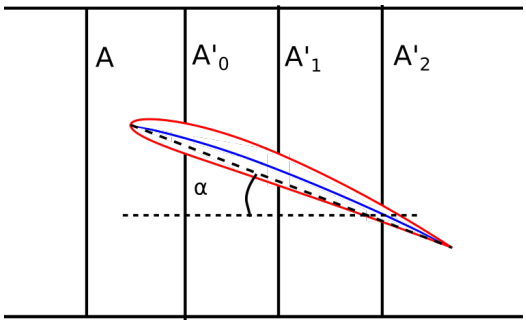


Figura 8.2: Áreas de pasaje en la definición del factor de bloqueo β

El criterio de dimensionamiento de la zona de trabajo, es el de maximizar el número de Reynolds del perfil (8.2), tal que se pueda acercar la condición de automodelado. Se considera que se está en dichas condiciones para valores superiores a 10^6, por lo que es suficiente alcanzar estos valores en condiciones nominales.

$$Re = \frac{v\, l_c}{\nu} \tag{8.2}$$

Para la ecuación anterior, v, es la velocidad del flujo incidente, sobre el perfil, l_c es su largo de cuerda y ν es la viscosidad cinemática.

8.1.3. Presupuesto y espacio disponible

El presupuesto y espacio disponible establecen limitantes tanto para el diseño del túnel de viento, como para su construcción. El espacio disponible en el túnel de

viento se estima una región de $12\,m$ de longitud y $5\,m$ de ancho. El espacio resulta reducido en caso de optar por un difusor o contracción con grandes relaciones de área, por lo tanto, se limita la posibilidad de reducción de pérdidas de carga de la instalación.

Por otra parte, el presupuesto disponible se estima en torno a $U\$S$ 10,000, por ende se opta por diseños que requieran menores materiales y mano de obra.

8.2. Proceso de dimensionamiento

En esta etapa del diseño se quiere definir las dimensiones de la zona de trabajo, lugar donde se efectúan las calibraciones y ensayos de perfiles aerodinámicos. La forma de establecer sus dimensiones depende de las velocidades alcanzadas en la misma. Para ello se define un coeficiente de pérdida de carga adimensionado[2] k (8.3), y un rendimiento del ventilador η (8.4).

$$k = \frac{H}{\frac{v^2}{2\,g}} \tag{8.3}$$

$$\eta = \eta_v\ \eta_h\ \eta_m \tag{8.4}$$

En la primera ecuación, H es la carga entregada por el ventilador, v es la velocidad establecida en la zona de trabajo y g es la aceleración gravitatoria. En la segunda ecuación, η_v ,η_h y η_m son el rendimiento hidráulico, volumétrico y mecánico del rotor. Los valores de k y η, son estimados conservadoramente acorde a valores típicos de pérdidas de carga en túneles de viento y rendimientos comunes para ventiladores, obteniéndose $k = 1$ y $\eta = 0,75$.

Una vez definido el tamaño de la zona de trabajo, es posible hacer un análisis de las dimensiones posibles de: la contracción, el difusor y el diámetro del rotor.

El proceso empleado para establecer las dimensiones se esquematiza en la figura 8.3. Allí se observa como luego de decidir valores estimados de k y η, se calculan la carga y caudal que se tendrían, y comienza el análisis de dimensiones para la zona de trabajo. Luego se determinan las relaciones de contracción y difusión necesarias para reducir las pérdidas de carga. Por último, se predimensiona el rotor del ventilador para conocer aproximadamente el tamaño que debería tener y si resulta compatible con la difusión planteada.

[2]Referido a la velocidad de la zona de trabajo

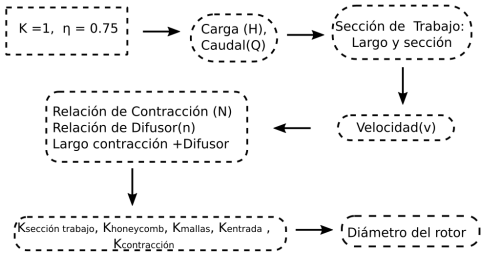


Figura 8.3: Proceso de predimensionamiento

8.2.1. Dimensiones de la zona de trabajo

El túnel de viento debe estar dimensionado para dos propósitos: calibración de anemómetros, y ensayo de perfiles aerodinámicos. La condición principal de diseño es la calibración de anemómetros, mientras que las variables restantes se deben optimizar de modo de ensayar perfiles aerodinámicos y adecuarse al espacio y presupuesto disponible.

El proceso iterativo detallado en la figura 8.3 comienza por la zona de trabajo. Partiendo de las dimensiones mínimas para la sección de trabajo establecidas por la norma [25], se identifica la necesidad de aumentar la sección de trabajo para lograr maximizar valores de Re al ensayar perfiles aerodinámicos.

Los perfiles serán ensayados en la posición horizontal, haciendo uso de la balanza aerodinámica detallada en el apéndice B.1.4. Para estos ensayos, es posible alcanzar mayores velocidades si se adopta el ancho mínimo, establecido por la norma, de 1 m. De esta forma, se aumenta el valor de Re debido a que no se modifica el largo de cuerda del perfil. En lo que respecta a la otra dimensión, la altura, se procede a evaluar los distintos perfiles aerodinámicos que se podrían ensayar sin comprometer el criterio de bloqueo.

Considerando las condiciones de dimensionamiento y lo descrito anteriormente, las dimensiones preliminares se resumen en:

- Ancho de la sección: $1\,m$
- Altura de la sección: mayor a $1\,m$
- $P_m = 45\,kW$
- $\eta = 0,75$
- $\beta = 0,05$

La potencia entregada al fluido por el ventilador, viene dada por la ecuación (8.5). A partir de la misma, se estima la velocidad del flujo, en función del área de pasaje, el coeficiente de pérdida de carga k, la densidad ρ y la potencia del motor P una vez aplicado el rendimiento η, obteniendo (8.6).

$$P\,\eta \;=\; \rho\,k\,A\,\frac{v^3}{2} \tag{8.5}$$

$$v \;=\; \left(\frac{2\,P\,\eta}{\rho\,k\,A}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{8.6}$$

Sustituyendo (8.6) en la ecuación del número de Reynolds para un perfil aerodinámico (8.2) se obtiene una expresión para el número de Reynolds compuesta por parámetros conocidos y variables de carácter constructivo, (8.7). A partir de esta expresión se deduce que a mayores largos de cuerda del perfil se obtienen mayores valores de Re.

$$Re \;=\; \left(\frac{2\,P\,\eta}{\rho\,k\,A}\right)^{\frac{1}{3}}\;\frac{l_c}{\nu} \tag{8.7}$$

A los efectos del diseño de la sección recta del túnel se considera el perfil NACA 4418, empleado normalmente en las palas de aerogeneradores, como referencia para analizar el bloqueo introducido. Este se calcula mediante la proyección del espesor del perfil, aproximado por un prisma de largo y ancho igual a su longitud de cuerda y espesor, respectivamente, ver figura 8.4.

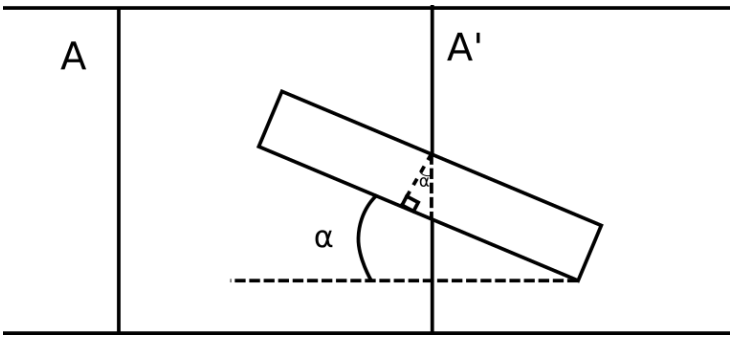


Figura 8.4: Modelado del bloqueo introducido por perfil aerodinámico

Para el caso presentado en la figura 8.4, el bloqueo introducido por el perfil aerodinámico sigue la expresión (8.8).

$$\beta \;=\; \frac{L - \frac{0{,}18\,l_c}{cos(\alpha)}}{L} \tag{8.8}$$

Imponiendo un bloqueo máximo de $\beta = 5\,\%$, se obtiene una longitud de cuerda máxima para cada altura de túnel L.

Para la evaluación de las distintas secciones existe un compromiso entre velocidad de pasaje y largo de cuerda explicado a continuación:

- Para aumentar la velocidad de pasaje se debe reducir la sección de trabajo y, por lo tanto, reduce el largo de cuerda máximo del perfil (de manera de evitar un bloqueo excesivo al ensayar ángulo de ataque típicos como son 15º-20º).

- Se puede aumentar el largo máximo del perfil, para lo cual se debe aumentar una de las dimensiones de la sección transversal, reduciendo la velocidad de pasaje.

La evaluación se realiza observando tres tablas comparativas que se presentan a continuación. En primer lugar, se evalúa la velocidad máxima alcanzable en la zona de trabajo, variando únicamente su altura, detallada en la tabla 8.1. Se puede apreciar que un amplio rango de alturas de la sección de trabajo cumplen con las especificaciones de velocidad requeridas para la calibración de anemómetros (velocidad máxima necesaria de 16 m/s).

Tabla 8.1: Velocidades máximas alcanzables

L (m)	Seccion 1xL (mˆ2)	Dh (m)	velocidad (m/s)
1	1	1,00	38,6
1,1	1,1	1,05	37,4
1,2	1,2	1,09	36,4
1,3	1,3	1,13	35,4
1,4	1,4	1,17	34,5
1,5	1,5	1,20	33,8
1,6	1,6	1,23	33,0
1,7	1,7	1,26	32,4
1,8	1,8	1,29	31,8
1,9	1,9	1,31	31,2
2	2	1,33	30,7

Por otra parte, de manera de obtener valores de Reynolds más altos, se busca un largo de cuerda que permita la obstrucción máxima admisible. Fijándose en 5 % el bloqueo, se contemplan las alturas para las cuales $Re = 10^6$ aproximadamente. Se observan los largos de cuerda admisibles en la tabla 8.2, donde α es el ángulo de ataque, definido en la figura 8.5.

Tabla 8.2: Largos de cuerda admisibles para alturas de zona de trabajo 1,3, 1,4 y 1,5 m.

		Obstrucción de 5 % para ángulo αde :			
		20	15	10	5
1,3	Rex10ˆ-6	0,77	0,79	0,80	0,81
	Lc (m)	0,34	0,35	0,36	0,36
1,4	Rex10ˆ-6	0,80	0,83	0,84	0,85
	Lc (m)	0,37	0,38	0,38	0,39
1,5	Rex10ˆ-6	0,84	0,87	0,88	0,89
	Lc (m)	0,39	0,40	0,41	0,42

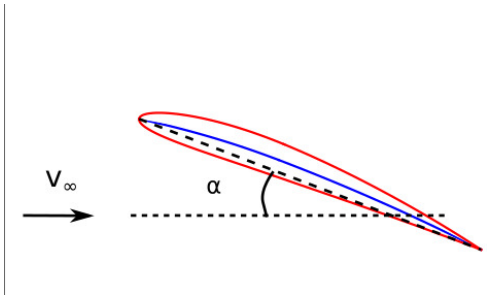


Figura 8.5: Incidencia del flujo sobre un perfil

En la primera columna de las tablas 8.3 y 8.4, se presenta una comparación de los números de Reynolds máximos alcanzables para un largo de cuerda fijo. Luego se muestra el error introducido en la medición de fuerza ocasionada al variar el ángulo de ataque, en valores discretos de 20, 15, 10 y 5 grados.

Tabla 8.3: Bloqueo para largo de cuerda de 0,305 m.

Lc = 0,305 m					
L (m)	Rex10ˆ-6	Obs (%) para $\alpha = 20$	Obs (%) para $\alpha = 15$	Obs (%) para $\alpha = 10$	Obs (%) para $\alpha = 5$
1	0,75	5,8	5,7	5,6	5,5
1,1	0,73	5,3	5,2	5,1	5,0
1,2	0,71	4,9	4,7	4,6	4,6
1,3	0,69	4,5	4,4	4,3	4,2
1,4	0,67	4,2	4,1	4,0	3,9
1,5	0,66	3,9	3,8	3,7	3,7

Tabla 8.4: Bloqueo par largo de cuerda de 0,458 m.

Lc = 0,458 m					
L (m)	Rex10ˆ-6	Obs (%) para $\alpha = 20$	Obs (%) para $\alpha = 15$	Obs (%) para $\alpha = 10$	Obs (%) para $\alpha = 5$
1	1,13	8,8	8,5	8,4	8,3
1,1	1,09	8,0	7,8	7,6	7,5
1,2	1,06	7,3	7,1	7,0	6,9
1,3	1,03	6,7	6,6	6,4	6,4
1,4	1,01	6,3	6,1	6,0	5,9
1,5	0,98	5,8	5,7	5,6	5,5

La influencia de L sobre Re es mucho menor que la que tiene l_c, por lo que se opta por un mayor largo de cuerda dentro de lo posible. A partir de los resultados, se evalúa qué dimensión de túnel permite el ensayo en un amplio rango de ángulos de ataque, con un largo de cuerda tal que permita estar en condiciones de automodelado, además de poder alcanzar velocidades más altas.

Analizando la tabla 8.2, se aprecia como los valores de Re no alcanzan el deseado, pero sí se acercan a $0{,}80 \times 10^6$ en el caso $L = 1{,}4\,m$. Si se quisieran alcanzar Reynolds mayores, el bloqueo resultaría inadmisible para relevar las fuerzas de Sustentación y Arrastre (ya que introducirían un error mayor al 10 %).

Observando los largos de cuerda que permitirían ensayar con un bloqueo menor a 5 %, se observa que el valor límite se encuentra por debajo de $0{,}458\,m$.

Considerando todos estos aspectos, se decide una altura de sección de trabajo de $1{,}4m$.

8.2.2. Dimensiones de la contracción y difusor

Uno de los aspectos mencionados en la sección 8.1, es la necesidad de obtener un flujo uniforme y con niveles bajos de turbulencia para poder realizar calibraciones de anemómetros según la norma IEC. Para obtener estas condiciones en el flujo, la implementación de una sección con un enderezador de flujo tipo panal de abejas (Honeycomb) y las mallas resulta indispensable.

Ambos componentes cumplen la función de uniformización del flujo y reducción de escala de la turbulencia. Sin embargo, su geometría presenta muy baja porosidad, generando grandes obstrucciones. Por lo tanto, imponen importantes pérdidas de carga si se consideran velocidades del orden de $30\,m/s$, como las buscadas en la sección de trabajo. La manera de sortear este inconveniente es reduciendo la velocidad en la región de acondicionamiento del flujo. Esto es posible lograrlo aumentando la sección en dicha región, implementando una contracción.

De manera similar, existen pérdidas de carga a la descarga del túnel. Si esta se encontrara a continuación del ventilador, se tendrían velocidades altas a la descarga, afectadas por un $k_{sal} = 1$. Un indicador de un buen diseño de túnel de viento de circuito abierto es que la suma de todos los coeficientes de pérdida de carga sean menores a 1, por lo cual resulta evidente la necesidad de disminuir la velocidad a la salida. Por lo tanto, colocar un difusor luego del ventilador sería una manera eficiente de reducir las pérdidas a la salida de la instalación.

A continuación se presentan las constantes de pérdida de carga que se asocian a cada componente en esta primera instancia. Todos estos valores fueron determinados a partir de [27], a excepción de la contracción que se utilizó [28].

$$
\begin{aligned}
k_{hon} &= 0,53\,/\,N^2 \\
k_{cont} &= 0,002\left(1 - \frac{1}{N^2}\right) \\
k_{m_1} &= 0,57\,/\,N^2 \\
k_{m_2} &= 1,56\,/\,N^2 \\
k_{dif} &= 0,59\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \\
k_{ent} &= 0,5\,/\,N^2 \\
k_{sal} &= 1\,/\,n^2
\end{aligned}
$$

siendo k_{hon} el coeficiente impuesto por el Honeycomb (diagrama 8.5 de [27]), k_{m_1} y k_{m_2} los impuestos por las mallas (diagrama 8.54 [27]), k_{cont} impuesto por la contracción (Pág. 11 [28]) y k_{dif} por el difusor (tabla 5.1 [27]). Se agregan las pérdidas a la entrada y salida, k_{ent} y k_{sal} respectivamente, más allá de ser valores fijos. Todos ellos son afectados por la relación de áreas al cuadrado para ser referenciadas a la velocidad en la sección de trabajo, por eso sus valores dependen de N^2 o n^2 (siendo N la relación de contracción y n la de difusión).

Resulta pertinente destacar el motivo por el que se colocan en principio dos mallas de diferentes dimensiones. Estas dos, en conjunto con el Honeycomb, tienen

como objetivo reducir la escala de la turbulencia hasta valores menores a la escala geométrica que presentan en los anemómetros a calibrar. Es por ello, que se debe respetar cierto criterio para determinar el área de pasaje de una etapa respecto a la anterior. Con este objetivo, se utiliza un factor de $1,6$ aproximadamente para reducir desde una etapa a la siguiente (este se referencia en la sección 9.3). En el caso del Honeycomb, los vórtices desprendidos tendrían un diámetro de aproximadamente la mitad de su diámetro hidráulico. Pero luego, en la etapa de mallas, la escala de sus vórtices si corresponde a las dimensiones de la malla. Estos conceptos, al igual que el análisis detallado de las dimensiones que correspondan utilizar, se pueden observar en el diseño final de los componentes en las secciones 9.3.2 y 9.3.3.

Para decidir cuál es la relación de contracción y difusión que permite disminuir las cargas a valores admisibles, se debe tener en cuenta también el compromiso de tamaño que cobraría el túnel en total. En primer lugar, en la tabla 8.5 se observa la constante de pérdida de carga resultante dependiendo de N (relación de contracción) y n (relación de difusión). Luego en la tabla 8.6 se muestra el largo total que tomaría el túnel, considerando un largo de zona de trabajo de $2\,m$ como primera aproximación. Dicho largo fue calculado realizando la proyección de la geometría de la contracción y difusor en el suelo, teniendo en cuenta las relaciones N, n y el ángulo medio que forman con la zona de trabajo.

Tabla 8.5: Valores de perdida de carga estimados para cada relación de contracción-difusión

N\n	1	2	3	4	5	6
1	4,16	3,85	3,79	3,77	3,77	3,76
2	1,79	1,48	1,43	1,41	1,40	1,39
3	1,35	1,04	0,99	0,97	0,96	0,95
4	1,20	0,89	0,83	0,81	0,80	0,80
5	1,13	0,82	0,76	0,74	0,73	0,73
6	1,09	0,78	0,72	0,70	0,70	0,69

Tabla 8.6: Largo estimado en metros de la contracción, sección de trabajo y difusor

N\n	1	2	3	4	5	6
1	2,0	3,4	4,5	5,5	6,3	7,0
2	4,0	5,4	6,5	7,4	8,3	9,0
3	5,5	6,9	8,0	9,0	9,8	10,5
4	6,8	8,2	9,3	10,2	11,1	11,8
5	7,9	9,3	10,4	11,4	12,2	12,9
6	8,9	10,3	11,4	12,4	13,2	13,9

Luego de evaluar las distintas combinaciones, se opta por la configuración cuyo k total se aproxima a 1 y mantiene los valores de largo por debajo de los $10\,m$ con un margen apreciable. De esta manera, se define la relación de contracción $N = 3$ y de difusión $n = 3$.

8.2.3. Diámetro del rotor

Una vez determinados estos parámetros, existe una dimensión más a determinar previo al diseño específico de todos los componentes. Como se puede observar, la sección de trabajo considerada es rectangular, mientras que una sección circular es la solicitada para la etapa del rotor. Este pasaje se debe realizar implementando una pieza de transición.

En primera instancia, se debe determinar el diámetro de la sección circular para poder decidir si la pieza de transición es difusiva, contractiva o simplemente mantiene el diámetro hidráulico de la sección de trabajo. Para ello, se realiza una aproximación por el diagrama de Cordier 8.6. Dicha curva es obtenida mediante un análisis estadístico de turbomáquinas de buenos rendimientos. Para poder obtener un valor recomendado de diámetro exterior del rotor a partir de este, se debe calcular la velocidad específica Ω con la siguiente formulación:

$$\Omega = \frac{\frac{2\,\pi\,N}{60}\sqrt{Q}}{(g\,H)^{3/4}} \tag{8.9}$$

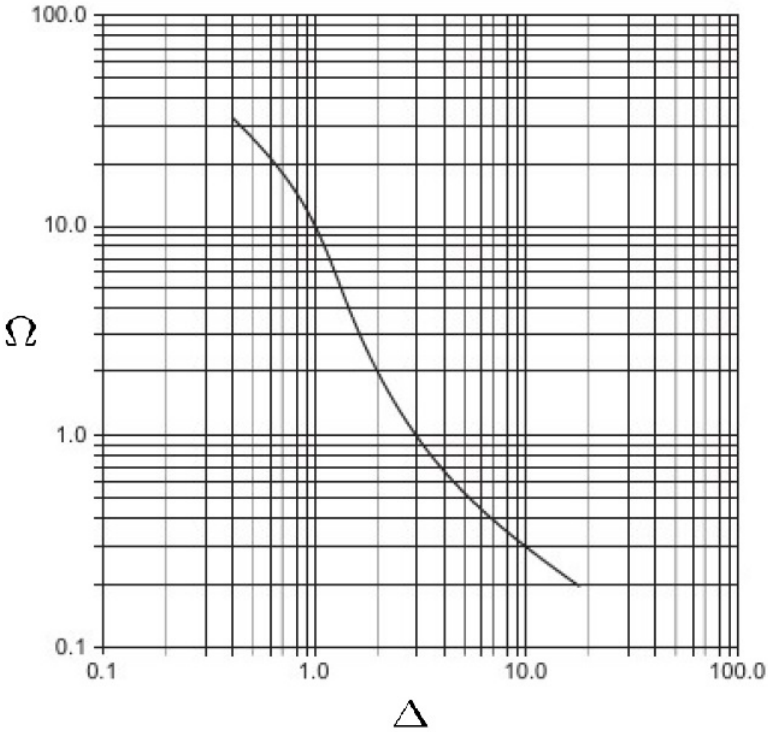


Figura 8.6: Diagrama de Cordier

A continuación se detallan los parámetros nominales preliminares y el valor

resultante de Ω:

$$\begin{aligned} v &= 34,6\, m/s \\ N &= 985\, rpm \\ k &= 1 \\ H &= 60,9\, m \\ Q &= 48,4\, m^3/s \\ \Omega &= 5,9 \end{aligned}$$

Observando el diagrama, se distingue que para la velocidad específica hallada, el valor del diámetro específico sería $\Delta = 1,1$, cuya fórmula es:

$$\Delta = \frac{D\ (g\, H)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{Q}}, \tag{8.10}$$

Por lo tanto, despejando el valor del diámetro exterior del rotor, se observa que debería encontrarse en torno a 1,6 metros. Se selecciona un diámetro de 2 metros para poder continuar el diseño de los diferentes componentes, ya que en este caso, el cubo toma importantes dimensiones para resguardar al motor eléctrico del flujo incidente. A pesar de elegir un valor distinto, el diámetro específico nuevo es de 1,4, sin prejuicio de perder puntos de rendimiento, dado que el diagrama de Cordier es de carácter estadístico.

Como consecuencia de ello, la pieza de transición pasa a ser difusiva, y el propio difusor disminuye su largo total. Ya que la sección del ventilador es mayor que antes, se necesita una relación de difusión final menor.

De esta manera quedan determinados los parámetros generales necesarios para comenzar el diseño aerodinámico en detalle de cada componente separado, y así poder obtener un valor más preciso del coeficiente de pérdida de carga de la instalación y de los valores nominales de funcionamiento. Para alguno de ellos se necesita una velocidad máxima aproximada, por lo que se toma la velocidad obtenida en este predimensionamiento y luego se actualiza al tener las pérdidas de carga detalladas. También, quedan sentadas las bases para dimensionar correctamente el ventilador y calcular su rendimiento. Estos aspectos son abarcados en el capítulo 9.

Capítulo 9

Túnel de Viento: Diseño aerodinámico

Continuando con el razonamiento planteado en el capítulo 8, se detalla el proceso de diseño de cada uno de los componentes desde un punto de vista aerodinámico. En particular, se tratan los componentes en orden de aparición según el sentido del flujo, a excepción del ventilador.

Esta organización se debe a que para dimensionar correctamente el rotor es necesario conocer más en detalle las pérdidas de carga que se le atribuyen a los demás componentes (en función de la velocidad en la sección de trabajo). Finalmente, se presenta el rendimiento estimado del ventilador junto a un resumen del procedimiento seguido, desde el comienzo del predimensionamiento del túnel.

9.1. Consideraciones generales de materiales

Todas las superficies internas están en contacto con el fluido en movimiento, por lo tanto, la rugosidad de los mismos dan lugar a un incremento de las pérdidas de carga, aumento del espesor de la capa límite y producción de turbulencia. Estos efectos se mitigan eligiendo materiales con rugosidades absolutas bajas.

El material que se considera, en caso de que no se aclare en contrario, es fibra de madera cuya rugosidad absoluta está en el rango de $\Delta = 0,12 - 0,90\ mm$. Para conocer este valor se debería realizar un ensayo de pérdida de carga, por lo que de manera conservadora se toma la cota superior de $\Delta = 0,90\ mm$.

9.2. Labios de entrada y pared auxiliar

El objetivo de los labios a la entrada es reducir las pérdidas de carga en la toma de aire, ver figura 9.1. Esto lo logran guiando al flujo de aire que ingresa al túnel de viento realizando una pequeña contracción, evitando la separación de capa límite. La condición de funcionamiento de la toma de aire puede ser muy variada, sea por cambios en la disposición de objetos en el recinto o por tránsito de personas. Para evitar cambios en las condiciones del flujo se implementa una pared cercana a la toma. El procedimiento de diseño seguido es tomado de [27].

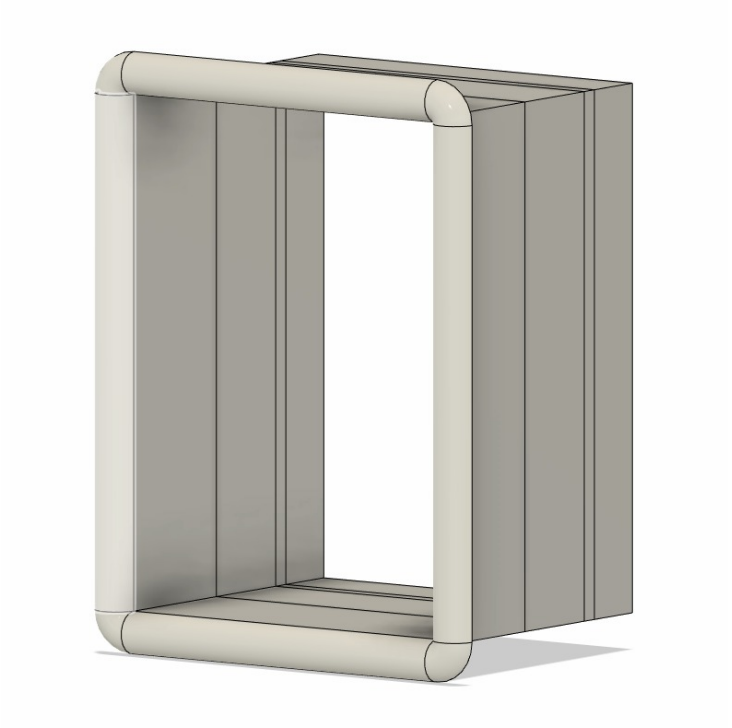


Figura 9.1: Labios de entrada

A continuación se expone de los valores hallados para su pérdida de carga y radio de curvatura:

$$\rho = 10\,cm$$
$$k_{l,p} = 0,042$$

donde $k_{l,p}$ se refiere al coeficiente de pérdida de carga del conjunto labios-pared y ρ el radio de curvatura de los labios de entrada. Además, se calcula el largo que adicionan a la instalación. En este caso se trata de $0,85\,m$.

9.3. Honeycomb y Mallas

Como mencionado en la sección 8.2.2, estos componentes cumplen el fin de acondicionar el flujo que recibe la zona de trabajo. Se tratan en la misma sección debido a su funcionamiento similar.

Estos elementos se disponen en serie a la entrada del túnel de viento. Con los siguientes objetivos:

- Reducir el nivel de turbulencia mediante el fenómeno estudiado por [29], denominado decaimiento de turbulencia.

- Reducir la escala integral de turbulencia Λ, produciendo vórtices de menor escala que los que se encuentran aguas arriba. Aumentando así la uniformidad del flujo.

A efectos de reducir la pérdida de carga impuesta por estos elementos, se suelen instalar en una sección recta de mayor área que la zona de trabajo de manera de reducir la velocidad de pasaje, disponiendo luego de una contracción aguas abajo.

9.3.1. Condiciones de diseño

El método de reducción de turbulencia consiste en la producción de turbulencia con una menor escala integral. Esto se logra disponiendo en serie una sección del Honeycomb seguida por una o más mallas. Se debe elegir cuidadosamente el tamaño de cada elemento para que la disipación de turbulencia sea máxima. Para lograr esto, la escala promedio de los vórtices generados por un componente, que son del orden del diámetro hidráulico de la sección de pasaje libre, debe ser menor que la escala de los vórtices del flujo incidente [29].

A lo largo de la sección se utiliza la nomenclatura que se observa en la figura 9.2; donde D_h y M son los diámetros hidráulicos de los tubos de sección hexagonal y de la malla respectivamente, y D el diámetro de los alambres que forman la malla.

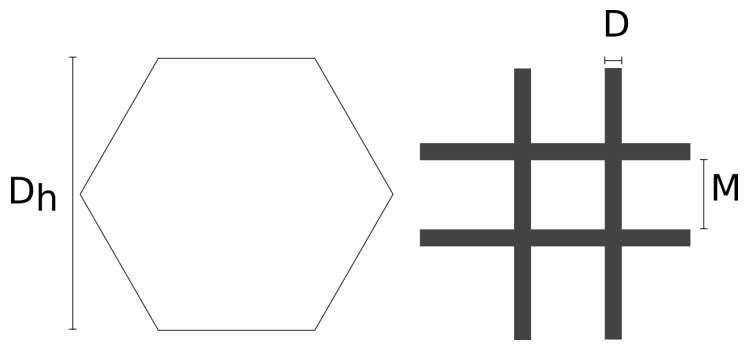


Figura 9.2: Diámetro hidráulico, mallas y Honeycomb

Dado que en la toma de aire las condiciones del flujo turbulento pueden ser muy variadas e impredecibles, se dispone de una sección de Honeycomb. Según [30], este componente "elimina" las componentes transversales de velocidad en su salida, siempre que el flujo en su interior sea turbulento completamente desarrollado. El motivo por el que no se utiliza una malla en su lugar es que, al tratarse de un cambio de escala muy grande para el flujo (sección del orden del metro a tubos del orden del centímetro), esta sería transparente para las escalas de turbulencia mayores.

A su vez, se produce turbulencia con una escala del orden de su diámetro hidráulico, la cual a una distancia x normalizada con la dimensión del diámetro hidráulico D_h de $x/D_h \geq 20$, alcanzara un régimen de turbulencia isotópico [31]. En el caso de que el flujo dentro del Honeycomb no sea completamente desarrollado, esto es, que la altura de la capa límite que se genera sobre cada una de las paredes

no se mezcle con las demás, puede darse el fenómeno de emisión de vórtices. Este fenómeno da lugar a la generación vórtices en un flujo laminar, los cuales no son disipados por la cascada turbulenta. Es necesario mitigar este efecto con una malla a la salida del Honeycomb especialmente diseñada para disipar estos vórtices. Esta es transparente para el flujo totalmente desarrollado, ya que su escala de vorticidad es mayor a la sintonizada.

Por otro lado, para las mallas se debe elegir su M de tal forma que los vórtices generados y los vórtices incidentes a la malla desde aguas arriba cumplan la relación: [32]

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \approx 1,6 \tag{9.1}$$

donde λ_i se refiera a la escala geométrica del vórtice.

Para ello es necesario conocer el tamaño de los vórtices incidentes. Esta escala depende de la distancia que se deje entre mallas. La macroescala de vórtices es el valor que se limita por la dimensión M de la malla y luego crece a medida que se aleja de ella. Para estimar el valor que tendrían los vórtices a una distancia x/M de de una $malla_i$ cualquiera, se utiliza la siguiente aproximación lineal (9.2) tomando la constante $K = 0,01975$ a partir de los datos de [33] (ver figura 6).

$$\lambda_1 \;=\; M\left(K\left(\frac{x}{M} - 1\right) + 1\right) \tag{9.2}$$

De manera similar al estudio realizado por [33], en términos de pérdidas de carga y eficacia, es más conveniente disponer de una malla gruesa seguida de una más fina antes que dos finas. Además, el estudio presenta distintos gráficos empíricos que pueden ser empleados mediante parámetros adimensionados como la longitud normalizada x/M. Es por esto que se toma como referencia el gráfico para una malla gruesa y una fina consecutiva.

En resumen, para un correcto diseño de estos elementos se consideran las condiciones descritas a continuación [28] [33]:

1. Porosidad en torno a 60 % para la última malla para evitar inestabilidades.

2. $Re_{cr} < Re_{nom}$ y $Re_{cr} = 2000$. Condición de régimen turbulento dentro de cada tubo del Honeycomb, evitando la emisión de vórtices.

3. Diseñar de tal manera que la siguiente malla esté en el periodo final de decaimiento [33]

4. Reducir la escala integral de los vórtices de mayor escala, mediante la concatenación de estos elementos en cascada.

5. Debido a que la turbulencia transversal es más difícil de reducir y mayor a la turbulencia axial, se toma como criterio su reducción y luego la axial estará por debajo de esta cota, ya que los niveles de turbulencia se redistribuyen. [33]

6. Distancia típica x corriente abajo desde la última malla hasta el inicio de la contracción para túneles de viento de bajas velocidades: $x = 0,2\,D_{h,contraccion}$ de la contracción.

7. Una malla gruesa seguida por una fina, presentan casi el mismo efecto de reducción de turbulencia que un par de mallas de tipo fino. Es preferible el primer par dado que imponen menores pérdidas de carga. [33]

9.3.2. Diseño del Honeycomb

Para el dimensionamiento del Honeycomb, es necesario considerar la configuración en serie con las mallas y realizar un estudio de la pérdida de carga y la calidad del flujo, imponiendo que las pérdidas sean la menor posible y la calidad del flujo aceptable. No obstante, en este caso ya se cuentan con los tubos de sección recta hexagonales de $D_h = 2,6\,cm$ y largo $L = 0,6\,m$. De ser necesario, estos elementos se consiguen por encargo, pero se utilizan los disponibles para basar el resto del diseño.

Se comienza evaluando la posible ocurrencia de emisión de vórtices debido a su operación a bajos números de Reynolds o por no desarrollarse el flujo completamente en su interior. Se estima que para velocidades por debajo de $8\,m/s$ en la zona de trabajo, se da la emisión de vórtices por no converger las capas límite de cada una de las superficies del Honeycomb [33]. Dado que es requisito para la calibración de anemómetros el contar con una alta uniformidad del flujo para velocidades de hasta $4\,m/s$, se debe colocar una malla a la salida del Honeycomb a una distancia de $2\,D_h$, dando lugar a la estabilización de los vórtices generados a la salida del tubo. El tamaño de estos vórtices se estima como $\approx D_h/4$.

El coeficiente de pérdida de carga producida por la sección de Honeycomb, calculada con (9.3), es $k = 0,022$. Las dimensiones características de la sección del Honeycomb se presenta en la tabla 9.1, donde es de interés destacar que es necesario un largo de $0,65\,m$ para estos elementos, contando la distancia de $2\,D_h$ hasta la primer malla.

Tabla 9.1: Datos de la sección del Honeycomb

Honeycomb	
$D_h(m)$	0,026
L	0,6
$Grosor(mm)$	1,2
$Porosidad$	0,844
x/M	2,0

9.3.3. Diseño de las mallas

La primera malla se referencia como $malla_0$ y se diferencia de la segunda debido a que se coloca cerca del Honeycomb. Su objetivo es eliminar los vórtices para condiciones de flujo a velocidades bajas donde no se desarrolla completamente.

La distancia que se deja entre estos dos elementos no será igual a la necesaria para alcanzar el período de decaimiento. Como se establece en la sección anterior, la primera malla se coloca a $2\,D_h$ del Honeycomb, respetando la relación (9.1).

Las dimensiones de las restantes mallas están determinadas por el tamaño del vórtice incidente luego del decaimiento de turbulencia y se dimensionan siguiendo la misma relación. Estas dos son las que se evalúan en el predimensionamiento, ya que se necesitan para alcanzar las condiciones del flujo cuando este es totalmente desarrollado.

En la tabla 9.2 se específica las dimensiones características de las mallas y la reducción de turbulencia que inducen. Definiendo una distancia $x/M = 20$ desde el Honeycomb a la $malla_1$ para que el flujo esté en condiciones de isotropía, en el caso totalmente desarrollado. De igual forma, se respeta la misma relación $x/M = 20$ desde la $malla_1$ hasta la $malla_2$.

Desde la $malla_2$ hasta la entrada de la contracción, se le deja una distancia x/M mayor, para reducir al máximo la intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia a la entrada de la contracción se estima estar en torno a $1,3\,\%$. Los valores $\Lambda(mm)$ y $L_{Final}(mm)$ son estimaciones de la longitud característica de los vórtices en la entrada de la contracción [29, 33].

Tabla 9.2: Características de las mallas

	$malla_1$	$malla_2$
$M(m)$	0,004	0,003
$d_{alambre}$ (mm)	1	1
$Porosidad$	0,640	0,563
$radio(m)$	0,0020	0,0015
$\lambda/1,6$	0,0041	0,0034
x/M	20	100
$I(\,\%)$	4,2	1,3
$\Lambda(mm)$	5,5	8,9
$L_{Final}(mm)$	-	7,5

9.3.4. Pérdida de carga y largo requerido

El método de estimación de pérdida de carga utilizado es el provisto por [33], consistente en la ecuación:

$$k \;=\; f(Re)\,\frac{1-\sigma^2}{\sigma^2} \tag{9.3}$$

donde σ es la porosidad. La función $f(Re)$ es una curva empírica, que para valores mayores a $Re = 100$ se vuelve aproximadamente constante (valor $0,45$).

El coeficiente de pérdida de carga k está referenciado a la velocidad de incidencia a la malla o Honeycomb. Es por ello que estos valores son reescalados a la velocidad en la sección de trabajo para ser utilizados en secciones posteriores.

Las pérdidas de cargas impuestas por las mallas y el Honeycomb en la tabla 9.3 y el largo requerido en la tabla 9.4.

Tabla 9.3: Coeficientes de pérdida de carga de la zona de acondicionamiento.

$k_{Honeycomb}$	k_{malla_0}	k_{malla_1}	k_{malla_2}
0,022	0,072	0,072	0,108

Tabla 9.4: Largos requeridos de la zona de acondicionamiento.

$Lreq_{Honeycomb}$	$Lreq_{malla_0}$	$Lreq_{malla_1}$	$Lreq_{malla_2}$
0,65	0,47	0,08	0,30

9.4. Contracción

El diseño de la contracción se justifica por los beneficios que presenta en numerosos túneles de viento [28]. Estos se ordenan según prioridad:

- Reduce la pérdida de carga causada por las mallas y Honeycomb
- Reduce a turbulencia generada en las mallas producida por la baja velocidad aguas arriba
- La intensidad de turbulencia disminuye a medida que aumenta la velocidad media en la contracción.
- Cuanto mayor sea la contracción, mayor la uniformidad del flujo

Sin embargo, presenta dificultad constructiva por su complejidad geométrica para generar el pasaje a una sección de diferentes dimensiones. Para facilitar su construcción a partir de materiales planos, se suele presentar las dimensiones en una vista en planta, como se menciona en la sección 10.3.

Otro aspecto a destacar, es que los gradientes de presiones son favorables, debido a la aceleración del flujo por las paredes de la contracción. Sin embargo, se puede demostrar que existen dos puntos donde los gradientes de presiones son adversos. Dichos puntos se encuentran a la entrada y a la salida de la contracción, y son ocasionados por el inevitable cambio de dirección del flujo [34]. Se analizan parámetros en estos puntos en (9.6) y (9.7).

9.4.1. Diseño de la contracción

El diseño de este elemento, se realiza siguiendo el trabajo de [35]. En el mismo, se propone una geometría formada por arcos de polinomios de 3er grado que, además de ser de simple construcción, es la que presenta mejores prestaciones que otros arcos de polinomios.

El dimensionamiento de la contracción se basa mayoritariamente en la elección de una geometría con la menor longitud final posible, que no introduzca grandes pérdidas de carga o no uniformidades en el flujo en la entrada de la zona de trabajo. Estos efectos son producidos principalmente por el desprendimiento de la capa límite en los puntos de entrada y salida, pero también por tener una capa límite muy profunda en su extremo de salida. Cuanto más larga sea la contracción, mayor profundidad presentará la capa límite a la salida. Sin embargo, de ser muy corta provocará el desprendimiento de la misma. Por otro lado, debido a los métodos constructivos disponibles, es preferible elegir una geometría simple, dado que en la construcción en carpintería fácilmente se llegan a errores en torno al centímetro.

La geometría adimensional de la contracción es definida mediante cuatro parámetros: la relación de contracción N, la uniformidad a la entrada de la zona de trabajo u_2, el coeficiente de presiones a la salida de la contracción C_{pe} y el coeficiente de presiones a la entrada de la contracción C_{pi}.

Los coeficientes se definen utilizando las siguientes ecuaciones:

$$C_{pe} = 1 - \left(\frac{U_{2,\infty}}{V_e}\right)^2 \tag{9.4}$$

$$C_{pi} = 1 - \left(\frac{V_i}{U_{1,\infty}}\right)^2 \tag{9.5}$$

Donde V_i y V_e son las velocidades en las esquinas y fuera de la capa límite respectivamente, y $U_{i,\infty}$ la velocidad lejos de las paredes.

El coeficiente de presiones a la salida de la contracción, C_{pe}, se relaciona con la uniformidad a la entrada de la zona de trabajo, u_2, de la siguiente forma:

$$u_2 \approx 0,35\, C_{pe} \tag{9.6}$$

Mientras que el coeficiente de presiones a la entrada de la contracción C_{pi}, depende de las distancias axiales desde la última malla hasta la contracción (x_o) y desde la entrada de la contracción al punto de menor velocidad de pared (x_i). También se requiere el número de Reynolds en x, R_x, y una distancia s que se define en la figura 9.4.

$$C_{pi} = 0,7\left(\frac{x_o + 0,9\, x_i}{s}\right)^{-1/3} (10^{-6}\, R_x) \tag{9.7}$$

El valor de x_i se obtiene utilizando la gráfica de la figura 9.3, donde en la notación de la gráfica, CR es la relación de contracción.

Por otro lado, la distancia s se obtiene iterando utilizando la figura 9.4 y aproximando por el valor de $N = 3$ de contracción estimado en el capítulo 8.

Por las condiciones de diseño se espera tener una no uniformidad $u_2 \leq 0,2\,\%$ en la sección donde se ensaya el anemómetro. La relación (9.6) establece la no-uniformidad al inicio de la zona de trabajo, pero imponer un valor tan pequeño de u_2 hace que C_{pe} salga fuera del diagrama de la figura 9.4. Para resolver el problema, se hace uso de la ecuación (9.8), que establece que la no-uniformidad decrece de forma exponencial dentro de la sección de trabajo.

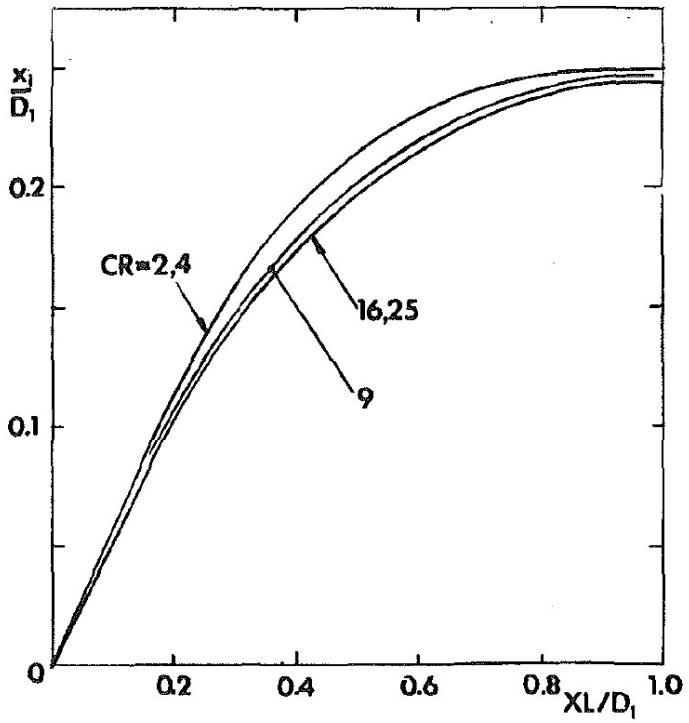


Figura 9.3: Distancia del inicio de la contracción hasta presión máxima de la pared vs la distancia desde el inicio de la contracción hasta X_m [35].

$$u_2(x) = u_{2_o}\, e^{-7{,}5\, x/D_1} \tag{9.8}$$

Por lo que empleando un valor $u_{2_o} = 2\,\%$, a una distancia de 1 m se obtiene una no-uniformidad aceptable de 0,05 %. De esta forma se logra un $C_{pe} = 0,06$. Tanto C_{pe} como C_{pi} establecen cotas superiores para el C_p del flujo para que no se separe la capa límite en ese punto.

Por su parte, como la relación de contracción afecta directamente al largo del túnel, se opta por mantener el valor de $N = 3$ que reduce a niveles aceptables las pérdidas de carga por el acondicionador de flujo (ver sección 8.2.2). Para estos cálculos se aproxima por la gráfica de la figura 9.5 de $N = 4$, dado que no presenta demasiada sensibilidad con este parámetro.

En la tabla 9.5 se muestra el proceso de dimensionamiento. Para una velocidad cercana a la nominal preliminar de 34 m/s se encuentra el C_{pi} requerido, utilizando (9.7) y el que realmente se da con dicha geometría. En verde se marcan las posibles geometrías que cumplen dicha condición. Luego en la tabla 9.6 se muestran los X_m máximos para cada L/D de tal forma que se tenga un C_p menor a C_{pe}.

A pesar de que $X_m = 0,5$ es un valor válido para $L/D = 0,85$, se considera que el rango de valores posibles es muy pequeño y dado que se trata de una estimación, se opta por un largo mayor de contracción para prevenir la posibilidad de desprendimiento de la capa límite.

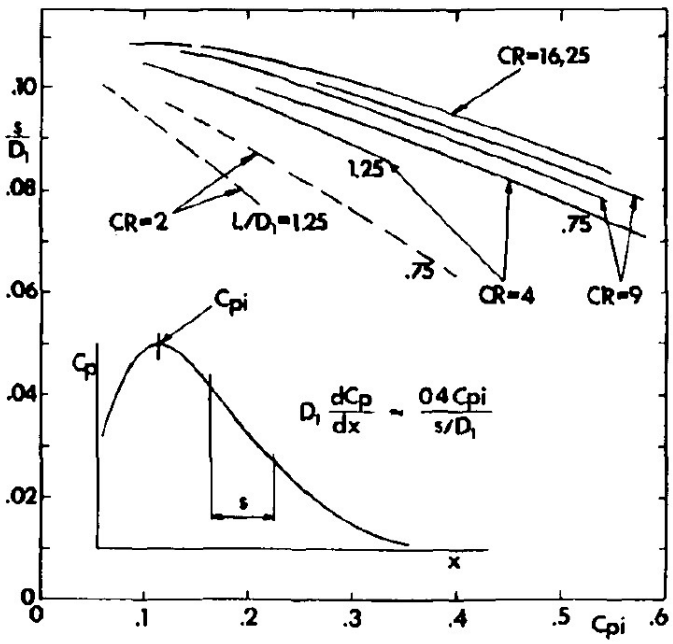


Figura 9.4: Gradiente de presiones en la pared [35].

Tabla 9.5: Comparación L/D vs X_m, condición de C_{pi} (N = 3)

X_m	0,5		0,6		0,7	
L/D	C_{pi} $(chart)$	C_{pi}	C_{pi} $(chart)$	C_{pi}	C_{pi} $(chart)$	C_{pi}
0,75	0,35	0,2	0,3	0,22	0,26	0,24
0,85	0,28	0,2	0,23	0,23	0,2	0,25
1	0,22	0,21	0,16	0,24	0,15	0,26
1,25	0,14	0,22	0,09	0,25	0,08	0,31

Tomando en consideración la información aportada en las tablas 9.5 y 9.6. Se opta por un largo adimensional de $L/D = 1,25$. Por otro lado, se sabe que la condición más exigente se da con velocidades bajas. Al bajar la velocidad, afecta directamente a C_{pi}, reduciendo su valor. Realizando el cálculo para 4 m/s se obtiene que es necesario un $C_{pi} \leq 0,034$. Visto que el limitante es este parámetro, se opta por tomar el X_m máximo de $0,65$. A pesar de que para 4 m/s la condición de no desprendimiento no se cumpla, se tienen dos soluciones:

- Aumentar L/D a $1,5$, mejoraría el desempeño de la contracción para velocidades altas, pero aumentaría la altura de la capa límite en la zona de trabajo para estas velocidades.

- Sabiendo que la no uniformidad decrece exponencialmente según (9.8), se puede dejar una distancia suficiente de la salida de la contracción, de tal forma que la no uniformidad baje nuevamente a $0,2\,\%$. De hecho, asumiendo

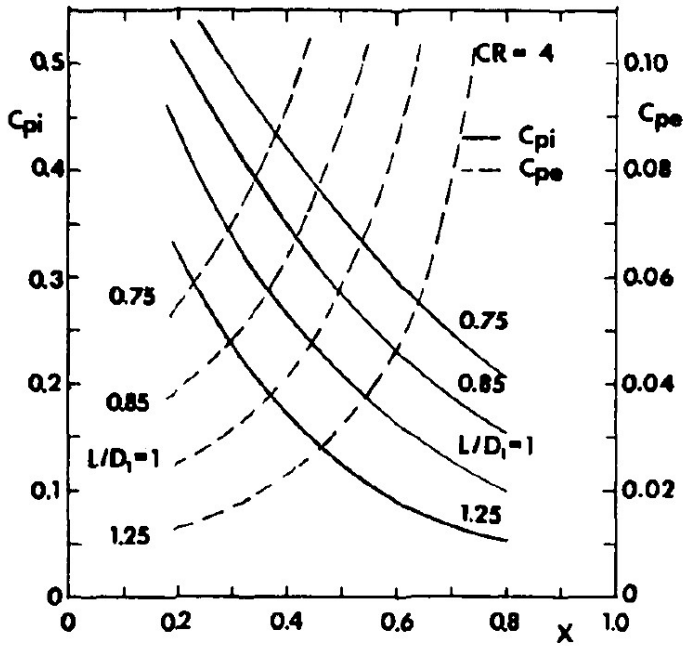


Figura 9.5: Diagrama de diseño para $N = 4\,(CR = 4)$ [35]

Tabla 9.6: Comparación L/D versus X_m, condición de C_{pe}

L/D	X_m
0,75	0,22
0,85	0,38
1	0,45
1,25	0,65

una no uniformidad del 10 % es posible reducirla a $1,56\,\%$ en una distancia de $0,5\ m$. Esta solución se considera la más adecuada.

En la tabla 9.7 se muestra la configuración final de la contracción, indicando las valores característicos de su diseño para una velocidad nominal estimada de $34\,m/s$. También se presentan los ángulos de contracción α y β, la rugosidad relativa λ y la velocidad crítica en la cual el C_{pi} dado por la contracción se iguala al requerido por el criterio de Stratford (9.7).

Tabla 9.7: Diseño final de la contracción

Geometría de diseño			
$Xm(medio)$	0,65	C_{pi}	0,085
N	3,0	C_{pe}	0,006
$D_{eq}(m)$	2,3	u_2 (%)	2
L/D	1,25	$L(m)$	2,9
α	25,0	β	18,0
λ	0,012	V_{crit} (m/s)	10

Los ángulos α y β son los ángulos respectivos para la sección de $1,4\ m$ y $1\ m$. A pesar de que en la referencia se diseña para secciones cilíndricas, también propone que para secciones cuadradas se use el diámetro equivalente de (9.9).

$$D_{eq} \ = \ 2\ \sqrt{A_1/\pi} \tag{9.9}$$

9.4.2. Pérdida de carga y largo requerido

La pérdida de carga en una contracción consta de la suma de las pérdidas por fricción y las pérdidas por desprendimiento de capa límite (9.10). El término λ en (9.11) hace referencia a la rugosidad relativa de las paredes. El valor de ζ_{loc} es nulo para velocidades mayores a 10 m/s. No es de interés el cálculo de este término para velocidades menores, dado que en tal caso la potencia disponible en el motor está sobredimensionada.

$$\zeta \ = \ \zeta_{fr} \ + \ \zeta_{loc} \tag{9.10}$$

$$\zeta_{fr} = \frac{\lambda}{8\ \sin(\frac{\alpha_{contr}}{2})} \left(1 \ - \ \frac{1}{N^2}\right) \tag{9.11}$$

Estas ecuaciones fueron desarrolladas para contracciones axi-simétricas, sin embargo, se las usan como estimación de la pérdida de carga de este elemento. Al tener dos ángulos de contracción vistos en la tabla 9.7, se toma la pérdida de carga media para ambos ángulos. A continuación se presentan los valores calculados de coeficiente de pérdida de carga (a partir de las pérdidas calculadas ζ) y largo requerido. Este último fue calculado a partir de la relación L/D que cumplía con los criterios explicados en la sección 9.4.1

$$\begin{aligned} k_{cont} \ &= \ 0,057 \\ L \ &= \ 2,9\, m \end{aligned}$$

9.5. Zona de trabajo

La zona de trabajo se aproxima a sección constante para los cálculos de perdida de carga. Dado que en algunos casos pueden presentar paredes suavemente

divergentes, para compensar el crecimiento de la capa límite en las paredes. [28]

9.5.1. Condición de sección vacía

La condición de sección vacía se evalúa para contemplar las siguientes características de este túnel de viento:

- Obtener los coeficientes de pérdida de carga impuesta por la fricción en las paredes.
- En esta condición se está en las condiciones con menor pérdida de carga. Lo que quiere decir que caracteriza la máxima velocidad alcanzable a potencia nominal.

Para evaluar la pérdida de carga, se modela independientemente cada pared como una placa plana con flujo paralelo sin despreciar la rugosidad del material 9.1. Para el cálculo se sigue el método sugerido por [36] de donde se obtienen los siguientes valores:

- Pérdida de carga: $k_{vacío\,=\,0{,}027}$
- Espesor de la capa límite: $\delta \;=\; 41,1\;mm$

9.5.2. Condición de alta pérdida de carga

Para evaluar la condición de alta pérdida de carga se considera el efecto que introduce un perfil aerodinámico en pérdida de sustentación con el bloqueo máximo admisible $\beta \;=\; 5\,\%$. Este efecto es similar al de una barra interpuesta con el mismo bloqueo. Cabe destacar que esta condición es de suma importancia para el diseño de los álabes del ventilador.

La pérdida de carga total es la misma que la calculada para la sección vacía sumada a la que impone esta carga adicional. La pérdida de carga impuesta por una barra se obtiene del manual de hidráulica de [27]. El coeficiente de pérdida de carga obtenido se detalla a continuación.

- Pérdida de carga: $k_{obst.} \;=\; 0,061$

El valor final de la pérdida de carga en la zona de trabajo es como mínimo el de la sección vacía $k_{vacío}$, y el máximo se obtienen adicionando el $k_{obst.}$.

9.6. Malla de protección

Una malla se introduce en el extremo corriente abajo de la zona de trabajo, para proveer de protección a las personas que están trabajando en el túnel de viento y para prevenir el impacto contra el rotor de algún objeto que no esté bien sujeto al túnel.

Esta malla es más gruesa que las mallas que acondicionan el flujo. En este caso, se desprecia el efecto de la misma en la turbulencia presente en la zona y solamente se toma en consideración la pérdida de carga que introduce. Para calcular la pérdida de carga se usa la ecuación (9.3) considerando $f(Re) = 0,45$ debido a que se trabajan con números de Reynolds mayores a 700. Las características de la malla de protección son las siguientes:

- Sección: $5 \times 7,5\ mm^2$
- Diámetro de hilo: $d = 1,9$
- Diámetro hidráulico: $M = 0,06$
- Porosidad: 94 %
- Perdida de carga: $k = 0,06$

9.7. Pieza de Transición

La pieza de transición cumple la función de cambiar la geometría de la sección de pasaje, desde la zona de trabajo a la sección del ventilador. También cumple el rol de difusor, dado que el área de la sección del ventilador es mayor que la de la sección de pasaje. En la tabla 9.8 se detallan los requisitos de para el diseño de esta pieza.

Tabla 9.8: Requisitos de diseño de la pieza de transición

Datos de interés	
$D_h\ (m)$	1,17
$Secc\ Z.T\ (m \times m)$	1x1,4
$D_{rotor}\ (m)$	2,00
$Relación\ de\ áreas\ (N_{pt})$	2,24
$Re_{max}\ x\ 10^{-5}$	25,71
$Re_{min}\ x\ 10^{-5}$	5,10

Para un diámetro de rotor de 2 m, se tiene una difusión desde la zona de trabajo para ambas caras de la sección rectangular, lo que hace razonable modelar este elemento como un difusor de sección cuadrada para estimar la pérdida de carga.

Para la estimación de pérdidas de carga, es necesario saber el ángulo de difusión α y el Re [27][1]. Para el ángulo de difusión α se toma el ángulo medio entre los ángulos que forman los lados de la sección de trabajo y el cilindro que contiene al rotor, partiendo del punto medio de cada lado, ver figura 9.6.

[1]Se aclara que en todo el rango de Re se tiene régimen de automodelado.

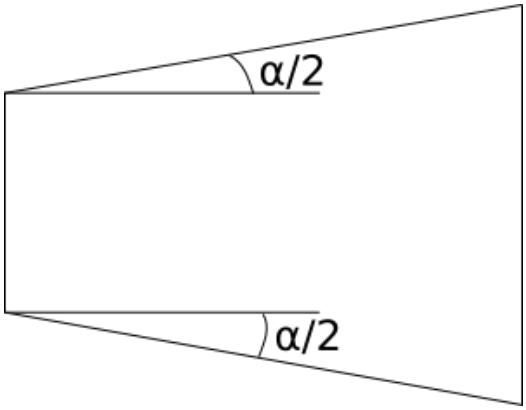


Figura 9.6: Ángulos entre la sección de trabajo y la sección del rotor

En la tabla 9.9 se detallan para cada largo de pieza de transición, los valores de α y pérdida de carga k correspondientes.

Tabla 9.9: Ángulos medios y perdidas de carga para un largo dado

L (m)	$\alpha_{med}/2$ $(^o)$	k
0,25	56,81	0,340
0,5	37,98	0,301
0,75	27,75	0,272
1	21,63	0,251
1,25	17,65	0,222
1,5	14,87	0,199
1,75	12,84	0,174
2	11,28	0,146
2,25	10,06	0,122
2,5	9,08	0,110

El criterio resultante se basa en la elección de un difusor lo más corto posible con una pérdida de carga aceptable. Los siguientes valores se consideran aptos:

- $L = 2\,m$
- $\alpha_{med}/2 = 11,28^o$
- $k = 0,146$
- $N_{pt} = 2,24$

9.8. Difusor

Antes de analizar el diseño del ventilador, se procede a tratar el último componente aerodinámico restante del túnel, para utilizar el coeficiente de pérdida de carga asociado al mismo.

El difusor es un elemento opcional en el diseño de un túnel de viento, presenta la ventaja de aumentar el rendimiento del túnel de viento, disminuyendo la energía cinética entregada al entorno y obtener mayores velocidades en la sección de trabajo. El efecto negativo de su implementación es la necesidad de utilizar más espacio, dado que estos elementos requieren largos considerables. Por otro lado, disponer de un difusor implica un factor de seguridad, ya que se evita el contacto directo del personal con el ventilador. Por lo tanto, se considera importante disponer de uno y no utilizar otro elemento de seguridad como las mallas de protección.

Respecto a las características del diseño, debe tenerse en cuenta que no son aconsejables ángulos de difusión $\alpha \geq 30^o$ (ver figura 9.6). Con α's mayores puede desprenderse la capa límite dentro del difusor, provocando mayores pérdidas de carga que las que se tendrían en ausencia del elemento [27].

Al mismo tiempo, debido a la componente de giro que presenta el flujo por encontrarse a la salida del ventilador, existen dos efectos que influyen directamente en el rendimiento del difusor. En primer lugar, el módulo de la velocidad es mayor que la componente axial que se considera en análisis habituales, y también la distancia recorrida por el flujo es mayor (ya que avanza de manera helicoidal). Todo esto aumentaría las pérdidas por fricción en el difusor. Por el contrario, se da un efecto de "pegado" de las capas límite a las paredes del difusor, lo que aumenta su rendimiento. Considerando ambos aspectos, se asume para el resto del análisis que ambos efectos se contrarrestan en su efecto sobre la pérdida de carga en el difusor. Por lo tanto, se procede analizando solo un flujo con componente axial de aquí en adelante.

Para el dimensionamiento se utilizan los diagramas presentados por [37], donde se condensan diversos ensayos realizados para distintas geometrías de difusores. Partiendo de la difusión lograda por la pieza de transición 9.7, de $N_{pt} = 2,24$, para un ángulo de difusión conservador de $\alpha = 20^o$, se elige el largo mínimo del difusor para una relación de áreas de $n = 1,35$, obteniéndose una difusión total desde la sección de trabajo de $n_{tot} = 3$. En la tabla 9.10 se detallan los datos de diseño del difusor y su correspondiente pérdida de carga, considerando valores como C_{pi} y $u_{i\,max}$ similar a los análisis hechos para la contracción.

Tabla 9.10: Datos de diseño del difusor

$Difusor$			
D_1 (m)	2	D_2 (m)	2,32
n	1,35	α $(^o)$	20
Cp	0,4	C_{pi}	0,451
k_{hid}	0,051	η	0,886
$Lu/D1$	0	L (m)	0,92
k_{fric}	0,06	L/D_1	0,46
$u_{1\,max}$ (m/s)	15,42	$u_{2\,max}$ (m/s)	11,42

Las pérdidas de carga se dividen en dos, una debida a fricciones con las paredes y otra debida a perdidas hidráulicas. La primera se calcula según [27] y la última

utilizando (9.13), obtenida en [37].

$$Cp_i = 1 - n^2 \tag{9.12}$$
$$k = Cp - Cp_i \tag{9.13}$$

9.9. Sección de salida

El tramo final de un túnel de viento con circuito abierto consiste en el escape del fluido al ambiente. Esta parte introduce las pérdidas de carga correspondientes a la disipación de toda la energía cinética disponible, ver (9.14), con v la velocidad que atraviesa dicha sección. Al referenciar la pérdida de carga a la velocidad en la sección de trabajo se obtiene la expresión (9.15).

$$\zeta_{salida} = \frac{v^2}{2\,g} \tag{9.14}$$
$$k_{salida} = \frac{1}{n_{tot}^2} \tag{9.15}$$

Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de carga que se asocia a la pérdida de energía cinética a la salida del túnel es de $k_{salida} = 0,109$.

9.10. Ventilador

Dentro del diseño de una instalación, un componente a destacar es la turbomáquina que transforma la energía disponible, en este caso eléctrica, a energía mecánica útil. Se identifican dos formas de abarcar este aspecto, la primera es el uso de un equipo disponible en plaza que se adapte a las necesidades de la instalación. Mientras que la segunda, es el diseño de una, cuyo punto de máximo rendimiento sea el de operación de la instalación. Esta última opción presenta como ventaja el poder adaptarse al punto deseado, en lugar de diseñar partes de la instalación basándose en la turbomáquina disponible.

Debido a que el ventilador es el componente que entrega la potencia al sistema, para su diseño se debe contar con todas las pérdidas de carga del túnel. De esta manera, se puede considerar el caudal y carga a entregar por el ventilador en su punto nominal.

Uno de los factores a evitar bajo cualquier punto de funcionamiento del ventilador es que sus palas no entren en el fenómeno conocido como *"Stall"* (o en pérdida de sustentación). Esto ocurre cuando el ángulo de ataque α supera valores de aproximadamente 20º. A su vez, existe un ángulo dependiente del perfil que se evalúe, para el cual la relación sustentación-arrastre se vuelve máxima. Considerando ambos aspectos, se diseña tomando como condición nominal a la situación con mayor pérdida de carga (sección de trabajo ensayando un perfil aerodinámico con un alto ángulo de ataque, como se destaca en la sección 8.2.1). De esta manera,

se asegura que el mayor ángulo de ataque se da para la condición más exigente. Para obtener velocidades menores se varía la frecuencia del variador para afectar la velocidad de giro, de manera de conseguir puntos de funcionamiento homólogos y obtener el mejor rendimiento posible. En la tabla 9.11 se detallan los parámetros nominales preliminares.

Tabla 9.11: Parámetros nominales preliminares.

v $[m/s]$	N $[rpm]$	$k_{preliminar}$	H $[m.c.a.]$	Q $[m^3/s]$
34,6	985	1	60,9	48,4

Teniendo los parámetros pautados resulta pertinente determinar las características de la configuración. En primer lugar, se descarta la opción de implementar numerosos rotores en paralelo (aumentando así la velocidad específica de cada uno) para evitar complejizar el sistema de transmisión, ya que se cuenta con un único motor. Luego se observa la necesidad de aumentar el diámetro hidráulico del ventilador más allá del que presenta la sección de trabajo, como se discute en la sección 8.2.3.

En este caso, se opta por diseñar un ventilador axial que cumpla con las exigencias de caudal, carga y dimensiones esperadas (dentro de parámetros razonables para una turbomáquina del mismo tipo disponible en el mercado).

Para ello, se comienza considerando las restricciones impuestas por los demás componentes. Uno de ellos es el motor eléctrico disponible WEG W22 - IE1 - 50Hz - 400 V- 60 HP (ver apéndice B.1.1). Se considera el tamaño a partir de las dimensiones del modelo presentes en los datos del fabricante [38], obteniendo así un cubo de dimensiones $D_i = 1,00\,m$. Por otra parte, como consecuencia de un análisis preliminar de la sección 8.2.3, se determina un diámetro exterior de 2,0 metros, según el diagrama de Cordier.

9.10.1. Cálculo del rendimiento del ventilador

Al igual que los demás elementos del túnel de viento, los distintos componentes del ventilador imponen pérdidas al flujo. Estas deben ser estimadas no solo para poder calcular el caudal y carga que entrega el ventilador, sino que también permiten definir un rendimiento hidráulico global del mismo.

Los diferentes componentes del ventilador y la forma de modelarlos se enumeran a continuación, a su vez se detallan en la figura 9.7.

1. Nariz: Guía al flujo hacia los álabes generando una contracción en el flujo. La misma se modela como una contracción

2. Motor: Recibe el flujo con componentes tanto axial como tangencial dado que se encuentra en la estela del ventilador. Se modela como un tubo de sección anular con elevada rugosidad y una expansión abrupta al entrar al difusor.

3. Salida del rotor: En la salida del rotor, el flujo sufre una expansión abrupta, dado que la nariz no tiene exactamente el mismo diámetro que el motor, sin embargo, se decide hacerlo de esta forma para cubrir la caja de transmisión del motor eléctrico. Realizando la hipótesis que la presencia de esta caja no influye en la pérdida de carga, dado que se encuentra en la estela del cubo del rotor.

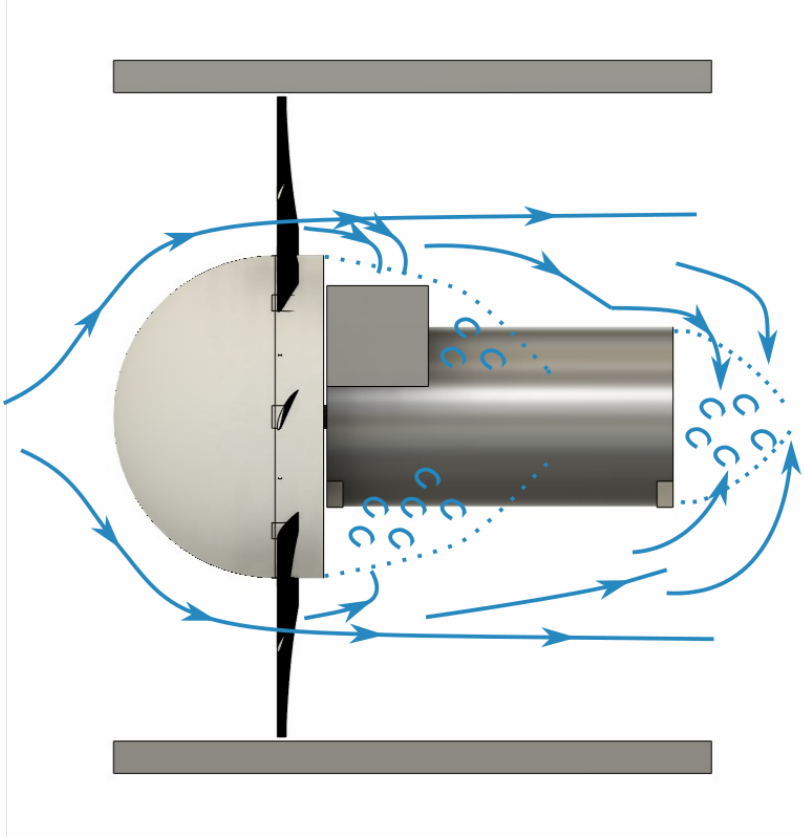


Figura 9.7: Esquema de pérdidas de carga del ventilador

Para determinar el rendimiento del conjunto que forman el rotor, la nariz y el motor y poder efectivamente comparar este rendimiento con valores de diferentes fabricantes, es que se procede a considerar las pérdidas de carga que se presentan en dicho conjunto ($k_{conj.}$). El modelado de estas se realiza subdividiendo en distintas regiones, siendo: k_{nariz}, $k_{salida\,nariz}$, $k_{largo\,motor}$ y $k_{salida\,motor}$.

Comenzando por k_{nariz}, esta se modela como una contracción. Para ello se supone un α, largo característico l_0, factor de áreas F_0/F_1 y se procede a calcular los valores explicitados en la bibliografía y se obtiene [27](pág. 375):

$$\begin{aligned}
\alpha &= 90^\circ \\
l_0 &= 0,5\ m \\
n_0 &= F_0/F_1 \\
\alpha_p &= 0,01745\ \alpha \\
k_{loc} &= 7,36{,}10^{-2} \\
k'_{nariz} &= k_{loc} + k_{fr}
\end{aligned}$$

Según el análisis de la bibliografía y utilizando la ecuación de Colebrook-White, se obtiene la siguiente formulación para k_{fr} y k_{loc} [27](pág. 300):

$$\begin{aligned}
k_{fr} &= \frac{\lambda}{8\ \sin\frac{\alpha}{2}}\ \left(1 - \frac{1}{{n_0}^2}\right) \\
\lambda &= 0,0105 \\
Re &= 2{,}10^6 \\
D_h &= 2,0\ m \\
\epsilon &= 0,01\ mm \\
k_{fr} &= 8,12{,}10^{-4}
\end{aligned}$$

Por lo tanto, el valor total de k_{nariz} referenciado a la velocidad en la sección de trabajo es:

$$\begin{aligned}
k_{nariz} &= (k_{loc}\ +\ k_{fr})\ (A_{s.t.}/A_{rotor})^2 \\
k_{nariz} &= 2,63{,}10^{-2}
\end{aligned}$$

El resto de las pérdidas de carga fueron modeladas de manera que se hace necesario conocer el vector velocidad (módulo y dirección) a la salida del rotor. A partir del desarrollo del método iterativo para la determinación del rotor que se ve en la sección 9.10.2, se puede obtener el vector velocidad deseado v_2 aproximado, debido a la falta de modelado de las pérdidas de carga del conjunto ventilador. Al saber que el vector velocidad de salida del rotor presenta valores distintos de ángulo, se toman los valores obtenidos para el ${D_{car_4}}^2$, ya que su distancia en la pala es cercana al 80 % desde D_{int} a D_{ext} (criterio de sección más representativa presentado en [39]).

Se puede inferir que el ángulo θ_2 (medido a partir del plano de giro del rotor) es apreciable. Esto es consecuencia de tratarse de un único rotor, el cual debe entregar la carga perdida en el sistema, y debe conservarse el caudal a la entrada y a la salida del rotor (su proyección axial debe ser igual al módulo de velocidad de entrada al rotor). Dicho esto, resulta pertinente utilizar el módulo real de v_2 (no su proyección axial) escrito en función de la velocidad axial y θ_2, así como

[2] se define este término en la sección 9.10.2

afectar el coeficiente utilizado para reescalar los k's a la velocidad en la sección de trabajo. Para realizar los cálculos, se estima un valor de ángulo inicial y luego se corrige con la propia iteración para el dimensionamiento de pala.

Continuando en el sentido del flujo, el siguiente componente a modelar sería la salida de la nariz. Esta se decide idealizar como una expansión abrupta utilizando como bibliografía de referencia [27] (pág. 223). Aplicando la ecuación que presenta la bibliografía (con F_0 como sección del rotor y F_2 como sección a lo largo del motor), se ajusta el valor de relación de áreas por el seno de θ_2 como se explica anteriormente.

$$\begin{aligned} k_{salida\,nariz} &= (A_{s.t.}/A_{rotor})^2 \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 \\ k_{salida\,nariz} &= 1,23{,}10^{-2} \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} \end{aligned}$$

Utilizando la misma formulación, se estima el valor de $k_{salida\,motor}$, con F_0 como sección a lo largo del motor y F_2 como sección a la salida del motor.

$$\begin{aligned} k_{salida\,motor} &= (A_{s.t.}/A_{anillo\,motor})^2 \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 \\ k_{salida\,motor} &= 1,40{,}10^{-3} \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} \end{aligned}$$

Por último, la pérdida distribuida a lo largo del motor se modela como un cilindro concéntrico. Se efectúa la corrección por ángulo θ_2 y se estima la rugosidad del motor considerando las aletas longitudinales en ella. Como referencia se utilizó [27] (pág. 143).

$$\begin{aligned} k_{largo\,motor} &= (A_{s.t.}/A_{anillo\,motor})^2 \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} k_{2r}\, \lambda \frac{\left(\frac{l}{\sin\theta_2}\right)}{D_h} \\ k_{largo\,motor} &= 5,32{,}10^{-3} \frac{1}{\sin\theta_2{}^3} \end{aligned}$$

Finalmente, se calcula el $k_{conj.}$ sumando los coeficientes anteriores.

$$\begin{aligned} k_{conj.} &= \sum k_i \\ k_{conj.} &= 2,5310^{-2} + 1,37{,}10^{-2} \frac{1}{\sin\theta_2{}^2} + 5,32{,}10^{-3} \frac{1}{\sin\theta_2{}^3} \end{aligned}$$

A partir de estos valores, se puede observar que las pérdidas de carga del conjunto ventilador, son de un orden de magnitud menor que las del resto de la instalación. Sin embargo, es necesario tomarlas en consideración, ya que determinan el rendimiento hidráulico del ventilador. De manera de cuantificarlo, se procede con el siguiente razonamiento:

$$
\begin{aligned}
\zeta_{conj.} &= k_{conj.}\,\frac{v_{s.t.}^2}{2\,g} \\
\eta &= \eta_v\,\eta_H \\
\eta_H &= \frac{H}{H_t} \\
H &= k_{inst.}\,\frac{v_{s.t.}^2}{2\,g} \\
H_t &= \frac{H\,+\,\zeta_{conj.}}{\eta_{h\,pala}}
\end{aligned}
$$

donde η es el rendimiento del ventilador, considerando el rendimiento volumétrico (η_v) e hidráulico total (η_H); H la carga perdida en la instalación; H_t la carga que debe suministrar el rotor al fluido; $\eta_{h\,pala}$ el rendimiento hidráulico obtenido a partir de la iteración en la sección característica.

9.10.2. Proceso iterativo para el dimensionamiento de las palas

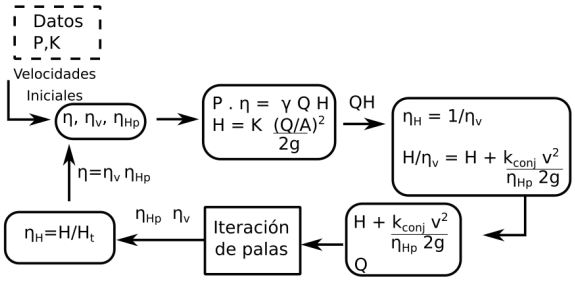


Figura 9.8: Procedimiento rendimiento ventilador

Una vez determinadas las características generales que tiene la instalación y el rotor, se procede a dimensionar propiamente este. Comenzando por fijar el diámetro interno, de manera conservadora se decide utilizar un $D_i = 1,04\,m$ para considerar que la región donde se encuentra la capa límite desprendida de la nariz no entrega potencia. De esta manera queda determinada la velocidad axial al comienzo del rotor:

$$
v_{1x} = \frac{Q_t}{\frac{\pi}{4}\left(D_e^2 - D_i^2\right)} \tag{9.16}
$$

Luego respetando valores de referencia marcados en [39] y siguiendo el procedimiento planteado se evalúan valores de diámetro externo que otorguen medidas de pala coherentes según comparación con modelos existentes. Dicho procedimiento se basa en que cada sección diseñada entrega igual valor de carga al flujo. Se procede a describir brevemente el procedimiento.

En primer lugar, se subdivide la sección total entre 5 de manera de que el flujo que atraviesa cada subsección es igual para todas las partes. A partir de estas se determinan diámetros característicos para cada subsección car_i y su correspondiente velocidad de transporte u_i para un referencial solidario a la pala en rotación:

$$D_{car_i} = \sqrt{\frac{{D_i}^2 + {D_{i-1}}^2}{2}}$$
$$u_i = \frac{\pi\, D_{car_i}\, N}{60}$$

Como último paso previo al proceso iterativo se debe seleccionar un perfil que satisfaga los requerimientos, preferentemente teniendo un coeficiente C_L/C_D alto sin comprometer la resistencia a esfuerzos a los que se encontraría sometida la pala. En este caso se opta por un perfil NACA 4412 cuyos valores pertinentes se exponen a continuación (obtenidos a partir del programa Xfoil) para Reynolds medio en los que se trabajaría:

$$e_{max} = 0,12\, l$$
$$\lambda = 6,5^\circ$$
$$(C_L/C_D)_{max} = 94,3$$
$$C_L = 1,160$$

Cabe destacar que el número de palas Z es constante durante el proceso, aunque este es afectado para comparar las configuraciones obtenidas, ya que a partir de él se obtiene el paso t:

$$t = \pi\, D_{c_i}/Z \tag{9.17}$$

Finalmente, el proceso iterativo comienza al definir un largo de cuerda inicial, e ingresar los valores de carga y caudal que se desea que entregue el rotor. En este caso, la carga debería ser $H + \zeta_(conj.)$ ya que no son pérdidas consideradas en el rendimiento hidráulico que surge de la iteración.

Como comentario adicional, el rendimiento volumétrico η_v se estima para la sección más próxima a punta de pala hasta converger, y luego tomar ese valor de rendimiento volumétrico y aplicarlo a la iteración en las demás subsecciones.

$$Q' = \mu\, v_\infty \sqrt{C_{LG}}\, \rho\, l\, Z \tag{9.18}$$

donde μ tiene un valor típico de 0,6, C_{LG} es el coeficiente de Lift corregido por el ábaco de Weining, v_∞ es el módulo de la velocidad media en el rotor y ρ es la luz entre el rotor y la carcasa (con valor 1 cm ver Sección carcasa).

9.10.3. Selección del número de palas

Una vez planteado el proceso iterativo, la única constante a determinar para poder obtener los valores finales del rotor es Z, el número de palas.

En primer lugar, se desea que las palas no se encuentren demasiado exigidas, por lo que aumentar Z distribuiría más la carga a suministrar. Sin embargo, mantener el valor al mínimo contribuye a reducir las dificultades estructurales y minimizar el bloqueo del flujo en la sección. Además, este valor cuanto más grande sea, mayor es la frecuencia de oscilación que se genera por el pasaje de las palas, obligando a la estructura a ser más rígida (ya que se busca que las frecuencias de resonancia de los materiales se encuentren por encima).

De esta manera se plantean 6, 8, 10 y 12 palas y se analizan sus resultados para los diámetros característicos D_{car_1} y D_{car_5} en la tabla 9.12. En particular, se comparan los largo de cuerda l para aproximar las dimensiones generales de la pala, y el coeficiente t/l para evaluar cuánto interfiere en el flujo incidente un álabe con los contiguos.

Tabla 9.12: Largo de cuerda según número de palas.

		D_car_1		D_car_5	
		l (cm)	t/l	l (cm)	t/l
Z	6	18,4	3,32	11,6	8,61
	8	13,8	3,32	8,70	8,61
	10	11,1	3,32	6,96	8,61
	12	9,21	3,32	5,80	8,61

Se opta por la configuración $Z = 8$ ya que cumple con las solicitudes planteadas anteriormente y además, como se ve en la sección 10.12, es el Z menor para el cual se cumple el factor de diseño de 3 impuesto.

9.10.4. Valores característicos finales del ventilador

De esta manera, se obtiene un rendimiento hidráulico y total del ventilador que se muestra a continuación, así como el coeficiente de pérdida de carga total, la carga entregada, el caudal y velocidad en la sección de trabajo en su punto nominal y a la salida del rotor[3].

[3]Para el cálculo del rendimiento total del ventilador, no se consideran las pérdidas eléctricas del motor.

$$
\begin{aligned}
\eta_v &= 0,992 \\
\eta_H &= 0,907 \\
\eta &= 0,90 \\
k_{inst.} &= 0,750 \\
v_2 &= 26,6\, m/s \\
\theta_2 &= 73,7^\circ \\
H &= 62,5\, m.c.a. \\
Q &= 56,5\, m^3/s \\
v_{s.t.} &= 40,4\, m/s
\end{aligned}
$$

Por último, se muestran las dimensiones finales del rotor en la tabla 9.13.

Tabla 9.13: Dimensiones finales del rotor para cada subsección de diseño.

	β_p (º)	l (cm)	η_{hp}
D_car_1	32,4	13,8	0,976
D_car_2	27,9	11,9	0,972
D_car_3	25,1	10,5	0,968
D_car_4	23,2	9,47	0,964
D_car_5	21,8	8,70	0,961

9.11. Resumen

Resumiendo el proceso de diseño aerodinámico del túnel de viento, se obtuvieron los datos expresados en la tabla 9.14 y el punto de funcionamiento descrito a continuación.

$$
\begin{aligned}
\eta &= 0,90 \\
H &= 62,5\, m.c.a. \\
Q &= 56,5\, m^3/s \\
v_{s.t.} &= 40,4\, m/s \\
v_{s.t.vacia} &= 41,5\, m/s
\end{aligned}
$$

Tabla 9.14: Perdidas de carga y Largos de cada elemento

Elemento	k $(Z.T.)$	L (m)
Labios y pared	0,042	0,85
Honeycomb	0,022	0,65
Malla 0	0,072	0,47
Malla 1	0,072	0,08
Malla 2	0,108	0,30
Contracción	0,057	2,88
Z.T. Vacía	0,027	2,00
Z.T. Llena (solo obst.)	0,061	-
P. transición	0,146	2,00
Malla protección	0,012	-
Ventilador	-	1,85
Difusor	0,022	0,92
Salida	0,109	-
Total	**0,750**	**11,61**

Capítulo 10

Túnel de Viento: Diseño estructural

Luego de determinados los componentes aerodinámicos y sus dimensiones, es de importancia verificar que la resistencia mecánica de la estructura acompañe el funcionamiento del túnel. Para ello se deben considerar los distintos esfuerzos a los que se es sometido, abarcando sus diferentes estados de funcionamiento.

En primer lugar, se tratan criterios de dimensionamiento, fórmulas de deformación, pandeo, modelados y definición de términos que se utilizan en repetidas ocasiones. Después, de forma análoga al capítulo anterior, se describe el dimensionamiento de cada componente en el sentido del flujo, a excepción de los componentes de la sección del ventilador. Luego, se determina el número de columnas y soportes que corresponden, antes de dimensionar todo lo relacionado con el ventilador. Por último, se realiza un análisis de vibraciones y ruido, así como sugerencias finales al diseño, las cuales incluyen la instalación del sistema de adquisición como herramienta operativa del túnel de viento.

10.1. Descripción general

10.1.1. Criterios de dimensionamiento

A efectos de determinar el criterio de dimensionamiento, se estipulan para deflexión, y para esfuerzos, diferentes valores de referencia. En el caso de la deflexión, se define un desplazamiento máximo de $\delta_{max} = L_c/200$ el cual no puede ser superado por ninguna pieza, donde L_c es una longitud característica de la misma, optando siempre por la más conservadora.

Por otro lado, para determinar el criterio según esfuerzos admisibles, se toma un factor de seguridad $Fs = 7$ para elementos diseñados en madera, y un factor $Fs = 3$ para elementos diseñados en acero. Ambos valores son aconsejados por [40].

10.1.2. Cálculo de esfuerzos y deformaciones máximas aplicados a una viga de sección cónica

Para resolver esfuerzos y deformaciones para esta pieza, se emplea el método de la energía de deformación [41]. Esta es calculada en función de las fuerzas aplicadas al elemento elástico. Para el caso de un elemento en flexión, la energía de deformación U se calcula a partir del momento interno M_{int} de la siguiente forma:

$$U = \int \frac{M_{int}^2}{2\,E\,I}\,dx \tag{10.1}$$

A partir de la energía de deformación es posible calcular la deflexión en la dirección de la fuerza R aplicada sobre el cuerpo (10.2). En caso de querer obtener la deformación en un punto intermedio x^*, se le aplica una fuerza ficticia R_x con la cuál se calcula la energía de deformación y luego se calcula el desplazamiento (10.3).

$$\frac{\delta U}{\delta R} = \delta \tag{10.2}$$

$$\left.\frac{\delta U}{\delta R_x}\right|_{R_x=0} = \delta_{x^*} \tag{10.3}$$

En el problema de la figura 10.1, se presenta el diagrama de fuerzas sobre un elemento tronco-cónico de inercia (10.4). Dónde t es el espesor de pared, q es una carga distribuida de forma lineal, aplicando balance de fuerzas y considerando que el elemento tiene dos apoyos simples con reacciones R_{v1} y R_{v2}, se obtiene la igualdad (10.5).

$$I = \pi\left(R_1 + \frac{R2 - R1}{L}x\right)^3 t \tag{10.4}$$

$$R_{v1} + R_{v2} = qL \tag{10.5}$$

El momento interno se calcula mediante la ecuación (10.6). A partir del mismo, es posible calcular U mediante (10.1).

$$M_{int} = R_{v1} < x >^1 \; - \frac{q}{2} < x >^2 \; - R_x < x - x^* >^1 \tag{10.6}$$

A partir de las ecuaciones (10.7) - (10.9), es posible resolver el problema numéricamente en función del espesor t.

$$\left.\frac{\delta U}{\delta R_{v1}}\right|_{R_x=0} = 0 \tag{10.7}$$

$$\frac{\delta \delta_{x^*}}{\delta x^*} = 0 \tag{10.8}$$

$$max_x\left[\frac{M_{int}\;y}{I}\right] \leq \frac{S_y}{Fs} \tag{10.9}$$

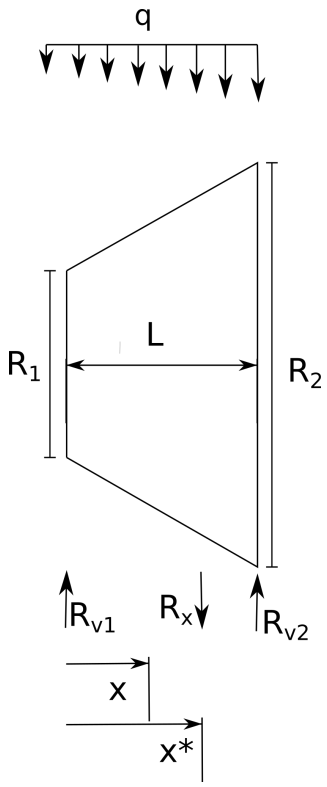


Figura 10.1: Esquema del modelado de la pieza de transición

10.1.3. Pandeo por criterio de Euler

Para el acero, se toma como válida la aproximación por carga crítica de Euler (P_{cr}) cuando la esbeltez, λ, toma valores superiores a 80. La expresión para la esbeltez se detalla en (10.11), donde i es el radio de giro de la barra expresado en (10.12).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \tag{10.10}$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i} \tag{10.11}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{10.12}$$

$$\tag{10.13}$$

10.1.4. Términos y procedimiento a utilizar

El proceso escogido consiste de dimensionar primero el espesor de las tablas que conforman cada uno de los elementos aerodinámicos, considerando los soportes como rígidos, modelados como apoyos simples.

Posteriormente, se dimensionan las columnas de madera y finalmente los soportes o marcos de cada estructura utilizando los criterios mencionados en la sección 10.1.1. Dadas las pequeñas deformaciones del criterio de dimensionamiento, se considera que la aproximación por elemento rígido realizada anteriormente para el diseño del espesor de las tablas, sigue siendo razonable.

Un ejemplo ilustrativo de cada uno de estos elementos se detalla en la figura 10.2, donde el elemento a dimensionar es la zona de trabajo.

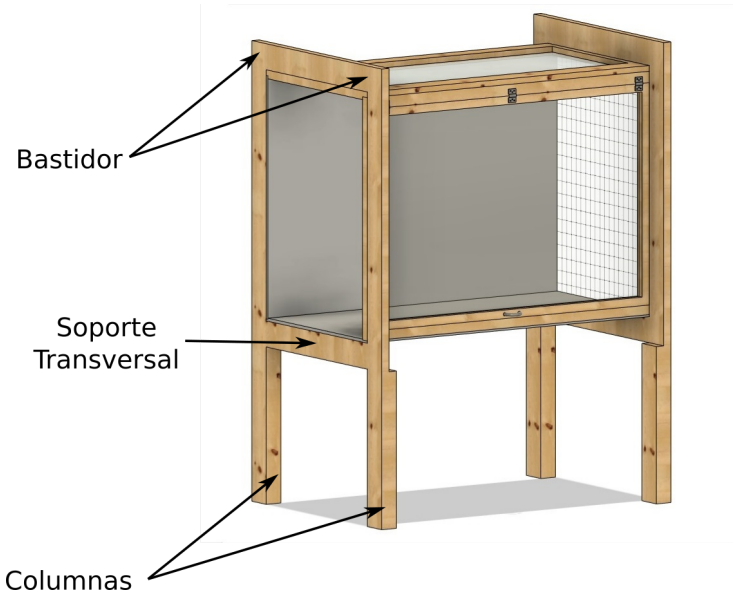


Figura 10.2: Ejemplo ilustrativo de elementos a diseñar

En las próximas secciones se detalla el procedimiento de dimensionamiento y cálculo estructural para los distintos elementos del túnel de viento.

10.1.5. Unión entre componentes

Un aspecto a considerar para abarcar el dimensionamiento estructural del túnel es que se diseñan los distintos componentes por separado. Este abordaje presenta una ventaja para el mantenimiento o posible recambio de un componente.

Consecuentemente, se considera la unión entre estos a contacto, asegurando estanqueidad utilizando un elastómero en la unión. Este se adapta a las imperfecciones constructivas en cierto grado, y permite un primer sellado del túnel, mitigando infiltraciones.

10.2. Acondicionador de flujo

Producto de que se deben tensar las mallas para que estas sean los más perpendiculares posibles al flujo, se decide dividir la sección de acondicionamiento en cuatro. La figura 10.3 muestra dicha división. Las mallas se sujetan sobre las

secciones con su mismo número indicado en la figura, en la posición indicada por las flechas.

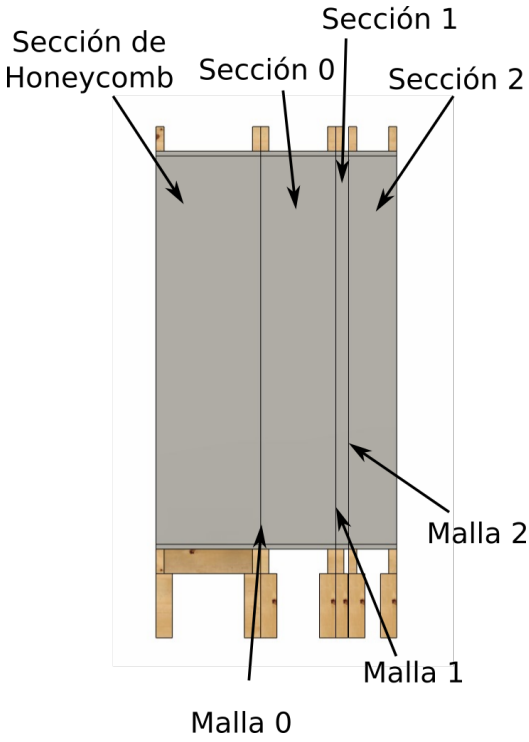


Figura 10.3: División de la sección de mallas

10.2.1. Sección del Honeycomb

En el apéndice B.1.3, se detallan las dimensiones y peso de cada tubo del Honeycomb. A los efectos de optimizar el proceso constructivo, se modifica levemente las dimensiones de la sección de acondicionamiento del flujo y el comienzo de la contracción, de tal forma que quepa un número entero de tubos en el Honeycomb. Partiendo de la sección inicial de la contracción antes calculada de $A_i = 1,732 \times 2,425\ m^2$, se la modifica llegando a $A_f = 1,740 \times 2,417\ m^2$. De esta manera se colocan un total de 7122 tubos de sección recta hexagonal[1]. En la tabla 10.1, se presentan los datos mencionados.

Tabla 10.1: Estimación del peso de la sección del Honeycomb

$A\ (cm^2)$	Cantidad de tubos	$peso\ (kg)$
42056	7122	656

[1]Cabe destacar que por más que se ajusta al milímetro las dimensiones, el proceso constructivo introduce errores y podrían darse complicaciones al momento de colocar los tubos del Honeycomb.

Esta pieza del acondicionador de flujo cuenta con un tramo que no está cargado por el Honeycomb, añadiendo la distancia necesaria hasta la malla 0. De esta manera, la longitud es de $652\,mm$. A los efectos del cálculo, se dimensionan los espesores de las tablas y cantidad de soportes, únicamente para la zona cargada por el Honeycomb.

El peso del Honeycomb se modela como carga distribuida $q = 3,888\,kN/m$ y se suma el peso del armazón de madera (el cual depende del espesor de la placa). El resultado del dimensionamiento basado en el criterio de deflexión (sección 10.1.1) se detalla en las tablas 10.2 y 10.3, donde se diferencia entre soportes transversales y longitudinales (respecto a la dirección del flujo). La figura 10.4 ilustra una parrilla con 2 soportes transversales y 3 soportes longitudinales.

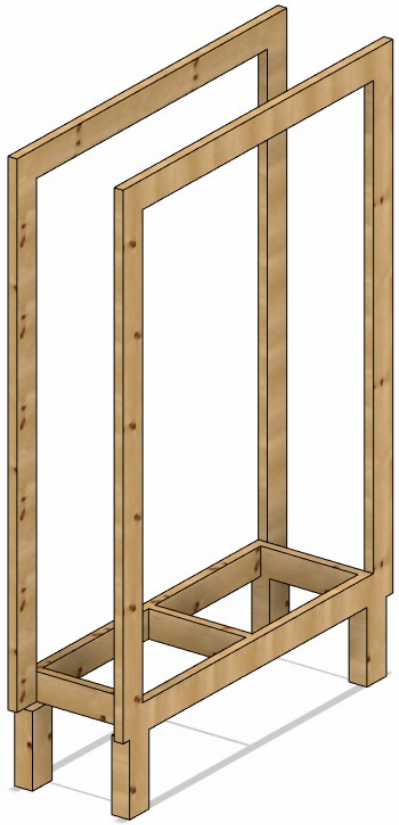


Figura 10.4: Ejemplo de parrilla

Tabla 10.2: Cantidad de soportes para cada espesor de tabla MDF

$Espesor\ (mm)$	$Transversales$	$Longitudinales$
15	2	4
18	2	4
30	2	3
36	2	3
45	2	3

Tabla 10.3: Peso de la estructura para cada espesor de MDF

$Espesor\ (mm)$	$Armazón\ (kg)$	$Peso\ total\ (kg)$
15	66	753
18	79	766
30	132	819
36	158	845
45	198	885

Basándose en los resultados obtenidos, se opta por usar placas de MDF de 30 mm debido a que es el menor espesor que puede emplear tres soportes longitudinales, siendo este el menor posible para los espesores detallados. Acto seguido, se verifica el espesor escogido mediante el criterio de esfuerzos admisibles por deformación (ver tabla 10.4).

Tabla 10.4: Esfuerzos Honeycomb

$M\ [Nm]$	$\sigma\ [MPa]$	FS
23,3	0,26	143,4

En caso de emplear tablas de pino amarillo, se realizan los cálculos de deflexión para una tabla de $2'' \times 12'' \times 3,66m$. En este caso se emplean solamente 2 soportes transversales y 2 longitudinales (4 patas en total). Esta estructura pesaría en torno a 258 kg, sumando un total de 945 kg

Ahora bien, a la zona que no estaba cargada, basta con disponer de un soporte transversal aguas abajo de la misma para cumplir tanto los criterios de deflexión como de esfuerzos.

10.2.2. Secciones de mallas

Análogamente a la sección 10.2.1, se calcula la cantidad de soportes para las secciones de mallas. Las dimensiones longitudinales correspondientes para la sección 0, 1 y 2 son 468 mm, 80 mm y 300 mm respectivamente.

Las secciones se diseñan con la misma madera que la sección del Honeycomb. Dado que las tablas son muy esbeltas, existe el riesgo de falla por inestabilidad en

la estructura rectangular. Esto se evita implementando un bastidor sobre el cual se clavan las tablas.

Considerando los pesos relacionados con las mallas 0, 1 y 2, de aproximadamente 12, 12 y 15 kg ($\rho_{acero} = 7850\ kg/m^3$ [42]), se calculan los soportes necesarios para su estructura en la tabla 10.5. Son empleadas tablas de MDF de 30 mm para la estructura y las deformaciones son calculadas tomando en consideración su peso y el de las mallas, descargados en la tabla inferior. Cabe destacar, que dadas las pequeñas dimensiones longitudinales de la sección 1, un solo bastidor la cubre en casi su totalidad, por lo que la deformación de las tablas horizontales debe coincidir con la deformación del soporte transversal (dimensionado en la sección 10.8).

Tabla 10.5: Soportes transversales necesarios para cada sección de mallas

Sección	Largo $[mm]$	Peso $[kg]$	Deformación $[mm]$	Soportes
Sección 0	468	105	5,6	2
Sección 1	80	28	-	1
Sección 2	300	75	7,6	2

10.2.3. Sujeción de las mallas

Como se menciona anteriormente, se debe tener en cuenta el tensado de las mallas y como asegurar que sean planas. Para ello, se idea una sujeción externa, donde además se debe asegurar la estanqueidad del flujo. Si se dieran infiltraciones, la capa límite que se genera en la zona de acondicionamiento podría desprenderse, disminuyendo el rendimiento del túnel y la calidad del flujo incidente a la contracción (y posteriormente a la zona de trabajo).

Como consecuencia, se considera que la unión entre las diferentes secciones de acondicionamiento debe ser sellada utilizando un elastómero. De esta manera, al presentar ambas partes, el elastómero se adaptaría a la unión y lograría mitigar las infiltraciones.

Además, se propone implementar un compartimiento de madera donde se encierra esta unión, cubriendo también las sujeciones de cada malla respectivamente (ver figura 10.5). Esto haría que el ambiente cercano a las uniones se mantenga estable independientemente de las condiciones del flujo externo al túnel. Por último, los operarios podrían abrir este compartimiento cuando sea necesario un mantenimiento.

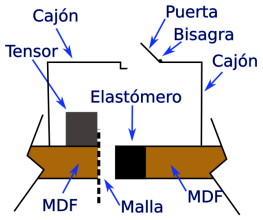


Figura 10.5: Sellado de la sujeción de las mallas

10.3. Contracción

Para este elemento se desprecian las cargas debidas a la depresión generada por el flujo. Solamente son consideradas las cargas debido al peso del elemento y a operarios parados en la tabla inferior. Debido a la curvatura de la contracción, se modela la tabla inferior como una tabla rectangular de igual área y dimensión longitudinal.

Dado que la tabla inferior está más cargada, por simplicidad constructiva, se toman todas las tablas de igual espesor.

10.3.1. Dimensionamiento de tablas por deflexión

Debido a la complejidad de la geometría, el procedimiento empleado para posicionar los soportes transversales consiste en dividir la sección en dos partes de igual peso, donde se evalúa el criterio de deflexión (sección 10.1.1). En caso de no cumplirse, se realiza nuevamente una división de la partición, procediendo de esta forma hasta encontrar la cantidad de soportes necesarios. Para evaluar la deflexión de las tablas, se las modela como vigas simplemente apoyadas en sus extremos. Se obtiene la tabla 10.6 que relaciona el espesor con la cantidad de soportes necesarios para cumplir el criterio de deflexión.

Tabla 10.6: Cantidad de soportes en función del espesor de tablas

Espesor [mm]	N^{ro} Soportes	Peso [kg]
12	12	215
15	11	269
18	8	322
21	7	376

Evaluando los resultados obtenidos en la tabla anterior, se decide emplear placas de MDF de 18 mm de espesor, debido a la necesidad de emplear tablas finas para realizar la curvatura de las mismas. También, se reduce la cantidad de soportes necesarios comparados con el caso de 15 mm. El peso de dichas placas suman un total de 322 kg, los cuales se soportan en 8 puntos detallados en la tabla 10.7, donde se toma el centro de coordenadas al final de la última malla.

Tabla 10.7: Ubicación de los soportes transversales (distancia medida a partir del comienzo de la contracción aguas arriba) y peso a soportar.

Soporte	1	2	3	4	5	6	7	8
Distancia [m]	0,00	0,70	1,05	1,35	1,60	1,95	2,35	2,90
Peso por soporte [kg]	42	63	41	40	38	38	40	21

10.4. Cálculo estructural de la sección de trabajo

En la presente sección se calcula el espesor de las tablas que componen la sección de trabajo, así como la cantidad de soportes y bastidores necesarios. A los efectos de modelar las cargas máximas a las cuales está sometida, se inspeccionan dos situaciones distintas de trabajo.

- Ventilador en marcha a velocidad nominal. La sección trabaja en depresión al flujo interno de aire.
- Ventilador apagado. Dos personas en reposo, cuyo peso se encuentra distribuido uniformemente en la tabla inferior.

En ambos casos se toma en cuenta el peso del material del cual estaría construida, para ello se utilizan los datos disponibles en el apéndice B.2.

10.4.1. Condición de sección cargada con personas

Para definir el peso de una persona se elige un promedio de $75\,kg$, uniformemente distribuidos en los $2\,m$ de la sección de trabajo, resultando en una carga distribuida $q = 735\,N/m$. Se implementan soportes inferiores dispuestos transversalmente, cada uno soportado por dos patas de madera.

10.4.2. Condición de depresión

Asumiendo un flujo interno a velocidad nominal $v = 40,4\,m/s$ y una pérdida de carga aguas arriba de $k = 0,461$ (sección obstruida con un perfil aerodinámico), se estima una depresión de 451 Pa al final de la sección de trabajo (10.14). Dicha depresión ejerce una carga distribuida máxima de $q = 631\ N/m$, en la tabla de mayores dimensiones.

$$\Delta P \;=\; k\,\rho\frac{v_n^2}{2} \tag{10.14}$$

La presión se supone uniforme a lo largo de toda la sección de trabajo y se desprecia el peso de los materiales. En este caso, las tablas laterales estarían más exigidas debido a su mayor superficie. Solamente se calculan los espesores necesarios tomando en cuenta dicha tabla. Para el dimensionamiento se implementan bastidores, a los cuales se atornillan o clavan las tablas, evitando que se deflecten hacia adentro.

10.4.3. Resultados

En la tabla 10.8, se detallan los resultados obtenidos para ambas condiciones de carga, especificándose para cada espesor considerado, la cantidad de bastidores requeridos según el tipo de carga.

Tabla 10.8: Bastidores necesarios según la condición de carga

Espesor (mm)	*Depresión*	*Carga estática*	*Peso* (kg)
15	5	3	115,2
18	3	3	138,2
30	3	2	230,4
36	3	2	276,5
45	2	2	345,6

Visto los resultados obtenidos en la tabla 10.8, para emplear la cantidad mínima de 2 bastidores, es necesario emplear tablas de MDF de 45 mm, lo cual es excesivo. La ventaja de no tener bastidores intermedios, es la posibilidad de incorporar ventanas amplias. Se decide realizar otro análisis modelando las tablas de MDF como placas bidimensionales simplemente apoyadas en los extremos. Si bien menos conservador que modelar como elemento unidimensional, es un método correcto.

A partir de [43], se obtiene la ecuación (10.15) para la deformación transversal ω, en una placa rectangular simplemente apoyada en sus extremos.

$$\omega = \frac{16q_o}{\pi^6 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{sin(\frac{m\pi x}{a}) sin(\frac{m\pi y}{b})}{mn\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \tag{10.15}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{10.16}$$

Donde a y b son el largo y ancho de la placa, h su espesor, q_o es la presión uniformemente aplicada sobre la placa, ν el coeficiente de Poisson y D es el módulo de flexión de la placa. El esfuerzo máximo aplicado sobre la placa, se detalla en la ecuación (10.17) para el caso de $a < b$. Este se calcula mediante el momento por unidad de longitud M_x con (10.18). Las propiedades estructurales del material se encuentran detalladas en el apéndice B.2.

$$(\sigma_x)_{max} = \frac{6(M_x)_{max}}{h^2} \tag{10.17}$$

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right) \tag{10.18}$$

A partir de (10.15) y (10.18) se obtiene la expresión de $M_x(x, y)$. Evaluando $w(x, y)$ y $M_x(x, y)$ en $(x, y) = (a/2, b/2)$ se obtienen as expresiones para las deformaciones (10.19) y momentos máximos en la placa (10.20).

$$\omega_{max} = \frac{16q_o}{\pi^6 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\left(\frac{m+n}{2}-1\right)}}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2} \tag{10.19}$$

$$(M_x)_{max} = \frac{16q_o}{\pi^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\left(\frac{m+n}{2}-1\right)}\left(\frac{m^2}{a^2}+\nu\frac{n^2}{b^2}\right)}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2} \tag{10.20}$$

Dado que la serie es de rápida convergencia, se calculan los primeros 7 términos para m y n. Obteniéndose la tabla 10.9, para el mínimo espesor de tabla que satisfaga todos los criterios, este es de $h = 18\ mm$. Donde el criterio de deformación en este caso es de $\delta_{max} = L/200 = 10\ mm$.

Tabla 10.9: Resultados del modelado por elemento bidimensional, tablas de MDF para la condición de depresión

Dimensiones $[m^2]$	w $[mm]$	Fs
1×2	2,5	42
1,4×2	6,9	29

Se verifican las dimensiones de la tabla inferior, que en la condición de la sección cargada con personas debe soportar una carga uniforme de $q_o = 735\ Pa$, la deformación total es de $w = 3{,}9\ mm$ y el factor de seguridad $Fs = 27$, para una tabla de $a \times b = 1 \times 2\ m^2$. A su vez, se puede observar como el criterio de deformación es mucho más exigente que el de esfuerzos máximos admisibles.

A partir del mismo análisis, puede dimensionarse las ventanas. Un material usado como ventanas para túneles de viento es el policarbonato, dada su flexibilidad que lo hace resistente a golpes en las puertas (la sección trabaja bajo succión). Las propiedades del material se encuentra detallada en el apéndice B.2. En la tabla 10.10, se detallan los resultados para la mínima sección de policarbonato que cumple los requisitos de dimensionamiento. Para ello se toma las mismas dimensiones de la tabla de MDF y se le quita un margen de 10 cm de los bordes para unir las placas a un marco de madera. Se consideran ventanas de espesor $h = 18\ mm$, para la puerta y también para el techo del túnel, en caso de instalar un plano láser.

Tabla 10.10: Resultados del dimensionamiento de las ventanas de policarbonato, $h = 18\ mm$

Dimensiones $[m^2]$	w $[mm]$	Fs
0,8×1,8	1,5	160
1,2×1,8	5,5	65

Para este último caso, el criterio de deformaciones corresponde a $\delta_{max} = L/200 = 9\ mm$. En la sección 10.16.4 se realiza una verificación de vibraciones del elemento para decidir si sería posible utilizar el policarbonato.

10.4.4. Encastre entre tablas

Un aspecto delicado de la sección de trabajo es la unión entre sus tablas, dado que no es recomendable usar clavos al tener las tablas en depresión y además se desea tener buena estanqueidad.

Para resolver el encastre, se propone la siguiente modificación en las tablas superiores e inferiores (ver figura 10.6), las cuales no se dimensionan.

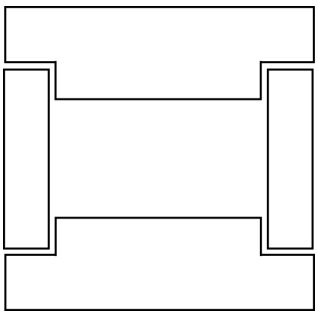


Figura 10.6: Detalle para las tablas superiores e inferiores de la sección de trabajo

10.5. Pieza de transición

Para dimensionar el espesor y cantidad de soportes de la pieza de transición, se la modela como un cono hueco del mismo largo. La sección menor, que corresponde al lado de la zona de trabajo, se sustituye por una sección cilíndrica con la misma área de entrada. Este modelo se estima más conservador que la geometría original, ya que cuenta con menos superficie. En la tabla 10.11, se detallan los datos que se emplean en el dimensionamiento.

Tabla 10.11: Dimensiones de la pieza de transición

$L\ [m]$	$R_1\ [m]$	$R_2\ [m]$	$Peso\ [kg]$
2	1,34	2	152

El método de energía de deformación (ver sección 10.1.2) se emplea para resolver la deflexión en la pieza de transición, obteniendo los valores dispuestos en la tabla 10.12, para un espesor de tabla de 18 mm y una carga que se corresponde a dos personas encima.

Tabla 10.12: Resultados obtenidos del sistema de ecuaciones para la pieza de transición

$R_{v1}\ [N]$	$R_{v2}\ [N]$	$x^*\ [m]$	$\delta\ [mm]$	$\sigma\ [MPa]$
553	937	0,64	2×10^{-3}	0,003

Se analiza a partir de los resultados que, teniendo apenas dos soportes, es suficiente para cumplir los requisitos de dimensionamiento.

10.6. Difusor

Análogamente a la pieza de transición, se resuelven los esfuerzos y deflexiones para el difusor. En este caso, se agregan dos fuerzas distribuidas correspondientes al peso de dos operarios de 75 kg. En la tabla 10.13 se observan los datos para el dimensionamiento y en la tabla 10.14 los resultados obtenidos, para un espesor de tabla de 18 mm.

Tabla 10.13: Dimensiones del difusor

$L\ [m]$	$R_1\ [m]$	$R_2\ [m]$	$Peso\ [kg]$
0,92	2,00	2,32	242

Tabla 10.14: Resultados obtenidos del sistema de ecuaciones para el difusor

$R_v1\ [N]$	$Rv2\ [N]$	$x^*\ [m]$	$\delta\ [mm]$	$\sigma\ [MPa]$
854	1518	0,38	2×10^{-4}	0,002

Al igual que para la pieza de transición, tanto los esfuerzos como deformaciones son de carácter despreciable para su dimensionamiento. Por lo tanto, se seleccionan dos soportes para este elemento.

10.7. Dimensionamiento de columnas

A los efectos de dimensionar los soportes de cada una de las secciones del túnel de viento, se debe verificar que cumplan los criterios de esfuerzos y pandeo. Por motivos constructivos, es más fácil construir las patas, pegando dos tablas, y de esta forma se obtiene una sección rectangular. En este caso se debe dimensionar por pandeo en la dirección de menor inercia. En la figura 10.7 se detallan las dimensiones de la sección de los soportes.

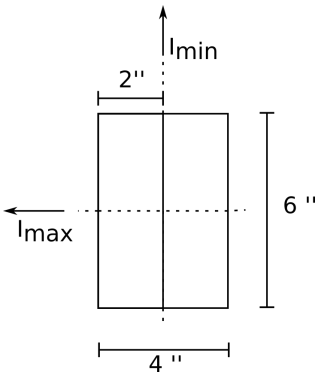


Figura 10.7: Dimensión transversal patas

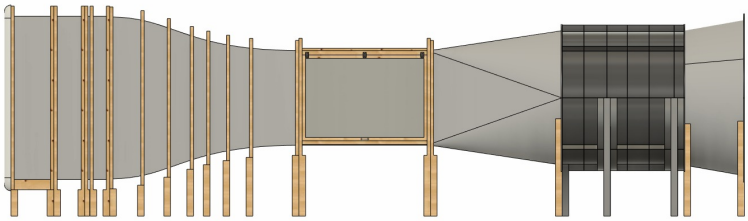


Figura 10.8: Esquema de soportes distribuidos en el túnel de viento

Por simplicidad se utiliza la misma sección para todos los soportes de madera dispuestos en el túnel de viento. La mínima inercia de la sección transversal es (10.21).

$$I_{min} = \frac{ab^3}{12} = 13,3 \times 10^6 \; mm^4 \tag{10.21}$$

$$A = 15,4 \times 10^3 \; mm^2 \tag{10.22}$$

En lo que corresponde al pandeo, la esbeltez de cada soporte es un factor determinante, por lo tanto, se debe tener en cuenta que cada uno de los soportes tienen largos distintos, este detalle se observa en la figura 10.8. Cabe destacar que los soportes de los extremos de cada componente, son colocados en contacto con el soporte del componente contiguo.

Debido a que las condiciones de carga son distintas en cada una de las partes del túnel de viento, se diferencian cuatro largos de patas y para dicho largo, se considera la peor condición de carga. En tabla 10.15, se detallan para los distintos puntos notables el largo y las cargas soportadas en cada caso, incluyendo la esbeltez máxima (λ_{max}) y la altura máxima h_{max} cedidas por el criterio de pandeo de Euler (10.23). El largo crítico depende de la naturaleza de las uniones en los extremos de las columnas, en este caso se toma el criterio más exigente de $L_{crit} = 2\,L$, correspondiente a un extremo libre y un extremo empotrado.

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L_{crit}^2} \tag{10.23}$$

Debido a que el túnel de viento es simétrico respecto a la dirección longitudinal, las cargas también varían de esta forma. Por lo tanto, en cada uno de los puntos notables existen al menos dos columnas que soporta el peso calculado para los soportes de las secciones. El número de columnas es detallado en la tabla 10.15 y la carga crítica (P_{crit}), corresponde a la carga soportada por una de las columnas en la sección transversal, considerando que el peso es soportado de manera uniforme entre ellas. No se incluyen un análisis sobre la contracción, debido a que se considera que en la sección del Honeycomb se tienen condiciones más exigentes.

Tabla 10.15: Resultados obtenidos para las columnas de madera

Zona	*Columnas*	*Largo* $[m]$	P_{crit} $[N]$	λ_{crit}	h_{crit} $[m]$
Honeycomb	4	h	1608	1097	16
Zona de trabajo	4	h+0.52	1412	1171	16
Entrada difusor	2	h+0.27	470	2029	29
Salida difusor	2	h+0.11	717	1643	24

Por otro lado, se verifica que el criterio de esfuerzos empleando la máxima fuerza axial que soportada la columna más exigida, (10.24).

$$\frac{P}{A} = 0,1\ MPa << \frac{S_y}{Fs} \tag{10.24}$$

Dado que la altura h puede ser arbitrariamente grande, se decide imponer $h = 0,4\ m$, dado que en ese caso la sección de trabajo está a una altura de $h_{s.t.} \approx 0,9\ m$. Esta altura se considera adecuada para que un operario realice el acondicionamiento de la sección de trabajo parado y, cuando se esté trabajando con el ventilador encendido, se pueda realizar tareas sentado y aun así poder controlar lo que sucede en el interior de la sección.

10.8. Dimensionamiento de soportes

Para los soportes se emplea la una tabla de pino amarillo de sección transversal $2'' \times 6''$. Es necesario verificar que se cumple el criterio de deformaciones y de esfuerzos máximos admisibles (ver sección 10.1.1). Para ello se elabora la tabla 10.16, donde se detalla el elemento aerodinámico, la longitud transversal y el peso que debe soportar la tabla (tomando en consideración que la pieza de transición y difusor tienen sección circular[2]).

Tabla 10.16: Datos para el dimensionamiento de soportes

Elemento	**Peso [kg]**	**Soportes**	**Largo/Diámetro [m]**
Honeycomb	819	5	1,74
Contracción	322	8	1,74
S.T.	288	3	1
P. de transición	152	2	-
Soporte 1	56	-	1,34
Soporte 2	96	-	2
Difusor	242	2	-
Soporte 1	87	-	2
Soporte 2	155	-	2,32

[2]En el caso de la pieza de transición, se mantiene la consistencia con el modelo empleado de aproximar su geometría por un cono truncado.

Para verificar que se cumple el factor de seguridad y el criterio de deformaciones, se realizan los cálculos de esfuerzos y deformación para cada elemento detallado anteriormente. Además, se asume que en todos los casos, las cargas están uniformemente distribuidas. El resultado para los elementos de sección rectangular está dada en la tabla 10.17, donde se detalla la carga distribuida soportada por cada viga, el criterio de deformación $L/200$, la deformación de cada viga, y el factor de seguridad establecido para cada viga.

Tabla 10.17: Resultados del dimensionamiento para soportes de elementos de sección rectangular

Elemento	**Carga [N/m]**	**L/200 [mm]**	δ **[mm]**	**Fs**
Honeycomb	923	8,7	-	269
Contracción	394,5	8,7	-	1000
S.T.	941	5	-	800

Se puede observar que los soportes estarían sobredimensionados por esfuerzo y por deformación. Esto se debe a que en primer lugar, se utiliza pino amarillo muy resistente (para utilizar el mismo material que en las columnas). También, se debe recordar que la cantidad de soportes fue determinada por el dimensionamiento por deformación de tablas de MDF, material mucho más flexible que los soportes.

Por otra parte, las secciones de la pieza de transición y el difusor son circulares y no es posible emplear las tablas de pino amarillo. El soporte empleado en este caso es un recorte de tabla de MDF la cual debe dimensionarse su espesor. En la figura 10.9 se muestra la geometría del recorte.

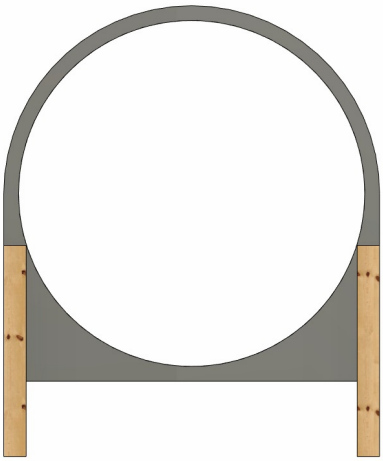


Figura 10.9: Soportes para elementos de secciones curvas.

El dimensionamiento de los soportes de MDF se realiza considerando el mínimo espesor de tabla empleado de 15 mm. Y el alto de la viga, se considera un mínimo de 10 cm. Los resultados del dimensionamiento se detallan en la tabla 10.18.

Para realizar los cálculos, se aproxima por una viga curva, de sección transversal uniforme ($100 \times 15\ mm^2$).

Tabla 10.18: Resultado del dimensionamiento de soportes de MDF para elementos de sección curva

Elemento	**Carga [N/m]**	**R/200 [mm]**	**δ [mm]**	**Fs**
Pieza de transición	-	-	-	-
Soporte 1	261	6,7	0,7	32
Soporte 2	300	10	2,5	19
Difusor	-	-	-	-
Soporte 1	271	10	2,3	21
Soporte 2	417	11,7	5,4	12

Como se puede apreciar, todos los factores de diseño obtenidos son mayores a 7, y la deflexión calculada es inferior al criterio de $L/200$.

10.9. Soportes del motor

En esta sección se presentan los cálculos y dimensionamientos pertinentes para el soporte, sujeción y estabilidad del conjunto motor, ventilador y carcasa.

En la tabla 10.19 se detallan los datos a partir de los cuales se desarrolla el diseño estructural de los soportes del motor, donde L_v y L_h son los brazos de momento vertical y horizontal al centro de giro del motor. Dichos datos técnicos son obtenidos del apéndice B.1.1.

Tabla 10.19: Datos necesarios para el diseño del soporte del motor

$L_v\ [cm]$	$L_h\ [cm]$	$M_{nom}\ [Nm]$	$M_{pico}\ [Nm]$	$P\ [kN]$
69,4	73,2	436	1003	6,0

Para la sujeción del motor se plantean un conjunto de cuatro soportes verticales y cuatro horizontales que cumplen el rol de soportar el peso del motor y, de prevenir inestabilidades y vibraciones. El esquema de la sujeción del motor es representada en la figura 10.10.

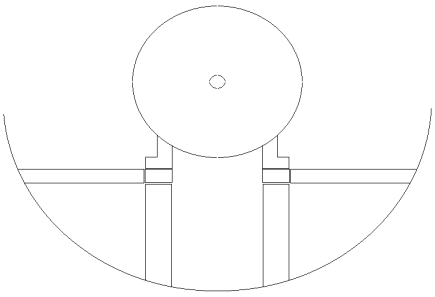


Figura 10.10: Diagrama del motor

Primeramente, se deben definir las cargas a las cuales se someten las barras. En principio existen dos tipos de funcionamientos donde se están exigiendo los soportes:

- Caso 1: Durante el arranque se debe soportar el momento pico del motor y su peso.
- Caso 2: Funcionando en régimen en condiciones nominales, se debe soportar el momento nominal del motor, su peso, y la carga axial impuesta por la diferencia de presiones. Dicha diferencia es máxima en condiciones nominales.

10.9.1. Dimensionamiento por esfuerzos

Se procede a dimensionar por ambos casos y determinar cuál es el más exigente.

10.9.1.1. Caso 1

Para analizar el efecto de las cargas en las barras, se modela el sistema como un reticulado, imponiendo como condiciones de diseño una deflexión máxima admisible (sección 10.1.1) y un esfuerzo máximo admisible $\frac{S_y}{Fs}$. En este caso, el criterio de esfuerzos máximos es el criterio que diseña dado que al fijar la deformación máxima de $\delta = L/200$, el esfuerzo resultante es $\sigma = \frac{E\delta}{L} = 1000\ MPa$, lo cual supera el esfuerzo por fluencia.

Modelando como reticulado, se desprecian los esfuerzos flectores inherentes al tipo de unión entre las barras (soldadura). Dicha hipótesis es razonable porque al darse una deformación pequeña por cargar el elemento axialmente, se generan esfuerzos flectores de orden menor que los axiales. En particular, para barras circulares de igual largo y radio, dispuestas como en la figura 10.11. los esfuerzos flectores son un orden de magnitud menor que los axiales si se cumple que $L \geq 30R$.

El balance de fuerzas se describe en la figura 10.11, donde $d = 457\,mm$. Se aplica el criterio de simetría para determinar las reacciones debidas al momento. Las reacciones resultantes se obtienen aplicando superposición de cargas, sumando

la reacción debida al peso motor eléctrico, distribuido equitativamente entre los soportes verticales.

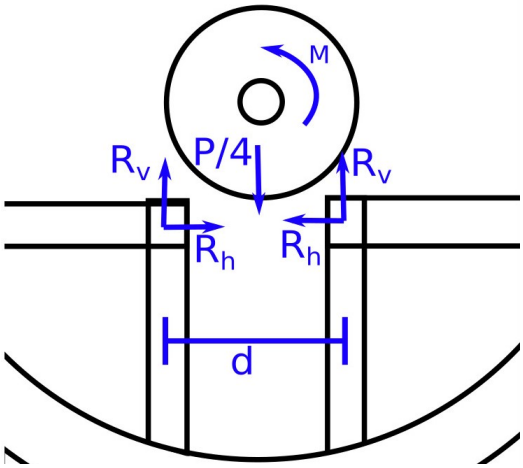


Figura 10.11: Diagrama de fuerzas para soportes del motor

Como puede apreciarse en la figura 10.11, la resultante R_h no realiza par para resistivo al momento del motor. La utilidad de las barras horizontales, viene dada por el aumento de la rigidez de la estructura y elevar la frecuencia de resonancia a niveles admisibles, ver sección 10.16.1. La resultante R_v se obtiene resolviendo la segunda cardinal (10.25), aplicada sobre el punto de unión de una de las dos barras, cabe destacar que esta resultante se calcula, en esta instancia, sin tomar en cuenta el peso del motor, donde se realiza la hipótesis de que el momento es soportado de igual forma por los soportes delanteros y traseros.

$$\frac{M}{2} = d\,R_v \tag{10.25}$$

Mediante el principio de superposición, se suma a las reacciones verticales el peso del motor. Utilizando la ecuación de esfuerzos, se despeja el área máxima admisible para la barra vertical. En la tabla 10.20 se detallan los valores obtenidos.

Tabla 10.20: Solución al sistema de ecuaciones

$R_v\ [kN]$	$A\ [mm^2]$	$\sigma\ [MPa]$
2,6	39	67

En las secciones siguientes se modifican las áreas obtenidas en función de pandeo, vibraciones y emisiones acústicas.

10.9.1.2. Caso 2

En este caso el momento que resisten los soportes verticales es de $M_{nom} = 436\,Nm$. Siguiendo un análisis similar al caso uno, se obtiene una fuerza resistiva de $R_v = 1,98\,kN$ (incluyendo el peso del motor).

El empuje axial se calcula mediante (10.26), donde $k = 0,75$, $v = 40,4\,m/s$ y $\rho = 1,2\,kg/m^3$.

$$\Delta P = \rho k \frac{v^2}{2} \tag{10.26}$$

La presión obtenida es de 734,5 Pa, por lo tanto, el empuje axial que debe resistir el ventilador, aplicado sobre el centro de la circunferencia, consiste en $F_{axial} = 2,31\,kN$. Por su parte, se toma la fuerza del empuje y se reparte entre los 8 soportes del motor, donde tendría un brazo de palanca máximo de $1\,m$. Por lo tanto, el momento aplicado en la base de cada soporte es de $287\,Nm$.

Mediante el principio de superposición, se aplica el esfuerzo introducido por el empuje axial (10.27) y el esfuerzo axial debido a al peso del motor y el par nominal del motor (10.28).

$$\sigma_{empuje} = \frac{M_{empuje}\,y}{I} \tag{10.27}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{R_v}{A} \tag{10.28}$$

Debido a que los esfuerzos se aplican en planos diferentes, el esfuerzo resultante se calcula mediante (10.29)

$$\sigma_{resultante} = \sqrt{\sigma_{empuje}^2 + \sigma_{axial}^2} \tag{10.29}$$

Igualando $\sigma_{resultante} = S_y/3$, se calculan las dimensiones mínimas admisibles para las barras, tabla 10.21

Tabla 10.21: Dimensiones mínimas admisibles de soportes para el caso 2

$t\ [mm]$	$D_{ext}\ [mm]$	$A\ [mm^2]$
1	75,5	234
2	55,3	335
3	47,1	416
4	42,7	486
5	40,0	550

Observando el área obtenida para los distintos tamaños de tubos, se concluye que el caso 2 es más exigente que el caso 1.

10.9.2. Dimensionamiento por pandeo

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 10.20, se procede a dimensionar por pandeo según el caso más exigente en este sentido (el caso 1), aplicando la ecuación de la carga crítica de Euler (10.10), donde $L_{cr} = 2\,L$ es el largo crítico de pandeo de las barras que soportan al motor. El factor de 2 proviene de la

naturaleza de la sujeción de las barras que están sujetadas de la carcasa por un extremo y por el otro tienen cierto grado de libertad dado que sujetan al motor.

Mediante (10.10) se calcula la inercia mínima I, y los valores de λ y D_{ext} resultantes para cada barra, considerando el material como una barra circular. Los resultados del cálculo se detallan en la tabla 10.22.

Tabla 10.22: Cálculo de pandeo por método de Euler

P_{cr} $[kN]$	I_{min} $[mm^4]$	λ
2,6	2538	172

A partir de los valores de I de la tabla 10.22 se calculan los diámetros mínimos en función del espesor de pared y respetando el área mínima calculada anteriormente. La tabla 10.23 dispone de los datos resultantes del cálculo de pandeo y esfuerzos, considerando un tubo de sección circular.

Tabla 10.23: Dimensiones mínimas admisibles para evitar pandeo y falla por fluencia

t $[mm]$	D_{ext} $[mm]$	A $[mm^2]$
1	20	56,7
2	17	94,2
3	16	122,5
4	15	138,2
5	15	157,1

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir:

1. El criterio de pandeo no es tan exigente como el criterio de empuje axial, desarrollado en la sección 10.9.1.2.

2. Las dimensiones son modificadas posteriormente en el análisis por vibraciones en la sección 10.16.1.

10.10. Dimensionamiento de la carcasa

La carcasa se la modela como una viga curvada en una circunferencia de radio $R = 1\ m$, soportada por dos vigas en los extremos laterales, ver figura 10.12. Las fuerzas aplicadas se modelan como:

1. Peso del motor: $P_m = 5998\ N$

2. Dos personas distribuidas uniformemente: $P_p = 1470\ N$

3. Conjunto del rotor, y demás piezas de acero: $P_{extras} = 2940\ N$

Por lo tanto, se tiene un peso total aplicado de $P = 10,4\ kN$, donde algunos son aplicados puntualmente sobre el aro y otros son distribuidos. Para simplificar el cálculo, se modela el problema como el caso extremo de tener todo el peso aplicado en la parte inferior del aro, ver figura 10.12.

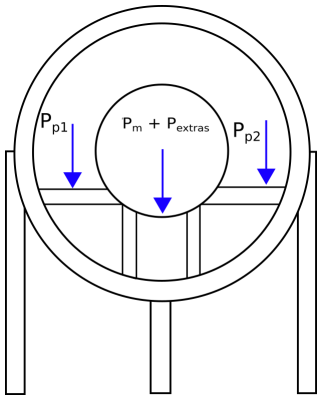


Figura 10.12: Diagrama de fuerzas aplicadas sobre la carcasa

Esto se puede resolver mediante el problema equivalente de la figura 10.13, que supone una viga (con un cuarto de circunferencia de largo) en voladizo. Allí, por simetría, el cortante aplicado es de la mitad y aparece un momento que mantiene horizontalmente el extremo de la viga.

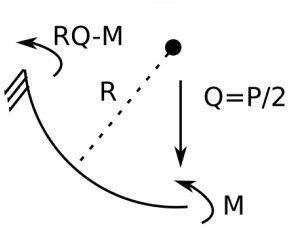


Figura 10.13: Problema equivalente

Se emplea el método de la energía para resolver el problema [41]. Se desprecia la energía de deformación por cortante y axial y se calcula solamente la energía de deformación por flector (10.30).

$$U_f = \int_0^{\pi/2} \frac{M_{int}^2}{EI} R\, d\theta \tag{10.30}$$

El sistema de ecuaciones a resolver comprende las ecuaciones (10.31) a (10.33). Donde la expresión del momento interno M_{int} se obtiene cortando la viga en un ángulo θ y aplicando balances de fuerzas.

$$\delta = \frac{\delta U_f(Q,M)}{\delta Q} = \frac{R}{200} \tag{10.31}$$

$$\theta = \frac{\delta U_f(Q,M)}{\delta M} = 0 \tag{10.32}$$

$$M_{int}(\theta) = Q\ R\ sin(\theta) - M \tag{10.33}$$

Resolviendo el problema se obtiene una expresión para el momento (10.34), la cual es independiente de la inercia de la barra y corresponde al máximo momento aplicado sobre la estructura. Se obtiene la expresión para la deformación resultante (10.35), en función de la geometría de la sección. En la tabla 10.24, se muestran los valores hallados para el momento interno M_{int}, la inercia mínima I_{min} y momento máximo aplicado sobre la barra M_{max}.

$$M = \frac{2\ Q\ R}{\pi} \tag{10.34}$$

$$\delta = \frac{2R^2}{EI}\left[\frac{\pi Q R}{4} - M\right] \tag{10.35}$$

Tabla 10.24: Resultados del sistema de ecuaciones para la carcasa

$Q\ [kN]$	$M\ [Nm]$	$I_{min}\ [mm^4]$
5,2	3310	1547x10^{-3}

Por otro lado, con la ecuación de esfuerzos se iguala al esfuerzo máximo admisible $\frac{S_y}{Fs}\ \sigma$, y se despeja la relación máxima admisible de $\frac{y}{I}$, (10.36).

$$\frac{y}{I} = \frac{S_y}{M\ F_S} \tag{10.36}$$

$$\tag{10.37}$$

Finalmente, se obtienen los valores que debe cumplir la geometría transversal de la viga. Dichos valores se detallan en la tabla 10.25. La geometría propuesta que cumple estas condiciones se conforma al colocar los refuerzos transversales de los que se habla en la sección 10.10.1 (en particular, ver figura 10.14).

Tabla 10.25: Valores mínimos admisibles para la geometría transversal de la viga

$I_{min}\ [mm^4]$	$max\frac{y}{I}\ [m^3]$
1547x10^3	20140

10.10.1. Refuerzos transversales

La dimensión longitudinal de la carcasa está impuesta por la longitud del motor ($1,20\ m$), longitud del ventilador y nariz ($0,5\ +0,15$). Por lo tanto, la sección transversal tiene una dimensión fija de $L\ =\ 1,85\ m$.

Vistos los requerimientos de inercia, una chapa rectangular tendría un espesor excesivo. Por lo tanto, se propone agregar refuerzos transversales para aumentar la inercia, ver figura 10.14

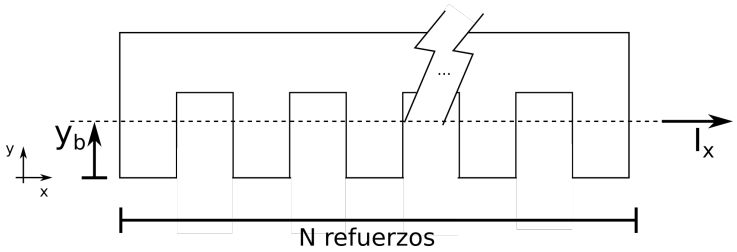


Figura 10.14: Sección transversal con N refuerzos

Para calcular la inercia y la línea media, se hace uso de la bibliografía [41]. Se propone realizar los refuerzos con chapas del mismo espesor que la que formaría el anillo interior. Estos además deben contar con un ancho $l\ =\ 10\ cm$ (en la dirección de y que se observa en la figura 10.14). El cálculo de la línea media y_b se hace igualando a cero al primer momento de inercia Q, (10.38) y finalmente se calcula I, el segundo momento de inercia (10.39).

$$Q\ =\ N\frac{ab}{2}\left[a-2y_b\right]+(N-1)\frac{bc}{2}\left[2a-b-2y_b\right] \tag{10.38}$$

$$I\ =\ N\frac{ab}{3}\left[a^3-3y_ba+3y_b^2\right]+(N-1)\frac{c}{3}\left[(a-y_b)^3-(a-b-y_b)^3\right] \tag{10.39}$$

En la tabla 10.26, se detalla el número de refuerzos, espesores de chapa admisibles calculados y demás valores de interés como la distancia de la linea neutra y_b, y la separación entre refuerzos.

Tabla 10.26: Dimensiones admisibles para refuerzos

N	$y_b\ [mm]$	$I\ [mm^4\times 10^{-3}]$	$y/I\ [m^{-3}]$	$t\ [mm]$	$Separación\ [cm]$
2	97,8	4854	20140	7,1	82,5
3	98,0	4867	20140	4,8	55,0
4	97,9	4862	20140	3,7	41,3
5	97,8	4857	20140	2,9	33,0
6	97,7	4852	20140	2,5	27,5

Analizando los valores de la tabla 10.26, se elige la configuración de 5 refuerzos transversales. Tal configuración tiene una inercia de deformación de $I\ =$

$4857 \times 10^3\ mm^4$ según el eje longitudinal. Se verifica, a su vez, que el criterio que dimensiona la estructura es el de esfuerzos máximos admisibles, y, por lo tanto, la deformación resultante es mucho menor, pasando a ser $\delta = 1,6\ mm$

Por último, se agregan 8 refuerzos longitudinales equiespaciados que aumentan la sección de contacto con los soportes de la carcasa. Además, le agrega rigidez a los refuerzos transversales, minimizando el riesgo de pandeo y falla ante errores constructivos, haciendo más robusto al diseño.

10.11. Columnas y soportes para la carcasa

10.11.1. Dimensionamiento de soportes

La función que debe cumplir el soporte de la carcasa es en parte la de soportar su propio peso y el del motor. Además, debe evitar que la carcasa vuelque debido a los momentos que ejerce la propia estructura.

Se considera disponer de dos soportes a cada lado de la carcasa que soportan por medio de dos vigas anulares el peso de la carcasa. Las vigas se deben construir con la misma chapa empleada para la carcasa, por simplicidad. El cálculo para sus dimensiones es similar al de la carcasa, salvo que se soporta la mitad del peso, la dimensión longitudinal de las mismas es menor. El peso de la carcasa calculado es de $P_{carcasa} = 3,66\ kN$ y el peso de los elementos en su interior se calcularon anteriormente, alcanzando un valor de $P_{interior} = 10,4\ kN$.

Se disponen láminas de ancho $l = 10\ cm$ para armar la estructura del arco que soporta la carcasa.

Se emplean dos soportes con forma de medio anillo, los cuales deben soportar la mitad del peso de la carcasa y la mitad de las cargas dispuestas por cada una. El criterio de dimensionamiento es análogo al de los refuerzos de la carcasa, obteniéndose los valores mínimos admisibles de la geometría de los soportes en la tabla 10.27.

Tabla 10.27: Datos para el dimensionamiento del soporte de la carcasa

$Q\ [kN]$	$M\ [Nm]$	$I\ [m^4]$	$\frac{y}{I}\ [m^{-3}]$
3,52	2465	1,39*10^{-6}	27083

Las dimensiones calculadas para los soportes se detallan en la tabla 10.28.

Tabla 10.28: Dimensiones del soporte de la carcasa

N	$Ancho\ [m]$	$Altura\ [m]$	$Espesor\ [mm]$
2	0,3	0,1	3

10.11.2. Dimensionamiento de columnas

Acto seguido, se dimensiona la sección transversal de las columnas de apoyo. Deben cumplir los requisitos de esfuerzos y pandeo. El peso total sumando los

soportes de la carcasa se eleva a $P = 21,5kN$. En total se tienen 4 columnas que idealmente soportan todas el mismo peso $P_{columna} = P_{total}/4$. El largo crítico de pandeo se obtiene de modelar dicho soporte como un empotramiento y una unión articulada $L_{cr} = 0,7L$.

Mediante la ecuación (10.10), se obtiene la mínima inercia de la estructura que evita la falla por pandeo. El valor obtenido es de $I = 28319\ mm^4$. Si se emplea una viga W 150 × 13,0 (también conocido como perfil I) sus inercias principales son $I_x = 635\,cm^4$ y su $I_y = 82\,cm^4$ (ambas superando ampliamente este valor).

Se verifica por esfuerzos, que dicha dimensión es adecuada.

$$\frac{P}{A} = 12,95\ MPa < \frac{S_y}{Fs} = 66,7\ MPa \tag{10.40}$$

Finalmente, se debe verificar que la estructura no vuelque. Por lo tanto, se considera la condición más exigente que es con dos operarios en la sección del rotor y el peso de la estructura en voladizo, que se puede modelar como una carga puntual a la mitad de la distancia (ver figura 10.15). El momento calculado es de $M = 3357\ Nm$. Donde f es la fracción del volumen de la carcasa que se encuentra a la derecha del soporte central.

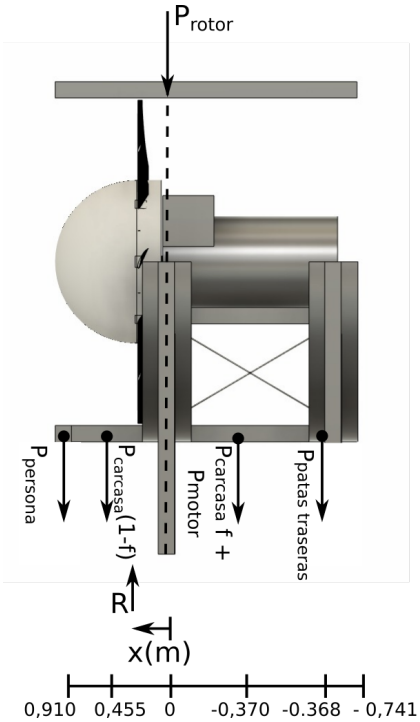


Figura 10.15: Diagrama de cuerpo libre sobre la estructura de la carcasa

Resolviendo la ecuación de momentos se obtiene un valor de $x = -90\,mm$ sin operarios encima, lo cual asegura la condición de no vuelco. Por otro lado, considerando los operarios parados en la posición que aplica máximo momento, se obtiene $x = 5,1\,mm$. Que el centro de masa de la estructura este situado en

la columna central podría provocar un vuelco, por lo tanto, se debe optar por una medida de seguridad para evitarlo. Se decide colocar una columna extra en el extremo cercano a la pieza de transición, con dimensiones similares a las demás columnas.

10.12. Dimensionamiento del alma de los álabes

Un aspecto a considerar en el diseño estructural del ventilador es el acople de las palas al motor, en particular en esta sección se aborda lo relacionado con la unión de la parte funcional de la pala con la estructura detrás de la nariz. Esta sujeción es descrita en la figura 10.16, donde se puede observar como existen dos orificios por los que se sujetaría el alma al cubo del ventilador.

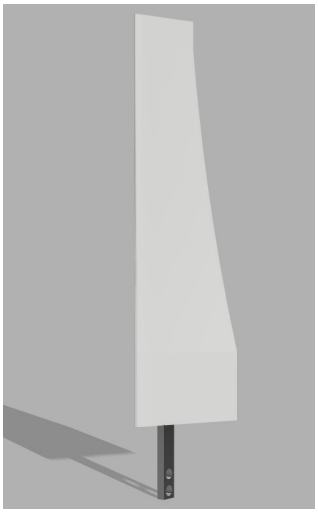


Figura 10.16: Sujeción del alma de la pala

Se suele observar en distintos ejemplos de diseño que el volumen del álabe está construido principalmente de materiales livianos, para luego colocar por dentro (cerca del eje) una estructura más rígida. En particular, se desea dimensionar el largo de este componente modelando los esfuerzos que se dan en el contacto entre estos dos materiales.

10.12.1. Dimensionamiento por fuerzas de Sustentación y de Arrastre

Para poder dimensionar dicho contacto, se debe conocer cómo es la proyección de los esfuerzos generados por el fluido. Al variar el ángulo de pala en la dirección radial, idealmente se debería conocer los esfuerzos y ángulo en función del radio y así poder integrar estos resultados y obtener una resultante con su módulo y sentido, contemplando la geometría completa de la pala. En este caso, basándose en el desarrollo de discretización presentado en la sección 9.10.2, se consideran

los esfuerzos hallados para cada diámetro característico. Estos, a su vez, son considerados constantes para el intervalo de diámetros con los cuales se calculó el respectivo diámetro característico. De esta manera, se obtiene una aproximación discreta de suma de esfuerzos a lo largo del álabe. En la figura 10.17 se pueden observar los distintos ángulos conocidos siguiendo este desarrollo, a partir de los cuales se deduce el ángulo β_R que forma la resultante de cada subsección con la horizontal (plano transversal al flujo). Los datos extraídos para cada una de las 5 regiones de la pala se muestran en la tabla 10.29

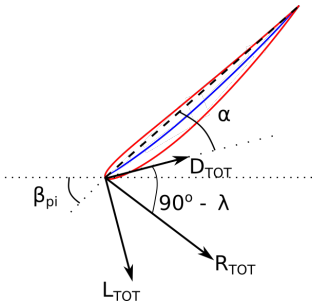


Figura 10.17: Ángulos de interés

- $\beta_R = 90 - \lambda + \alpha - \beta_{p@D_{car\,i}}$
- D: comenzando desde $D_0 = 1,04\,m$, se detalla el diámetro máximo que alcanza cada subsección.
- D_{car}: diámetro representativo de la sección (ver Sección 9.10).
- l: largo de cuerda de la subsección.
- v_∞: vector velocidad medio en la subsección.
- L_{tot}, D_{tot} *y* R_{tot}: Lift, Drag y Resultante (respectivamente) en la sección multiplicado por el ancho de la sección ($(D_{i+1} - D_i)/2$).
- β_p: ángulo que forma la orientación del álabe en la subsección con la horizontal.
- β_R: ángulo que forma la resultante de la subsección con la horizontal.

Tabla 10.29: Esfuerzos sobre las 5 regiones de la pala

$D_{car}\,(m)$	$l\,(cm)$	$v\,(m/s)$	$L_{tot}\,(N)$	$D_{tot}\,(N)$	$\beta_p\,()$	$\beta_R\,()$	$R_{tot}\,(N)$
1,17	13,8	60,8	43,4	0,461	32,4	63,5	43,4
1,39	11,9	72,0	43,9	0,466	27,9	68,0	43,9
1,58	10,5	81,7	43,8	0,464	25,1	70,8	43,8
1,75	9,47	90,4	43,7	0,463	23,2	72,7	43,7
1,91	8,70	98,4	43,7	0,463	21,8	74,1	43,7

Con los datos presentados, se puede hallar la resultante de todo el álabe, con su respectiva dirección, sentido y momento que aplica en la base (en un diámetro de 1 metro). De manera de evitar complejizar el acople, se busca que el alma de la sujeción se encuentre alineada con el plano de rotación, es decir, uno de sus lados esté en el plano transversal al flujo. De esta manera, se procede a descomponer la resultante utilizando el ángulo β_R.

$$\vec{F}.\hat{\imath} = \sum_{i=1}^{5} F_i \sin\beta_{R_i} = 204,7\,N$$

$$\vec{F}.\hat{\jmath} = \sum_{i=1}^{5} F_i \cos\beta_{R_i} = 75,2\,N$$

$$\vec{M}.\text{-}\hat{\imath} = \sum_{i=1}^{5} F_i \frac{D_{car\,i} - D_0}{2} \cos\beta_{R_i} = 19,4\,Nm$$

$$\vec{M}.\hat{\jmath} = \sum_{i=1}^{5} F_i \frac{D_{car\,i} - D_0}{2} \sin\beta_{R_i} = 58,0\,Nm$$

A partir de los valores obtenidos se distingue que una dirección es la más exigida, de todas formas se realiza un análisis de verificación al final para optimizar las dimensiones del acople.

Dada la sección rectangular que se planea utilizar para el alma, se decide modelar el sistema de manera de tratar ambos ejes como problemas aislados (considerando ciertos esfuerzos dependiendo de la cara del alma que se esté dimensionando). También, sabiendo que el material más débil y liviano es el utilizado alrededor del alma metálica, se analiza el efecto de los esfuerzos sobre esta estructura. En la figura 10.18 se muestra un corte transversal de la geometría simplificada de la resina epoxi para el análisis y se destaca la sección más comprometida.

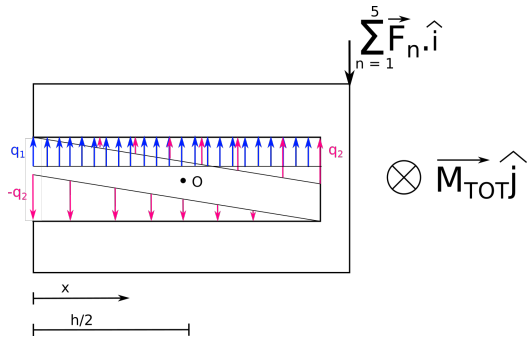


Figura 10.18: Modelado del vínculo entre la pieza de resina y el alma de acero

- q_1: carga distribuida constante a lo largo de la superficie de contacto la cual contrarresta la fuerza F.

- q_2: carga distribuida no uniforme que contrarresta el momento que experimenta el álabe por los esfuerzos distribuidos.
- h: largo de la superficie de contacto.
- O: punto ubicado en el centro del hueco de la estructura para cálculo de momentos.

Dentro de las hipótesis tomadas para el modelado se destaca la decisión de utilizar dos cargas distribuidas seleccionadas especialmente para contrarrestar las fuerzas y momento que se ejercen en la estructura de manera sencilla. De esta manera resulta clara la elección de la sección más comprometida.

A partir de un balance mecánico planteado en las ecuaciones (10.42) - (10.44), se hallan los valores de q_1 y $q_{2_{max}}$ en función de h para poder determinar cuáles deben ser las dimensiones del acople para no presentar fallas mecánicas.

$$q_1\, h \;=\; \vec{F}.\,\hat{\imath} \tag{10.41}$$

$$q_1 \;=\; \frac{\vec{F}.\,\hat{\imath}}{h} \tag{10.42}$$

$$2\int_0^h q_2(x)\,(x\,-\,h/2)\,dx \;=\; \vec{M}.\,\hat{\jmath} \;+\; \frac{h}{2}\,\vec{F}.\,\hat{\imath} \tag{10.43}$$

$$q_{2_{max}} \;=\; \frac{6\,\vec{M}.\,\hat{\jmath}}{h^2} \;+\; \frac{3\,\vec{F}.\,\hat{\imath}}{h} \tag{10.44}$$

Luego, con los valores obtenidos se plantea un análisis solo de la estructura superior, sustituyendo el modelado del resto de la estructura por un empotramiento en la sección más comprometida. Ver figuras 10.19 y 10.20.

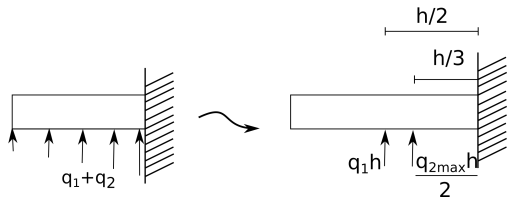


Figura 10.19: Esquema de modelado como viga en voladizo

$$F_s \;=\; \frac{5}{2}\,\vec{F}.\,\hat{\imath} \;+\; \frac{3\,\vec{M}.\,\hat{\jmath}}{h} \tag{10.45}$$

$$M_s \;=\; \vec{F}.\,\hat{\imath}\,h \;+\; \vec{M}.\,\hat{\jmath} \tag{10.46}$$

donde:

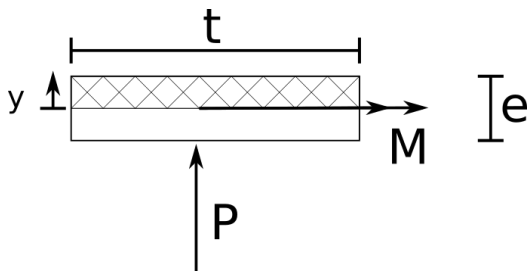


Figura 10.20: Vista de la sección

- F_s: Fuerza equivalente en la sección más comprometida con dependencia de h.
- M_s: Momento equivalente en la sección más comprometida con dependencia de h.
- e: espesor de la sección.
- t: largo de la sección.

Para finalmente decidir las dimensiones que debe cumplir la estructura, se utiliza el criterio de diseño por Tresca (10.47). A continuación se muestran los esfuerzos en función de las variables h, t, y e.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4\,\tau^2} \leqslant \frac{S_y}{N} \tag{10.47}$$

$$\begin{aligned}
\tau &= \frac{F_s\,Q}{I\,t} \\
\sigma &= \frac{M_s\,y}{I} \\
Q &= \bar{y}\,A \\
I &= \frac{t\,e^3}{12} \\
\bar{y} &= \frac{1}{2}\,y + \frac{e}{4} \\
A &= t\left(\frac{e}{2} - y\right)
\end{aligned}$$

con:

- τ: esfuerzo cortante.
- σ: esfuerzo flector.
- S_y: sigma de fluencia a flexión de la resina epoxi.
- N: factor de diseño.

- Q: primer momento de área.

Se puede apreciar que el sistema obtenido no es determinado, por lo que se procede a seleccionar valores de prueba h, t y e para luego analizar si cumplen con el criterio utilizado. Se elige un factor de diseño de 3 para contemplar cualquier imperfección constructiva y evitar posibles fallas en esta sujeción crítica para el rotor.

Para valores razonables de h, el punto más comprometido de la sección sería donde el esfuerzo cortante es nulo y el esfuerzo flector es máximo. Los valores finales se muestran a continuación:

$$S_y = 70\,MPa \tag{10.48}$$
$$h = 5,0\,cm \tag{10.49}$$
$$t = 2,0\,cm \tag{10.50}$$
$$e = 3,0\,cm \tag{10.51}$$
$$N = 3,08 \tag{10.52}$$
$$\tag{10.53}$$

Dado el valor de resistencia a la fluencia por flector [44], se obtiene un factor de seguridad de $3,08 > 3$. Si se optara por una configuración de 6 palas, no se superaría el factor de diseño impuesto.

10.12.2. Dimensionamiento por fuerza Centrífuga

Por otra parte, se encuentran los esfuerzos generados por la fuerza centrífuga. Esta resulta relevante a medida que aumenta la velocidad de giro ω, masa del álabe M y distancia desde el eje de giro al centro de masa de este (r), como se observa en la ecuación (10.54).

$$F_c = M\,\omega^2\,r \tag{10.54}$$

A partir del modelado de un álabe de fibra de vidrio reforzada con poliéster ($FVRP$), de espesor $3\,mm$, en computadora, se obtiene la distancia $r = 0,72\,m$ y la masa $M = 0,55\,kg$. De esta manera, se determina un valor de $F_c = 4213\,N$ para velocidad de giro nominal.

Una vez obtenido este dato, se procede a verificar los distintos componentes del álabe, comenzando por la misma fibra de vidrio. Esta se modela a tracción, y se toma el área de la sección más cercana al centro de giro a partir del modelo en computadora. Se elije esta sección como crítica debido a que debe soportar la fuerza centrífuga que genera la totalidad e la masa del álabe. A continuación se muestra la resistencia a la tracción $S_{y,\,FVRP}$ (tomada de [45]), el área A_{alabe} de la sección y el factor de seguridad $F_{S,\,FVRP}$ que se obtiene a partir de plantear el esfuerzo axial.

$$S_{y,\,FVRP} = 3,3\,GPa \tag{10.55}$$
$$A_{alabe} = 765\,mm^2 \tag{10.56}$$
$$F_{S,\,FVRP} = 599 \tag{10.57}$$

Luego, se procede a realizar el análisis de esfuerzos sobre la resina epoxi, la cual fue tratada en la sección 10.12.1. Se destaca que las dimensiones determinadas allí son de $3\,cm$ de espesor y $2\,cm$ de ancho (dado por las dimensiones del alma de acero). Para la sujeción por fuerza centrífuga, se propone utilizar chapas con espesor d a determinar, de $3\,cm$ de largo (abarcando todo el espesor de la resina) y $2\,cm$ de ancho. Estas irían soldadas al alma de acero que se sujeta al cubo del rotor. En la figura 10.21 se puede observar la geometría descrita.

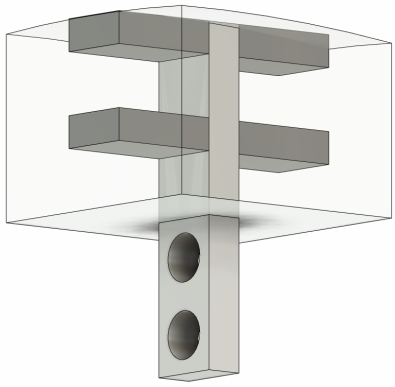


Figura 10.21: Vista de las chapas junto al alma de los álabes y la resina

Dichas chapas, se colocarían a ambos lados del alma del álabe. Lo que corresponde es determinar el número de pares de chapas k a colocar, de manera que se soporten los esfuerzos que genera la fuerza centrífuga en la unión resina-metal.

Se procede a modelar cada sección de resina (delimitada por las chapas) como una viga en voladizo sometida a una carga distribuida q, con P como carga equivalente colocada en la mitad del largo total (a $1,5\,cm$ del alma). Este análisis es similar al descrito en la sección 10.12.1. Por lo tanto, se procede a listar las fórmulas utilizadas, su dependencia de los parámetros geométricos y cantidad de pares de chapas.

$$
\begin{aligned}
\tau &= \frac{P\,Q}{I\,t} \\
\sigma &= \frac{P\,\frac{h}{2}\,y}{I} \\
Q &= \bar{y}\,A \\
I &= \frac{t\,e^3}{12} \\
\bar{y} &= \frac{1}{2}\,y + \frac{e}{4} \\
A &= t\left(\frac{e}{2} - y\right) \\
P &= \frac{F_c}{2\,k} \\
t &= 2,0\,cm \\
h &= 3,0\,cm \\
e &= \frac{5,0\,cm}{k} - d
\end{aligned}
$$

A su vez, realiza el modelado de viga en voladizo con la misma carga distribuida, para las chapas de acero de espesor d desconocido.

Utilizando el criterio de diseño por Tresca (10.47), e imponiendo que el factor de seguridad N sea mayor a 3 para ambos materiales, se obtiene $k = 2$ y $d = 8,5\,mm$ con $N_{cahapa} = 3,05$ y $N_{resina} = 4,02$. De esta manera, la sujeción queda dimensionada para fuerza centrífuga.

10.13. Sujeción de álabes

Uno de los aspectos a tratar es la forma de sujeción al eje del motor y como trasmitir el giro al rotor. Se consideran varias opciones para esta parte, las cuales no son dimensionadas.

En primer lugar, se piensa en el diseño en el uso de una platina cuyo esquema se muestra en la figura 10.22. Las dimensiones son tomadas considerando un agarre a la pala con 2 tornillos posicionados radialmente.

El fin de esta estructura es simplemente trasmitir el giro, por lo que se desea que su inercia no genere un esfuerzo significativo para el motor en los períodos de aceleración y desaceleración. Por otra parte, se busca que la estructura sea firme y no se vea afectada por los modos de vibración.

La forma de la estructura es consecuencia de que se desea generar una pieza con simetría respecto al eje de rotación, que pueda sujetar la nariz a la misma pieza. Esta última, que se asume como un cascarón esférico con 8 lugares de sujeción, se muestra en la figura 10.24.

El motor debe cubrirse con la nariz, como se menciona en la sección 8.2.3, debe tener 1 metro de diámetro.

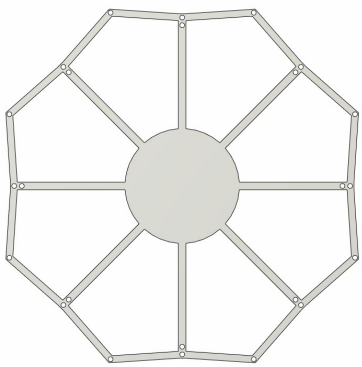


Figura 10.22: Esquema de platina de acoplamiento al eje

Una de las soluciones planteadas consiste en la estructura que se muestra en la figura 10.24. Esta debe ser realizada de tal forma de reducir al mínimo su peso, sin comprometer la rigidez necesaria para evitar efectos de resonancia. La sujeción de las palas se piensa en los extremos radiales, mientras que la nariz se sujeta en los extremos triangulares.

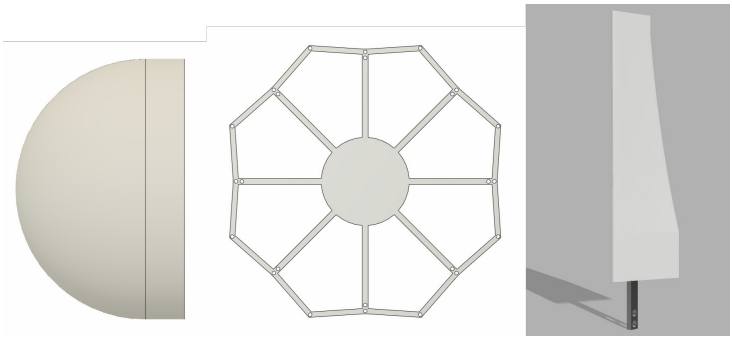


Figura 10.23: Croquis esquemático

En particular, deben verificarse los modos de vibración para esta estructura. En caso de ser excesivas, debe ser reforzada. La contrapartida de esta estructura es el peso aplicado al motor y la dificultad de manipularla a la hora de ensamblaje.

Consecuentemente, se piensa un una estructura más robusta ante vibraciones. Esta se muestra en la figura 10.25, formada de un bloque de madera, con 8 chapas radiales incrustadas para poder sujetar los álabes.

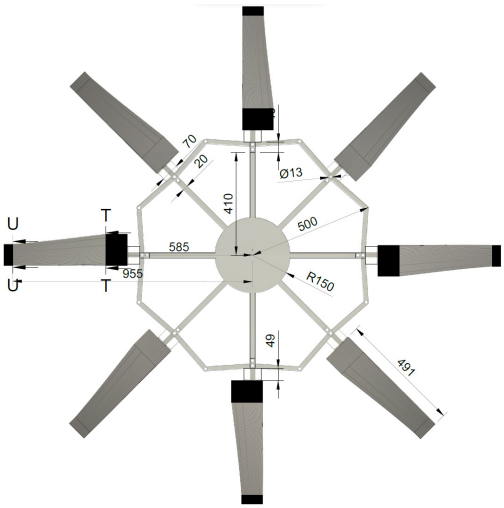


Figura 10.24: Croquis esquemático

Figura 10.25: Cubo de madera

10.14. Consideraciones sobre el análisis de fatiga

En este caso no se realiza un análisis de fatiga de la estructura, ya que se consideran mucho menores las cargas alternantes frente a las cargas medias.

Sin embargo, se plantea para la continuación del trabajo, realizar este análisis en los componentes que podrían verse más afectados por el fenómeno. Estos serían el eje del rotor, debido a al peso del rotor (se debe determinar previamente la geometría final del cubo) y la base de las palas, producto de fluctuaciones en la presión.

10.15. Análisis de emisiones acústicas

Las emisiones acústicas están presentes en cualquier proceso mecánico, ya que al interaccionar con el medio, las ondas de presión producidas por el propio fun-

cionamiento de la máquina y son un componente por el cual se disipa energía. En particular, al involucrar el movimiento de fluidos, surgen fuentes de emisión propias de este fenómeno y no simplemente de la máquina que genera el movimiento.

Existen riesgos de salud al tratarse de niveles de ruido altos, por ello es importante considerar este aspecto desde la etapa de diseño. Existen diferentes formas de mitigar el fenómeno que abarcan desde el evitar ciertas geometrías para el pasaje de fluidos o la propia limitación a un determinado rango de funcionamiento (por ejemplo la velocidad).

Debido a que principalmente en un ambiente de taller, la contaminación sonora a evitar es la que afecta a los operarios, el rango de frecuencia auditiva del ser humano es un factor a tener en cuenta para comparar la relevancia de diferentes fuentes de ruido. Para ello existen parámetros y diferentes escalas que hacen posible esta comparación, donde algunas de ellas toman en consideración la ponderación por la frecuencia. Los datos a utilizar de aquí en adelante fueron extraídos de las notas del curso de Máquinas para Fluidos II, [39].

En primer lugar corresponde mostrar las escalas utilizadas para evaluar emisiones acústicas. La unidad utilizada es el decibelio (dB) y es una escala logarítmica. Al momento de considerar la frecuencia propia de un ruido, se pondera de manera diferente considerando en qué parte del espectro de audición se encuentra esa frecuencia. Esta última es la escala dB_A.

A continuación se muestra un cuadro donde se detalla la relación entre ambas escalas y la frecuencia, ver figura 10.26

Frequency (*Hz*)	*A weighting* (*dB*)
10	−70.4
12.5	−63.4
16	−56.7
20	−50.5
25	−44.7
31.5	−39.4
40	−34.6
50	−30.2
63	−26.2
80	−22.5
100	−19.1
125	−16.1
160	−13.4
200	−10.9
250	−8.6
315	−6.6
400	−4.8
500	−3.2
630	−1.9
800	−0.8
1,000	0
1,250	+0.6
1,600	+1.0
2,000	+1.2
2,500	+1.3
3,150	+1.2
4,000	+1.0
5,000	+0.5

Figura 10.26: Tabla de conversión de dB a dB_A

Los parámetros que se calculan para cuantificar el sonido son la potencia acústica y la presión acústica. La primera se corresponde con el valor intrínseco del ruido generado por instrumento y el segundo toma en cuenta la posición con respecto al instrumento. Se muestran las fórmulas para su cálculo y la relación entre estos:

Potencia acústica L_w, (10.58) presión acústica L_p, (10.59)

$$L_w = 10\, log(\frac{W}{W_o}) \tag{10.58}$$

$$L_p = 20\, log(\frac{P}{P_{ref}}) \tag{10.59}$$

Relación de L_p con L_w, donde S (en m^2) es la superficie que envuelve la fuente de emisión y pasa por el lugar donde se quiere determinar la presión acústica.

$$L_p = L_w + 10\, log(S) \tag{10.60}$$

Suponiendo que se tiene más de una fuente de emisión, los valores deben ser sumados utilizando (10.61):

$$L_{pT} = 10\, log\left(\sum 10^{\frac{L_{pi}}{10}}\right) \tag{10.61}$$

Además, existen valores de frecuencia fundamentales dependiendo del fenómeno. Esta queda determinada por su geometría. A continuación se detalla el de un ventilador axial.

Frecuencia fundamental del rotor (10.62) y frecuencia fundamental del motor (10.63).

$$f(Hz) = \frac{N\ Z}{60} \tag{10.62}$$

$$f(Hz) = \frac{N}{60} \tag{10.63}$$

En particular, como se estima que el uso del túnel de viento sería por períodos de tiempo prolongados, es sabido que el ruido no puede superar los $85\, dB_A$ para evitar daños a la salud. De todas formas se recomienda el uso de instrumentos de seguridad, como son los protectores auditivos.

10.15.1. Emisiones de motor y ventilador

Las emisiones acústicas más importantes del túnel de viento son las impuestas por el motor eléctrico y por la interacción hidráulica entre los alabes del rotor y el seno del fluido.

Para lograr estimar estas emisiones, se disponen de las ecuaciones (10.64) y (10.65) para obtener la potencia acústica en cada caso. Donde K_w y K_m son las potencias especificas del ventilador y motor respectivamente.

$$L_w = K_w + 10\,log(Q[cfm]) + 20\,log(\Delta P_s[inH_2o]) \tag{10.64}$$
$$L_w = K_m + 15\,log(N[rpm]) + 20\,log(P[HP]) \tag{10.65}$$

La tabla 10.30 contiene los datos del motor y ventilador, incluyendo el valor de la frecuencia fundamental en cada caso.

Para el caso del motor eléctrico, ya se cuenta con datos del fabricante respecto a sus emisiones. Este valor es de $L_p = 64\ dB_A$, medido en un recinto abierto, a una distancia de $1\,m$ del emisor (semiesfera de radio $1\,m$). Por lo tanto, en el caso del motor $L_w = 129\,dB$. De todas formas se colocan los datos que se usarían para su aproximación en la siguiente tabla antes mencionada.

Tabla 10.30: Tabla de valores de motor y ventilador

	K_w	$Q\ (cfm)$	$\Delta P_s\ (inH_2O)$	f
$Ventilador$	50	121,4×10^3	2,91	131
	K_m	$N\ (rpm)$	$P\ (HP)$	f
$Motor$	~ 13	985	60	16

Sabiendo que estos elemento se encuentran en el interior de un ducto, las emisiones se propagaran mayoritariamente desde los extremos abiertos del túnel. Al modelar de esta forma la propagación sonora, se desprecian efectos de transición acústica por las paredes de MDF y acero del túnel. El área total de salida del ducto es de $S = 8,35\ m^2$. Empleando (10.60) se obtienen los valores de presión acústica detallados en la tabla 10.31, dichos valores están expresados en dB_A tomando en cuenta la frecuencia fundamental en cada caso. Para el motor eléctrico, se debe obtener primero la potencia acústica sabiendo la distancia de medición, dada por el fabricante.

Tabla 10.31: Emisiones acústicas resultantes

	$L_w\ (d_B)$	$L_p\ (d_B)$	$L_p\ (dB_A)$	$Correccion\ (dB_A)$
$Ventilador$	110	100,8	85,0	-15,8
$Motor$	129	119,8	63,1	-56,7

Finalmente, mediante el uso de (10.61), se calcula la emisión total percibida en un los extremos del túnel de viento. Como resultado de obtiene $L_{pT} = 85,0\ dB_A$. Este valor cumple los requisitos preestablecidos para un ambiente de trabajo con personal presente por períodos prolongados.

10.15.2. Emisión de vórtices en los soportes del motor

El efecto de emisión de vórtices por la presencia de obstáculos en el pasaje del flujo puede acarrear con problemas de emisiones acústicas. En este diseño,

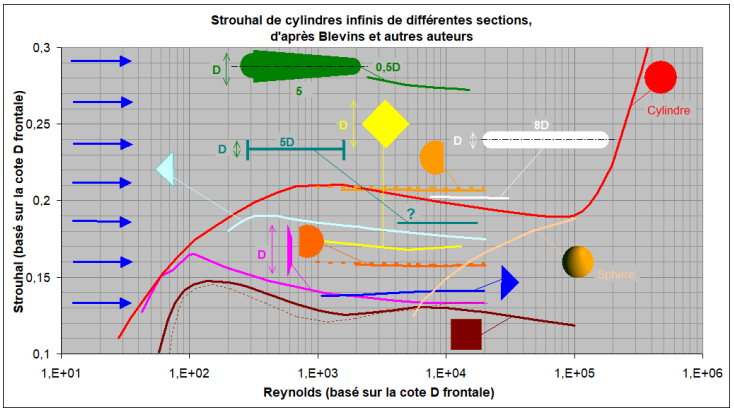


Figura 10.27: Variación del número de Strouhal con Re

el diámetro de los soportes del motor y la velocidad del flujo pueden desprender vórtices con emisiones acústicas no despreciables y las cuales deben ser evitadas.

Para estimar las emisiones acústicas, se modela el desprendimiento de vórtices mediante el uso del número de Strouhal $S_t = \frac{f\,D}{V}$, donde f es la frecuencia de emisión de vórtices, D es el diámetro del cilindro y V es la velocidad del flujo. Dicho número sigue una relación con el número de Reynolds vista en la figura 10.27.

Por otro lado, cada vórtice individual se puede modelar como un vórtice de Rankine 2.3.3. El diámetro del vórtice es aproximadamente la mitad del diámetro del cilindro y la diferencia de presiones con el flujo medio, está impuesta por (10.66)

$$P_\infty - P_{centro} = \rho(\pi\, f\, D_v)^2 \tag{10.66}$$

Finalmente, se obtiene el valor de emisiones acústicas en dB a partir de la diferencia de presiones y frecuencias de emisión de vórtices, mediante (10.67).

$$L_p = 10\, log_{10}\left(\frac{P}{P_o}\right)^2 \tag{10.67}$$

Dichos resultados se detallan en la tabla 10.32, donde se efectuaron los cálculos a la velocidad nominal del túnel de viento de $40,4\,m/s$ en la sección de trabajo, resultando en $19,5\,m/s$ en la sección del motor. Para el cálculo de L_p se consideran las 8 barras emitiendo vórtices y además se busca reducir el valor hasta condiciones razonables para un ambiente industrial.

Como comentario adicional, se destaca que el valor presentado es la presión acústica junto a las barras. Por lo tanto, los operarios estarían expuestos a menores dB_A.

Tabla 10.32: Emisiones acústicas para cada diámetro de cilindro con $v = 19,5\,m/s$

D [mm]	Re	St	f [Hz]	ΔP [Pa]	L_p [dB]	L_p [dB_A]
5	6550	0,19	752	41,822	135	134
15	19650	0,19	251	41,822	135	127
30	39299	0,19	125	41,822	135	119
50	65498	0,19	75	41,822	135	111
75	98248	0,19	50	41,822	135	105
100	130997	0,19	38	41,822	135	99

A partir de estos valores, se decide dimensionar los soportes del motor por este criterio (como se menciona al final de la sección 10.9). Se considera que un diámetro de $10\,cm$ y espesor $1\,cm$ resultan en dimensiones coherentes geométricamente y para los materiales disponibles en plaza. Además, se logra reducir las emisiones acústicas a valores de un ambiente industrial para donde estarían posicionados los operarios (aproximando por una reducción de $10\,dB_A$ como se observa en la tabla 10.31).

10.16. Análisis de vibraciones

Las vibraciones estructurales suelen ser un aspecto importante a tomar en cuenta cuando se trabaja en el diseño de turbomáquinas o instalaciones hidráulicas. Esto se debe a que cada componente mecánico se comporta de manera distinta frente a las perturbaciones o esfuerzos periódicos, pudiendo resultar en una eventual falla total. Es por ello, que un análisis previo de este aspecto es recomendable en la etapa de diseño.

En este caso se identifican 5 componentes que podrían presentar fallas si no se consideran las frecuencias de resonancia del sistema. Estos se enumeran a continuación.

- Barras de soporte del motor
- Carcasa del ventilador
- Eje del rotor
- Tablas de la zona de trabajo
- Placas de policarbonato

El problema que se presenta es que si la frecuencia de esfuerzos presentes, o fenómenos propios de la instalación, se acerca a la frecuencia natural de los componentes (y sus primeros modos) el elemento entraría en resonancia, amplificando los esfuerzos y pudiendo llegar a la falla. Consecuentemente, resulta necesario conocer cuáles pueden ser las frecuencias presentes en el sistema, para identificar si algún componente podría encontrarse cerca de la situación antes descrita, y así modificar el diseño para evitarlo. Las frecuencias identificadas son las siguientes:

- $f_{vent} = \frac{N[rpm]\,Z}{60} = 131\,Hz$
- $f_{vort.\,barras} = \frac{St\,u}{D} = 38\,Hz$
- $f_{vib.\,mot.} = \frac{N[rpm]}{60} = 16\,Hz$

Donde f_{vent} es la frecuencia de paso de los álabes, $f_{vort.\,barras}$ es la frecuencia de emisión de vórtices en las barras de soporte del motor a velocidad nominal, y $f_{vib.\,mot.}$ es la frecuencia de giro del motor.

10.16.1. Barras de soporte del motor

Con el objetivo de modelar la estructura compleja de manera sencilla, se opta por idealizarla como un conjunto de resortes. La constante elástica de cada uno de los resortes, está determinada dependiendo de cuál es el tipo de deformación que genera el esfuerzo sobre cada barra. Es decir, dependiendo de la situación, cada barra puede ser representada por una de las dos constantes de elasticidad:

- $K_{flexion} = \frac{3\,E\,I}{L^3}$
- $K_{axial} = \frac{E\,A}{L}$

Donde E representa el módulo de Young, I la inercia de la sección de mayor desplazamiento, A el área de la sección de mayor desplazamiento y L el largo de la barra.

Según la disposición de las barras planteada en la sección 10.9 se puede deducir cual sería la constante elástica equivalente del sistema para cada caso. Dado que en el dimensionamiento de las barras se opta por respetar el mismo diámetro en todas ellas, si se descompone los esfuerzos en 3 ejes perpendiculares i, j, k (donde k es colineal al flujo) y se identifica a las barras más largas con el subíndice 1 y las más cortas con el subíndice 2, se puede ver que:

$$K_{eq} = \sum K_i = 4\,(K_{1_n} + K_{2_n}) \quad , n = i, j, k \tag{10.68}$$

Según el eje que se esté considerando, se puede modelar al sistema con los casos 1 o 6 presentes en [46] (págs. 48-49) donde la frecuencia natural del sistema es la siguiente:

$$f_i = \frac{1}{2\,\pi}\left(\frac{K_{eq}}{M}\right)^{0,5} \tag{10.69}$$

Siendo M el peso del motor.

Al observar los resultados para los diámetros propuestos por dimensionamiento de esfuerzos, se observa que las frecuencias obtenidas de desprendimiento de vórtices es cercana a los valores de resonancia. Por lo tanto, se opta por cambiar las barras por tubos igual área transversal, y así poder incrementar la inercia de la estructura, aumentando la frecuencia donde se alcanza la resonancia (mencionada al final de la sección 10.15.2). A su vez, al aumentar el diámetro de los caños, la

frecuencia de desprendimiento de vórtices se vuelve menor, lo cual contribuye a mitigar el problema.

Sin embargo, luego de analizar los resultados para caños de dimensiones disponibles en plaza, se identifica que la frecuencia natural del sistema para cargas en el sentido del flujo se encuentra no muy por encima de la frecuencia de pasaje de palas (131 Hz), ver tabla 10.33.

Tabla 10.33: Frecuencias de resonancia calculadas

$f_{lateral}$ $[Hz]$	646,3
$f_{vertical}$ $[Hz]$	579,4
$f_{longitudinal}$ $[Hz]$	185,3

Si bien la frecuencia de resonancia es mayor que la frecuencia de pasaje de palas, se opta por aumentar la rigidez del sistema en esta dirección mediante la incorporación de crucetas. Estas pueden construirse con varillas finas de acero soldado a los soportes, como se muestra en la figura 10.28. En la tabla 10.34 se muestran las dimensiones finales de la estructura y los datos empleados para el dimensionamiento por vibraciones.

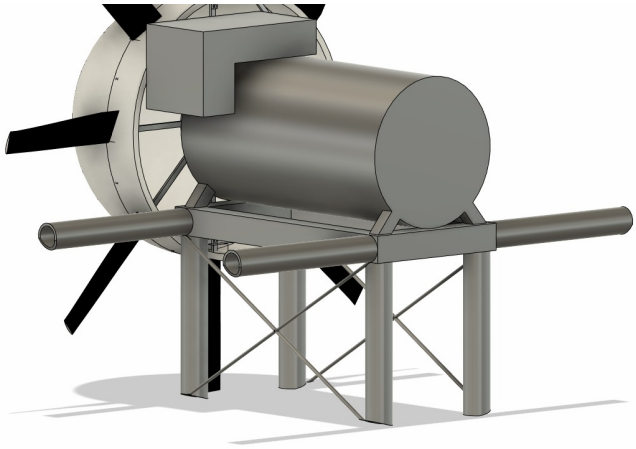


Figura 10.28: Crucetas longitudinales para aumentar la rigidez del sistema

10.16.2. Carcasa del ventilador

La siguiente estructura a analizar presenta complejidad por su geometría, la cual se decide modelar por el caso más próximo hallado en [46] (págs. 303-307). Dada las características de la carcasa considerada, se analiza el caso de Torsión, Axial y Radial-Axial. A continuación se presentan las fórmulas para torsión.

Tabla 10.34: Dimensiones finales de la estructura de soporte del motor

$E\ [GPa]$	200	$M\ [kg]$	612
$e_1\ [mm]$	10	$e_2\ [mm]$	10
$D_1\ [m]$	0,1	$D_2\ [m]$	0,1
$I_1\ [mm^4]$	2898119	$I_2\ [mm^4]$	2898119
$L_1\ [m]$	0,30	$L_2\ [m]$	0,23
$A_1\ [mm^2]$	2827,4	$A_2\ [mm^2]$	2827,4
$k_{11}\ [N/m \times 10^{-6}]$	64	$k_{21}\ [N/m \times 10^{-6}]$	2457
$k_{12}\ [N/m \times 10^{-6}]$	1885	$k_{22}\ [N/m \times 10^{-6}]$	143
$k_{13}\ [N/m \times 10^{-6}]$	64	$k_{23}\ [N/m \times 10^{-6}]$	143

$$
\begin{aligned}
f_{ij} &= \frac{\lambda_{ij}}{2\,\pi\,R}\left(\frac{E}{\rho\,(1\,-\,\nu^2)}\right)^{0,5} \\
\lambda_{ij} &= \frac{\left(1\,-\,\nu^2\right)^{0,5}}{2^{0,5}}\,\frac{j\,\pi\,R}{L}\quad ,\, i\,=\,0
\end{aligned}
$$

Para el análisis de Axial se identifica que se trata de un caso de L del orden de R por lo que se referencia a la sección de análisis de vibración en una viga libre por ambos extremos ([46] pág.183). Se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$
\begin{aligned}
L &= 1,65\,m \\
R &= 1\,m \\
f_i &= \frac{\lambda_i}{2\,\pi\,L}\left(\frac{E}{\rho}\right)^{0,5} \\
\lambda_i &= i\,\pi
\end{aligned}
$$

Finalmente, para esfuerzos Radial-Axial se tiene la teoría de Flügge donde:

$$
\begin{aligned}
\lambda^2 &= \frac{1}{2}\left(\left(1\,+\,\zeta^2\,+\,k\,\zeta^4\right)\,\mp\left[\left(1\,-\,\zeta^2\right)^2\,+\,4\,\nu^2\,\zeta^2\,-\,2\,k\,\zeta^6\right]^{0,5}\right) \\
k &= \frac{h^2}{12\,R^2} \\
\zeta &= \frac{j\,\pi\,R}{L}\quad ,\, j\,=\,1,2,...
\end{aligned}
$$

Resumiendo los valores obtenidos para cada uno de los tipos de esfuerzo en la tabla 10.35, se puede observar que la mínima frecuencia de resonancia se da para torsión en 1030 Hz. Por lo tanto, se asegura que la carcasa no entra en resonancia con las frecuencias de excitación detalladas anteriormente.

Tabla 10.35: Resultados obtenidos del cálculo de la frecuencia de resonancia de la carcasa

Torsión	i	0
	j	1
	λ_{ij}	1,24
	f_{ij} [Hz]	1030,1
Axial	i	1
	λ_i	3,14
	f_i [Hz]	1661,0
Radial-Axial	i	0
	j	1
	$k \times 10^{-6}$	80,1
	ζ	2,09
	λ_{ij}	2,12
	f_{ij} [Hz]	1763,4

10.16.3. Eje del rotor

Para hacer este análisis es necesario conocer la inercia del rotor, la cual depende de la elección del cubo. Debido a que no se cuenta con el diseño definitivo del cubo, se decide establecer los valores de inercia que debe verificar el rotor para permitir un funcionamiento sin entrar en resonancia. A partir de [46] (caso 13), se decide modelar el acople como dos inercias J_1 y J_2, unidas por un resorte de torsión de constante elástica k (10.70). En el modelo, J_1 es la inercia del eje, y k es la constante elástica equivalente del eje sometido a torsión.

$$f = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{k\,(J_1 + J_2)}{J_1\,J_2}\right]^{1/2} \tag{10.70}$$

Las dimensiones del eje del motor, así como las propiedades necesarias para efectuar el cálculo, se detallan en la tabla 10.36.

Tabla 10.36: Datos del eje del motor

$L\ [mm]$	125
$D\ [mm]$	75
$J_1\ [kg\ m^2]\ \times 10^3$	3,13
$I_p\ [m^4]\ \times 10^6$	3,11
$G\ [GPa]$	130
$k\ [rad/Nm]\ \times 10^{-6}$	3.23

Donde k es calculado a partir de (10.71).

$$\theta = \frac{TL}{I_p G} = \frac{T}{k} \tag{10.71}$$

Despejando J_2 de la ecuación (10.70), se obtiene la expresión 10.72. Para los valores del problema, J_2 es positivo para frecuencias $f \geq 5113Hz$ por lo que en principio, no existe impedimento para la inercia del rotor en términos de vibraciones.

$$J_2 = \frac{J_1 k}{J_1(2\pi f)^2 - k} \tag{10.72}$$

10.16.4. Tablas y ventanas en la sección de trabajo

Se procede a calcular la frecuencia de resonancia para las tablas de la sección de trabajo y las ventanas de policarbonato. A partir de [46] (págs. 252-263), se calcula la resonancia con la ecuación (10.73), donde λ_{ij} es la frecuencia de resonancia adimensionada obtenida a partir de tablas para una placa rectangular con los cuatro bordes simplemente apoyados.

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2}\left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)}\right]^{1/2} \tag{10.73}$$

Donde E y ν son el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson del material, h es el espesor de la tabla, a es una de las dimensiones laterales y γ es la masa por unidad de área de la placa de finida como $\gamma = \rho\, h$, con ρ la densidad del material.

Las frecuencias de resonancia halladas, se muestran en la tabla 10.37 para las tablas de MDF y ventanas de policarbonato. Se verifica que todas las tablas no entran en resonancia.

Tabla 10.37: Frecuencias de resonancia para tablas y ventanas de la sección de trabajo

Material	a×b $[m^2]$	λ_{11}	f_{11} $[Hz]$
Tablas de MDF	1×2	12,50	283
	1,4×2	14,81	203
Policarbonato	0,8×1.8	11,90	338
	1,2×1.8	14,26	216

10.17. Modificaciones sugeridas del diseño

Dadas las pequeñas dimensiones del túnel de viento comparado con el existente, lo hace más versátil respecto a modificaciones en su estructura y al trabajo con el sistema de adquisición. Algunas de las sugerencias detalladas en esta sección pueden mejorar sustancialmente la practicidad del diseño presentado.

10.17.1. Modificaciones estructurales

El peso del túnel de viento diferenciado por elemento es detallado en la tabla 10.38, donde se incluye el peso de los soportes correspondientes. Como puede

apreciarse, a excepción del acondicionador de flujo, la contracción y la carcasa, los demás elementos son de peso reducido. Esta característica hace posible el dimensionamiento de ruedas para trasladar las secciones, permitiendo realizar mantenimientos o modificaciones de sus elementos. En particular, la sección de trabajo podría ser remplazada por otra de diferente geometría en caso de que el estudio a realizar así lo requiera.

Tabla 10.38: Peso del túnel de viento diferenciado por elemento

Elemento	Peso [kg]
Honeycomb	894
Mallas: Sección 0	178
Mallas: Sección 1	64
Mallas: Sección 2	178
Contracción	602
Sección de trabajo	200
Pieza de transición	206
Carcasa	2194
Difusor	298

Como se comenta en la sección 10.2.3, se debe emplear un elastómero entre las uniones, pero debido al uso de ruedas para transportar los elementos, es necesario el uso de *clamps* para mantener la presión necesaria y evitar infiltraciones. Además, de esta manera se logra posicionar correctamente un componente respecto del otro, nivelándolos.

Es necesario implementar puertas para acceder a la sección de trabajo, así como una forma de ver en su interior durante los ensayos. Un material convencional empleado en túneles de viento son planchas de policarbonato. Estas son transparentes y flexibles, lo que las hace más seguras que el vidrio. En este caso puede implementarse una única puerta de apertura vertical, como esquematizado en la figura 10.29.

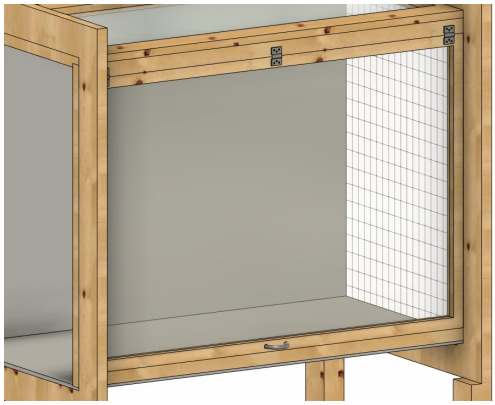


Figura 10.29: Puerta vertical para la sección de trabajo

10.17.2. Incorporación del sistema de adquisición

La incorporación de la herramienta de adquisición como elemento permanente en el túnel de viento, es posible al agregar algunas modificaciones externas al diseño. Estas modificaciones se plantean de tal forma que no interfieran con las condiciones de diseño de calibración de anemómetros y ensayos de perfiles aerodinámicos.

La adquisición requiere la instalación de un plano láser y una cámara en planos perpendiculares. Esto es posible al implementar una segunda ventana de policarbonato en el techo de la sección de trabajo. De esta forma se puede disponer de la cámara en un trípode fuera del túnel, y el plano láser desde el techo, como se muestra en la figura 10.30. A su vez, es recomendable pintar las paredes de madera de un color con baja reflectividad de luz visible, en especial en longitudes de onda de 532 nm. Puede ser empleada una pintura negro mate para mayor contraste con el color de trazador. Esta configuración es ampliamente utilizada [15], sería una buena práctica hacer una verificación que los efectos de difracción son despreciables para la adquisición de imágenes.

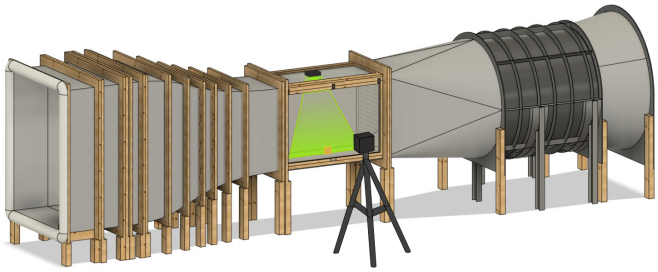


Figura 10.30: Disposición del sistema de adquisición en el túnel diseñado

Como soporte del láser, pueden adquirirse rieles motorizados como los empleados para los equipos de PIV comerciales.

Por último, en caso de ser de interés poder adquirir imágenes a mayores velocidades de flujo, es recomendable la compra de un plano láser de mayor potencia y diseñar una máquina de humo que permita inyectar mayores caudales de trazador.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 11

Conclusiones del proyecto

En este capítulo se resume los resultados obtenidos para los diseños logrados, detallando los aspectos más importantes y sus limitantes. Incluyendo sugerencias respecto a: la instalación del sistema de adquisición en el túnel de viento diseñado, la compra de equipos que pueden mejorar sustancialmente la experiencia de visualización, así como elementos adicionales para la operación del túnel de viento. Por último, se realizan comentarios generales sobre la gestión de proyecto y la opinión del equipo acerca de la experiencia adquirida a lo largo del mismo.

11.1. Herramienta de visualización

La herramienta desarrollada aporta una funcionalidad complementaria a los ensayos de visualización realizados actualmente en el laboratorio de Eolodinámica. Brinda la posibilidad de procesar automáticamente las filmaciones de flujos estacionarios, esencialmente bidimensionales, haciendo uso del procedimiento de adquisición generado con el fin de mejorar los resultados obtenidos en el procesamiento de imágenes. Su función principal es el dibujo de las líneas de flujo, estas resaltan los patrones principales del movimiento y evita el análisis exhaustivo de las filmaciones por parte de los investigadores. De forma secundaria, se incorpora el software `vortexfitting` desarrollado para detectar vórtices desplazándose en un campo de velocidades. Ambas herramientas se basan en el procesamiento de un campo de velocidades instantáneo, calculado a partir de las filmaciones mediante un algoritmo de flujo óptico, ver figura 11.1.

El procedimiento de adquisición planteado es mucho más exhaustivo que el realizado anteriormente de forma manual, lo cual es requisito necesario para obtener imágenes de buena calidad. Sin embargo, presenta limitaciones frente a flujos con velocidades elevadas, donde se vuelve necesario aumentar el valor de FPS o reducir la relación de distancias R (pixel/metros).

Se proponen tres regiones de calidad de adquisición en función de estas variables en la sección 3.3.6. Si bien, matemáticamente es posible encontrar combinaciones de estas tres variables en las cuales la adquisición entra en la región de buena calidad, se encuentran limitantes externas como la potencia lumínica disponible, caudal

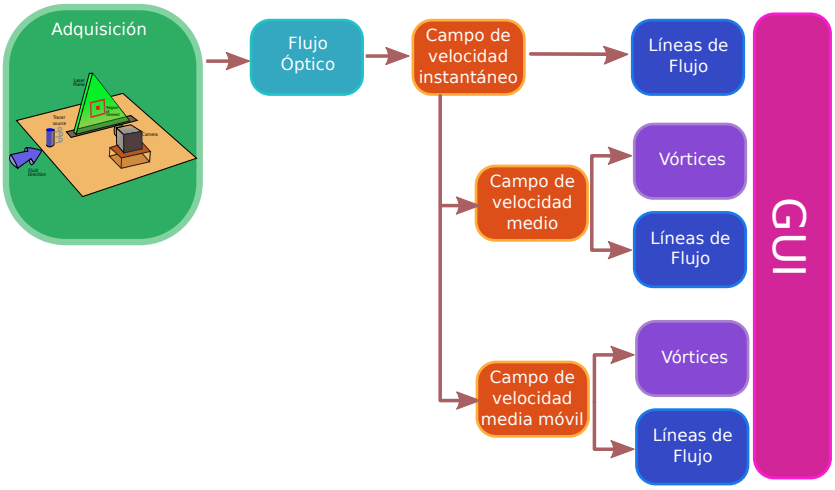


Figura 11.1: Diagrama de bloque de herramienta de visualización.

máximo de trazador y memoria máxima de la cámara. Estas limitantes influyen en la visibilidad del trazador en el video, y el tiempo máximo de adquisición. Un aspecto a mejorar es la gráfica de guía de calidad de imagen. Por un lado, es necesario considerar más casos al momento de generar los límites de calidad, y por otro, se debe analizar si es posible determinar con mayor exactitud los límites de la adquisición.

Para mejorar la adquisición a altas velocidades, es necesario estudiar el sistema de adquisición, el cual parece estar limitado principalmente por la iluminación. Otro aspecto a mejorar es el lente que se utiliza. El mismo tiene una distancia focal mínima de 1 m, por lo que se recomienda comprar un lente con distancia focal menor a un metro, y en caso de ser posible, que el mismo sea de enfoque automático para evitar la etapa de ajuste focal.

Por el lado del campo de velocidades, la validación realizada se divide en dos partes. La primera consiste en comparar un perfil de velocidad, procesado de una filmación de una capa límite, con una medición experimental a mayor velocidad. El análisis es realizado mediante la teoría de similitud con números adimensionados, obteniéndose una correlación lineal de 0,98. La segunda validación, se realiza comparando el procesamiento de un flujo libre con la medición de un tubo pitot en otra sección. Las validaciones aseguran una proporcionalidad entre nuestros datos y los valores medidos, por lo tanto, la herramienta capta el comportamiento físico del flujo en los estudios realizados.

Debido a que no es un instrumento primario de medición de velocidades, es necesario realizar una calibración, empleando un flujo con velocidades conocidas, y lograr evaluar cuantitativamente la incertidumbre de la herramienta. Para poder asegurar condiciones de repetibilidad, es necesario caracterizar otras variables como: concentración y dispersión de trazador en la filmación, y parámetros del algoritmo de flujo óptico. En este trabajo no se la realiza, porque el laboratorio cuenta únicamente con anemómetros calibrados para velocidades más altas que las admisibles para la herramienta. Por lo tanto, una posibilidad es calibrar

anemómetros a bajas velocidades para posteriormente realizar la calibración de la herramienta. Otra opción es dimensionar un banco de calibraciones a escala reducida empleando instrumentos primarios de medición como tubos pitot, placas orificios o toberas.

El objetivo principal de la herramienta es lograr describir los patrones del flujo, el mismo es logrado satisfactoriamente mediante el dibujo de las líneas de flujo. La verificación de esta funcionalidad se realiza a partir del estudio de los videos por un usuario calificado, este detecta visualmente los patrones del flujo al igual que en los experimentos de visualización convencionales. Para evaluar la funcionalidad, es necesario observar las líneas de flujo, reconocer sus patrones y compararlos con los obtenidos a partir del análisis visual de los videos. Aunque, si la calidad de imagen baja, interfiere en el campo de velocidad y por ende también en las líneas de flujo.

Mediante el uso de la herramienta `vortexfitting`, se detectan vórtices en una situación conocida. Sin embargo, la herramienta no es versátil, detectando con correlación cercana a $0,9$ únicamente a vórtices circulares. Uno de los principales aspectos mejorar, es habilitar el uso de un paso no unitario en la discretización del campo de velocidades. Luego, otra posibilidad es agregar un ajuste por medio de un vórtice elíptico. Otra alternativa para mejorar la detección de vórtices, es utilizar las líneas de flujo y por medio de ellas detectar los vórtices.

El usuario cuenta con dos formas de procesar la herramienta. Por un lado, un programa principal que ejecuta la configuración deseada desde un archivo JSON. Por otro lado, mediante la interfaz gráfica desarrollada en Napari, en la cual se disponen de botones guiados intuitivamente para ejecutar las funciones requeridas. La mayoría de las funciones del programa principal están implementadas para configurar en la interfaz. Además, el usuario puede desarrollar su propio código utilizando las clases desarrolladas y poder analizar los resultados intermedios o datos numéricos obtenidos por la herramienta.

11.2. Túnel de viento

El diseño de túnel de viento obtenido se basa en el cumplimiento de las condiciones de funcionamiento requeridas. Las cuales son la calibración de anemómetros de cazoletas y ensayo de perfiles aerodinámicos. El primer requisito consiste en seguir las condiciones establecidas por la norma IEC 61400-12-1 [25]. Esta indica características en la sección de trabajo, como una obstrucción menor al $5\,\%$ dada por la presencia del anemómetro, niveles de turbulencia menores al $2\,\%$, y la no-uniformidad de la velocidad menor al $0,2\,\%$. Cada uno de estos requisitos se satisfacen al emplear: una sección de trabajo mayor a $1 \times 1\ m^2$, la incorporación de mallas para reducir el nivel de turbulencia y el correcto dimensionamiento de la contracción, tal que no se produzca el fenómeno de desprendimiento de la capa límite. Por otro lado, las condiciones para los ensayos de perfiles aerodinámicos son: bloqueos menores al $5\,\%$ en la sección de ensayo del perfil aerodinámico, y maximizar el número de Reynolds alcanzado a velocidad nominal del túnel de viento, donde se fija $Re = 10^6$ como un valor deseable.

El diseño se realiza a medida para un motor de 60 HP, adquirido previamente por el instituto. Al finalizar, se obtienen las dimensiones de la sección de trabajo, una contracción de geometría polinomial de tercer orden, una pieza de transición y un difusor. Las dimensiones generales se detallan en la tabla 11.1.

Tabla 11.1: Resumen de elementos aerodinámicos

Resumen de elementos aerodinámicos

Contracción	Relación de contracción	3
	Largo $[m]$	2,88
Sección de trabajo	Área de pasaje $[m^2]$	1×1,4
	Largo $[m]$	2
Pieza de transición	Relación de difusión	2,24
	Largo $[m]$	2
Difusor	Relación de difusión	1,35
	Largo $[m]$	0,92

Las pérdidas de carga obtenidas para la geometría aerodinámica es de $k = 0,750$, sobre la cual se diseña un rotor a medida con rendimiento estimado de $\eta =$ 0,90 en régimen nominal. Sin embargo, el rendimiento real depende de la precisión con la que se construyan las palas o en el caso de adquirir un rotor de serie, del punto de funcionamiento en el cual opera. Estos son aspectos no menores al momento de construir el túnel de viento, dado que la reducción de rendimiento en el rotor conlleva a una reducción en la velocidad máxima alcanzable en la sección de trabajo. Los valores nominales calculados para el túnel de viento diseñado, se presentan en la tabla 11.2.

Tabla 11.2: Valores nominales estimados

Valores nominales

Potencia mecánica $[HP]$	60
Velocidad de giro nominal [RPM]	985
Carga $[m]$	62,5
Caudal $[m^3/s]$	56,5
Velocidad $[m/s]$	40,4
Rendimiento rotor [%]	90
Pérdidas de carga	0,750
No-uniformidad [%]	0,2
Intensidad de turbulencia [%]	1,3
Largo total $[m]$	11,61
Límite de personas	2 (150kg)

Luego de realizada la construcción del túnel de viento, la tabla 11.2 debe ser actualizada a partir de la medición de las distintas magnitudes de carga, caudal y potencia a velocidad de giro nominal. Para la velocidad nominal estimada de

$40,4\ m/s$, es posible alcanzar valores de $Re = 10^6$ en un ensayo de perfiles aerodinámicos de largo de cuerda $l_c = 0,37\ m$, para los cuales se cumple la condición de obstrucción menor al 5 % para un ángulo de ataque de 20°.

Respecto a los materiales, se diseña la estructura en tablones de MDF y pino amarillo, dada la versatilidad de hacer modificaciones a la estructura durante ensayos. Es posible utilizar madera de pino amarillo en regiones que requieren mayor resistencia mecánica, mientras que la carcasa se diseña de acero estructural debido al peso del motor y rotor. Respecto a los costos de construcción, se estima $U\$S$ 2,200 en madera, $U\$S$ 1,700 en acero y $U\$S$ 1,640 en otros materiales. Por otra parte, respecto a mano de obra de carpintería y herrería, no se cuenta con una cotización de carpintero o herrero; sin embargo, el trabajo en acero puede realizarse en el taller de facultad. Como estimación de la mano de obra, se opta por suponer que un monto similar al de los materiales involucrados, ascendiendo a $U\$S$ 3900. Finalmente, el costo de construcción de túnel de viento es estimado en $U\$S$ 12,300, para el cual se considera un margen de seguridad del 30 %.

Por último, en la sección 10.17, se sugieren modificaciones al diseño planteado de túnel de viento, donde es posible incorporar el sistema de adquisición como una herramienta fija y sin interferir en el funcionamiento para el cual se diseña originalmente.

11.3. Comentarios generales sobre gestión de proyecto

Evaluando el proyecto, consideramos que muchas de las planificaciones de tiempo no fueron acertadas, dado que no tomamos en consideración la curva de aprendizaje necesaria para llevar a cabo ciertas tareas. Como por ejemplo, la adquisición de imágenes y conceptos de turbulencia tanto para el dimensionamiento del túnel de viento, como para la herramienta de adquisición.

Nuestra mayor falta en la planificación, fue durante la entrega del hito 2, asumimos que nos faltaba un 30 % del diseño del túnel, pero luego, durante la redacción surgió la necesidad de diseñar nuevos elementos relevantes, los cuales requirieron mucha dedicación.

Por otro lado, consideramos, que la falta de experiencia realizando ensayos de visualización provocó que se destinara mucho tiempo en la adquisición, en especial en la preparación de experimentos. Llegando a requerir de 263 horas totales y adquiriendo un total de 702 Gb de video.

El equipo considera que el alcance planteado fue muy ambicioso, producto a no ser consciente de lo que comprende realizar una herramienta de visualización. A partir de la experiencia adquirida, reflexionamos que el alcance tendría que abarcar únicamente a la herramienta de visualización con un enfoque más mecánica de los fluidos en los procesamientos y generación de experimentos.

En total se dedicaron 2722 horas de trabajo por los integrantes del equipo, las cuales se divide en categorías según la figura 11.2), mientras que se estima 151 horas de tutores durante reuniones (sin contar horas de corrección del documento). Por lo que se estima un costo por horas de proyecto de $U\$S$ 8689, desglosado en la tabla 11.3.

Tabla 11.3: Desglose de costos por horas de trabajo

Concepto	Horas	$[U\$S/hs]$	Costo $[U\$S]$
Horas Gr1	1500	4,68	7020
Horas Gr3	49	9,73	477
Horas Gr5	102	11,68	1192

Figura 11.2: Distribución horaria del proyecto.

Finalmente, el costo total del proyecto asciende a $U\$S = 20989$ con la construcción del túnel de viento, para el cálculo de costos no se consideran equipos disponibles en el laboratorio como la cámara de alta velocidad, motor de inducción y variador de frecuencia.

Apéndice A

Estudio Capa Límite

A.1. Capa límite con túnel a 30 Hz

El experimento consiste en relevar el perfil de velocidades vertical(u), desarrollado sobre el final de la sección de trabajo, donde se mide puntualmente para distintas alturas(y) con anemómetros de hilo caliente. Fijando la velocidad del túnel a $U_\infty = 16,8\ m/s$, esta medida se realiza con un tubo pitot, dispuesto por encima de la capa límite. Cada punto relevado es adquirido durante un tiempo suficiente, de tal forma, que el promedio temporal de los datos elimine todas las fluctuaciones turbulentas. De esta forma, se puede relevar el perfil medio de velocidades.

A.1.1. Obtención de altura de capa límite

Para obtener la altura de la capa límite, se hace uso de un diagrama, extraído del libro Boundary Layer Theory, de Schlichting (ver figura A.1), con el cual se ingresa con la relación de velocidades u/U_∞ y se obtiene la relación y/δ aproximada. Utilizando dicha gráfica, se realiza la estimación empleando el último valor de la capa límite relevada, correspondiente a una velocidad de $u = 13,432 m/s$, obtenida para una altura $y = 700mm$. El resultado obtenido es una relación $y/\delta = 0{,}28$, resultando en una altura de capa límite estimada de $2500mm$.

A.1.2. Perfil de velocidades adimensionado

A los efectos de comparar las mediciones experimentales, con las mediciones realizadas con la herramienta de visualización, es necesario realizar un cambio de variables en los perfiles de velocidad. Este cambio de variable consiste en adimensionalizar las magnitudes de altura, dividiendo por la altura de la capa límite, y la velocidad del flujo, dividiendo por la velocidad U_∞.

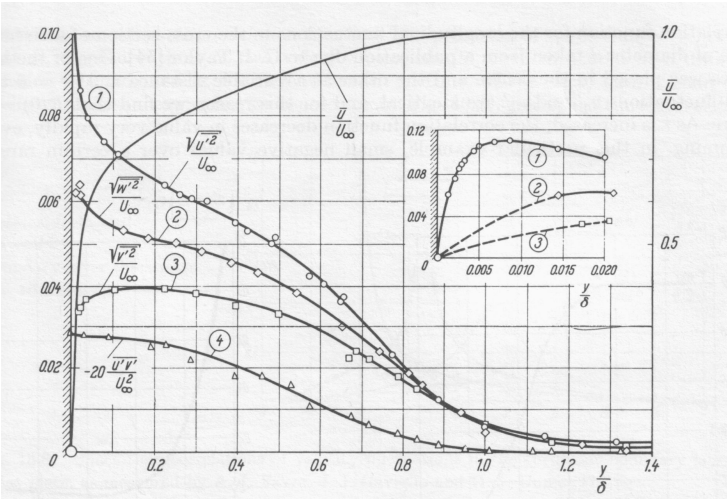


Figura A.1: Relación teórica de una capa límite adimensionada

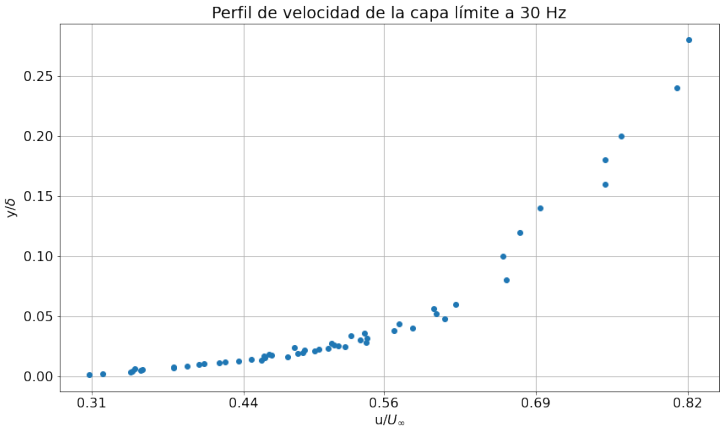


Figura A.2: Capa límite adimensionada a 30 Hz.

A.2. Capa límite con túnel a 4 Hz

La herramienta de visualización presenta la limitante de poder procesar únicamente flujos a bajas velocidades. Por lo tanto, se adquiere una capa límite en el mismo lugar que la medición con anemómetros, pero a una velocidad $U_\infty = = 1{,}97 m/s$. La diferencia en las velocidades, se debe a que los anemómetros disponibles no cuentan con una calibración a velocidades tan bajas, por lo que este tipo de análisis es lo más cercano a una validación cuantitativa. Para estimar la altura de la capa límite, se utilizan los resultados de U_∞ y δ del caso anterior y se emplea una relación estimada: $\frac{\delta_2}{\delta_1} = \left(\frac{U_{\infty 1}}{U_{\infty 2}}\right)^{1/5}$ El valor estimado de la altura de la capa límite es de $\delta = 3840\, mm$

A.2.1. Extracción de perfil de velocidades a partir del campo de velocidades

Al procesar `OpenPIV` o el método de flujo óptico, se obtiene un campo de velocidades. Para comparar con los resultados anteriores es necesario seleccionar un perfil de velocidad, en este caso, se selecciona el perfil resultante de promediar todos los perfiles medios para los valores de x. A continuación se explica la elección del mismo en el caso de `OpenPIV`, pero el razonamiento es análogo para el flujo óptico.

Como se observa en la figura 4.9, la medición de velocidades ocurre a los 14,7 m del inicio de la sección de trabajo, y el ROI tomado presenta un largo de 17,5 cm en la dirección longitudinal. La expresión (A.1), relaciona la altura de la capa límite al inicio y final del ROI.

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} \sim \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{1/5} \tag{A.1}$$

Los valores δ_1 y δ_2 son las alturas de la capa límite al inicio y final, y x_i es la distancia medida desde el inicio de la zona de trabajo. Se tiene que $x_1 = 14{,}7\ m$ y $x_2 = 14{,}875\ m$, obteniendo una variación de la altura de la capa límite menor al 0,24 %. Dado que esta determina el perfil de velocidades, se asume que los perfiles son uniformes a lo largo de la dirección x en el ROI. Partiendo de dicha hipótesis, se realiza un promedio espacial para cada valor de y, y se presenta la desviación estándar (ver figura 4.14).

A.2.2. Resultados

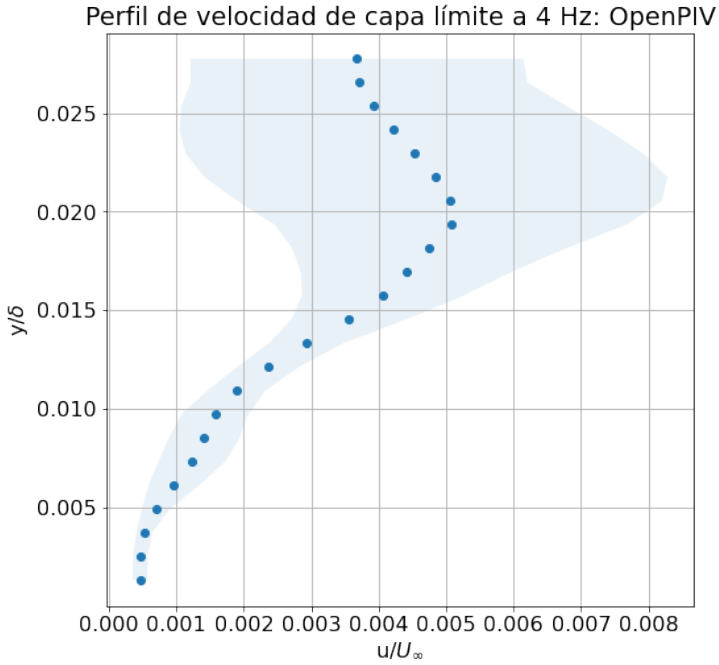


Figura A.3: Capa límite adimensionada a 4 Hz usando `OpenPIV`.

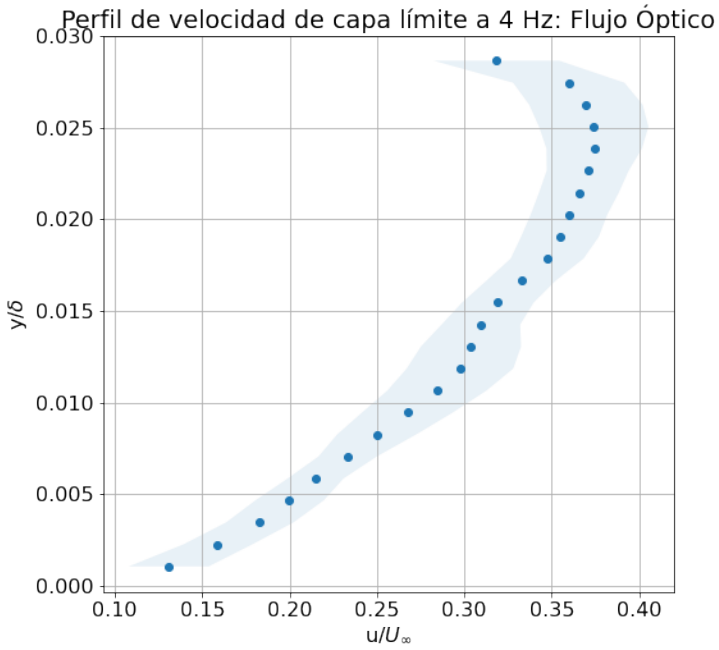


Figura A.4: Capa límite adimensionada a 4 Hz usando flujo óptico.

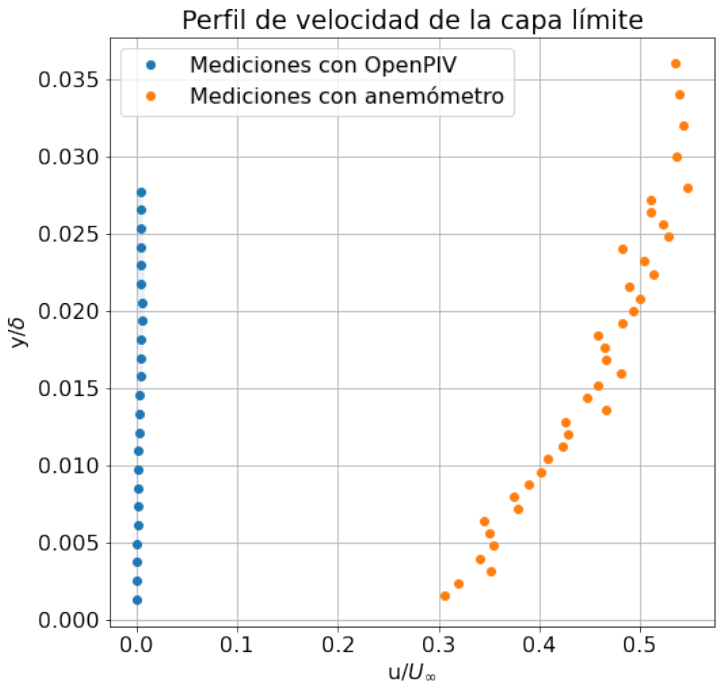


Figura A.5: Comparación capa límite adimensionada a 4 Hz y 30 Hz usando `OpenPIV`.

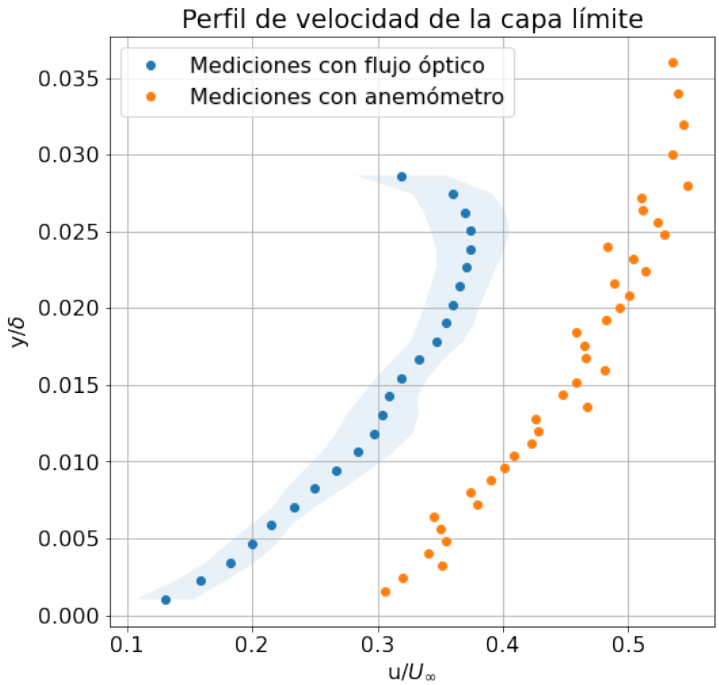


Figura A.6: Comparación de capa límite adimensionada a 4 Hz y 30 Hz usando flujo óptico.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

Materiales

B.1. Materiales con los que cuenta el IMFIA

B.1.1. Motor eléctrico

Modelo W22 - IE1 - 50Hz - 400V [38]

$$
\begin{aligned}
P_m &= 45\,kW \\
T_n &= 44,5\,kgfm \\
T_b &= 2,3\,T_n \\
N &= 985\,rpm \\
\eta_e &= 0,922
\end{aligned}
$$

B.1.2. Variador de frecuencia

Modelo CFW-11 0088 T 4 [47]

- Power supply: $380 - 480\,V$
- Maximum motor: $45\,kW$
- Rated output current: $88\,Arms$

B.1.3. Honeycomb

El instituto cuenta con tubos de sección hexagonal guardados en el laboratorio de Eolodinámica, figura B.1.

Figura B.1: Honeycombs disponibles

Características:

- Lado: 15 mm
- Espesor: 1 mm
- Peso aproximado: $92,1$ g.

B.1.4. Balanza aerodinámica

En el laboratorio de eolodinámica del IMFIA, se cuenta con una balanza aerodinámica de la figura B.2. Este es empleada para medir el momento, y las fuerzas de Lift y Drag ejercidas sobre un cuerpo ensayado en el túnel de viento.

Figura B.2: Balanza aerodinámica

B.2. Materiales disponibles en plaza

B.2.1. Maderas de construcción

Pino Paraná: [48], densidad $\rho = 520\ kg_f/cm^2$. Propiedades estructurales, ver tabla B.1.

	$\sigma_{Rotura}\ (kg_f/cm^2)$	$E\ (kg_f/cm^2)$
$Flexión$	710	100400
$Compresión$	390	142000

Tabla B.1: Resumen de propiedades estructurales de la madera de pino Paraná

Eucalyptus Finger-Joint, consultado en la barraca Paraná presenta los siguientes precios:

$Espesor\ (mm)$	U$D
20	$126 + IVA$
30	$195.6 + IVA$
40	$265.6 + IVA$

Tabla B.2: Precios para las tablas de Eucalipto Finger-Joint

Resumen de propiedades estructurales de dicho material se encuentran en la Tabla B.3, obtenidas de [49].

$E\ (N/mm^2)$	$\sigma_{rotura}\ (N/mm^2)$	$\rho\ (kg/m^3)$
14.51	42.43	505

Tabla B.3: Propiedades mecánicas Eucalyptus Finger-Joint

En la tabla B.4, se detallan diferentes propiedades de pinos disponibles en el mercado local.

Pino	ρ (kg/m^3)	σ_c (kg_f/cm^2)	E_f (kg_f/cm^2)	σ_f (kg_f/cm^2)
Amarillo [50]	510	492	130000	975
Oregon [51]	540	525	128000	860
Elliotis [52]	510	300	75500	605

Tabla B.4: Propiedades de diferentes maderas de pinos

El precio de tablones de mdf de dimensiones $1,83\ m \times 2,60\ m \times 18\ mm$ se estima en $U\$S$ 69,4. Las propiedades estructurales se detallan en la tabla B.5

Tabla B.5: Propiedades estructurales de tablones de MDF [53]

ρ $[kg/m^3]$	E $[GPa]$	σ_{rotura} $[MPa]$	ν
800	3,59	35,85	0,25

B.2.2. Ventanas de Policarbonato

El precio de placas de policarbonato de dimensiones $2,1\ m \times 2,9\ m \times 3\ mm$ se estima en $U\$S$ 318. Las propiedades estructurales se detallan en la tabla B.6.

Tabla B.6: Propiedades estructurales de placas de policarbonato [54]

ρ $[kg/m^3]$	E $[GPa]$	σ_{rotura} $[MPa]$	ν
1200	2,38	93,07	0,36

B.2.3. Placas de acero

El precio de placas de policarbonato de dimensiones $1,25\ m \times 2,50\ m \times 3\ mm$ se estima en $U\$S$ 670. Las propiedades estructurales se detallan en la tabla B.7.

Tabla B.7: Propiedades estructurales de Placas de acero [41]

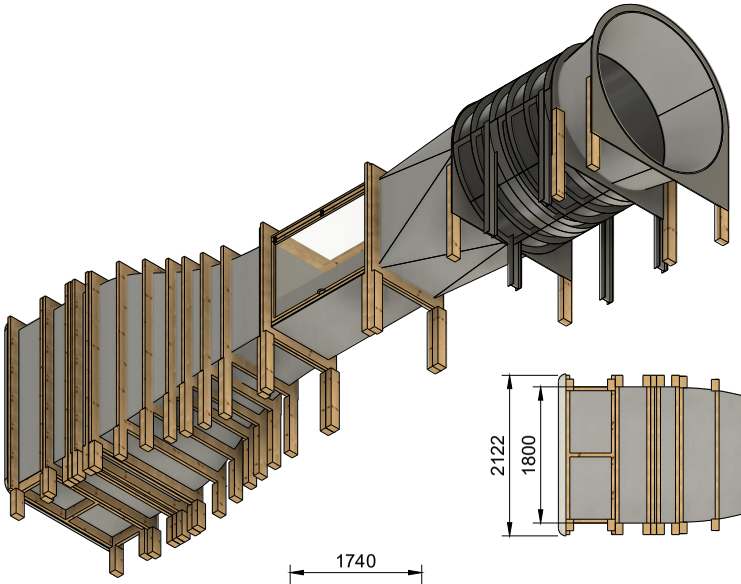
ρ $[kg/m^3]$	E $[GPa]$	σ_{rotura} $[MPa]$	ν
7830	200	250	0,3

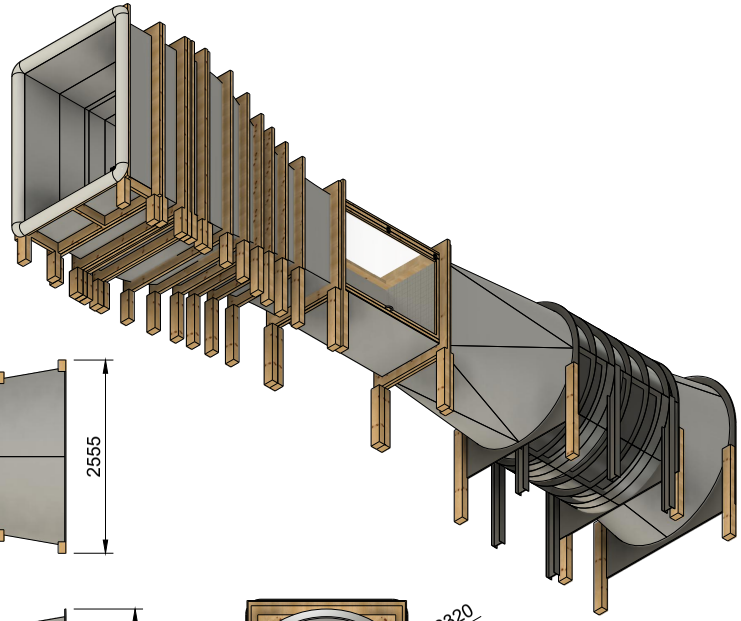
B.2.4. Mallas

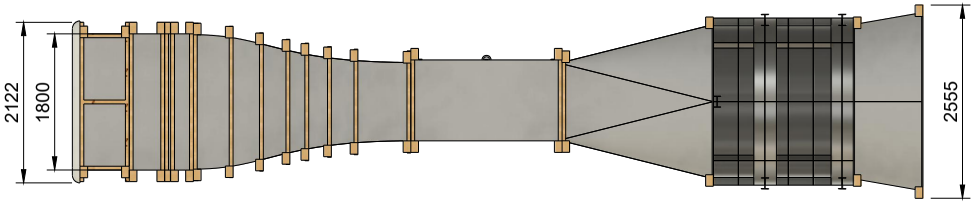
Mallas finas encontradas en el mercado, consisten en rollos de acero inoxidable de ancho 1 m por $U\$S$ 147 el m^2. Tamaño de malla desde 0,042 mm hasta $9,61\ mm$.

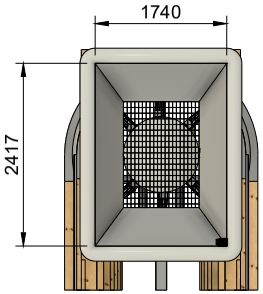
Apéndice C

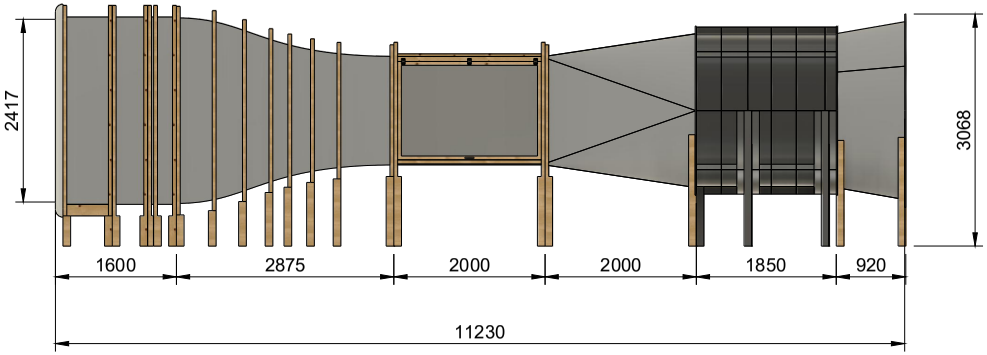
Planos

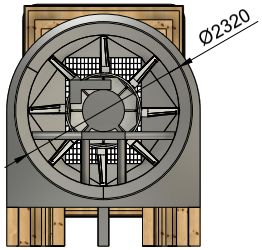


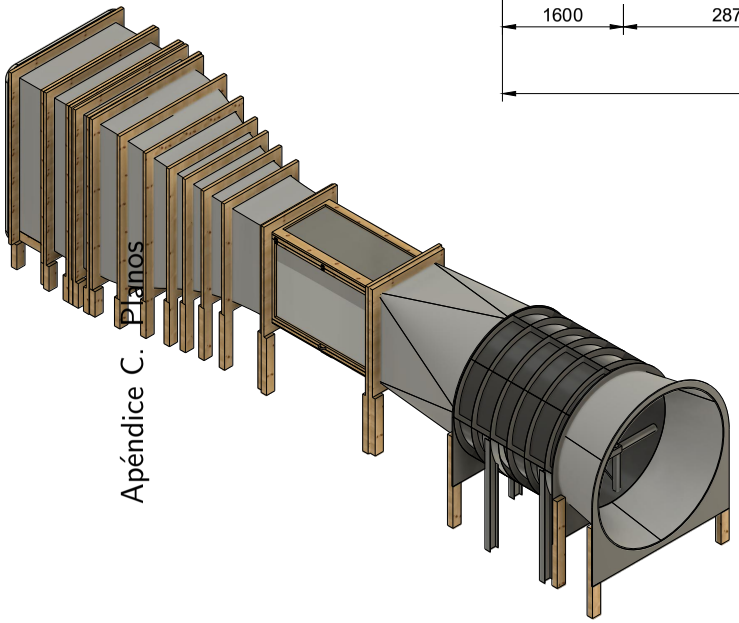


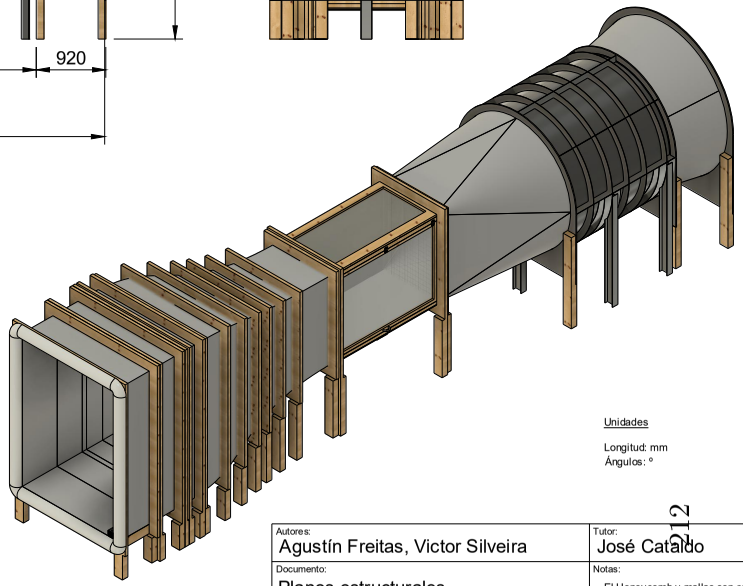










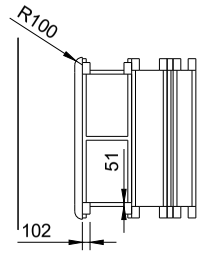


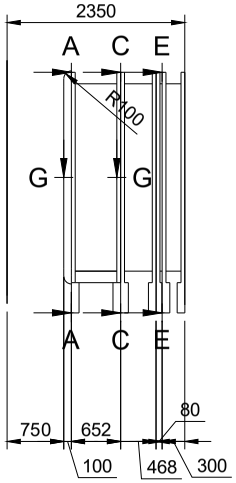
Apéndice C. Planos

Unidades

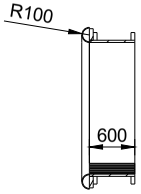
Longitud: mm
Ángulos: °

Autores: Agustín Freitas, Victor Silveira	Tutor: José Cataldo
Documento: Planos estructurales	Notas: El Honeycomb y mallas son representados parcialmente en la esquina inferior derecha. Se pueden apreciar en el detalle de planos de la zona de acondicionamiento.
Título: Túnel de viento Vista general	Fecha: 05/06/2022 — Hoja: 1/7

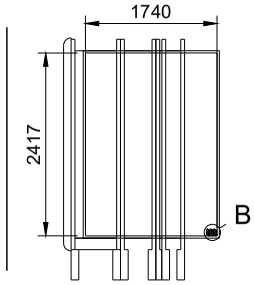




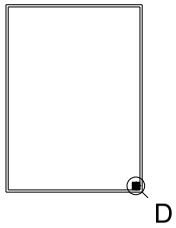
G-G (1:50)



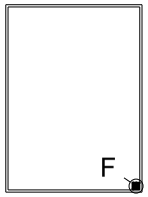
A-A (1:50)

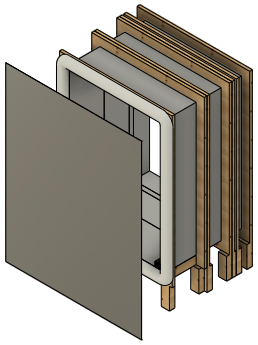


C-C (1:50)

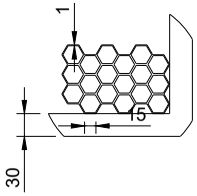


E-E (1:50)

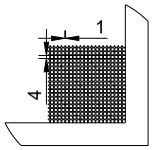




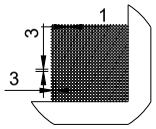
B (1:5)



D (1:5)



F (1:5)

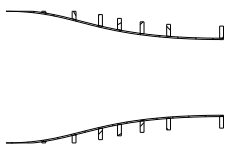


Unidades

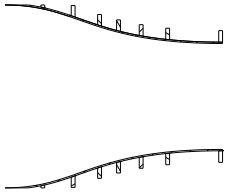
Longitud: mm
Ángulos: °

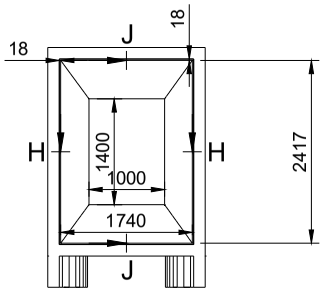
Autores: Agustín Freitas, Victor Silveira	Tutor: José Cataldo
Documento: Planos estructurales	Notas: El Honeycomb y mallas son representados parcialmente en la esquina inferior derecha.
Título: Túnel de viento Zona de acondicionamiento	Fecha: 05/06/2022 — Hoja: 2/7

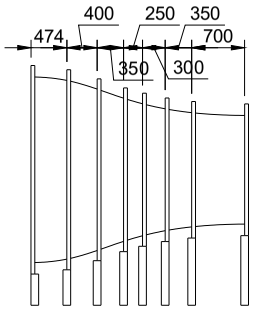
H-H (1:50)

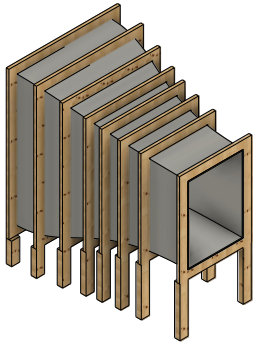


J-J (1:50)









Dimensiones de las tablas para una vista en planta (luego la tabla debe ser curvada).
La cordenada s es la longitud de la tabla previo al curvado.

s_1	g(s1)
0	1732
100	1732
200	1731
300	1730
400	1728
500	1723
600	1717
700	1708
800	1696
900	1682
1000	1665
1100	1644
1200	1621
1300	1594
1400	1566
1500	1535
1600	1502
1700	1467
1800	1431
1900	1393
2000	1354
2100	1315
2200	1274
2300	1233
2400	1194
2500	1156
2600	1121
2700	1089
2800	1061
2900	1039
3000	1022
3100	1011
3200	1004
3300	1001
3450	1000

s_2	g(s2)
0	2425
100	2425
200	2424
300	2422
400	2419
500	2412
600	2403
700	2391
800	2375
900	2354
1000	2328
1100	2298
1200	2262
1300	2221
1400	2176
1500	2126
1600	2072
1700	2013
1800	1951
1900	1886
2000	1818
2100	1748
2200	1679
2300	1617
2400	1561
2500	1513
2600	1474
2700	1444
2800	1423
2900	1410
3000	1403
3100	1400
3210	1400

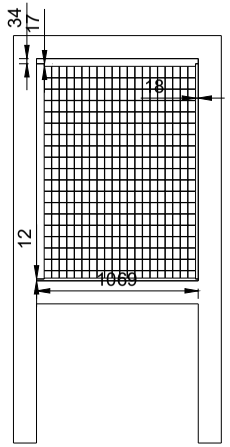
Dimensiones para las tabla montadas (ya habiendo sido curvadas).
La cordenada x es la longitud de la tabla luego del curvado.

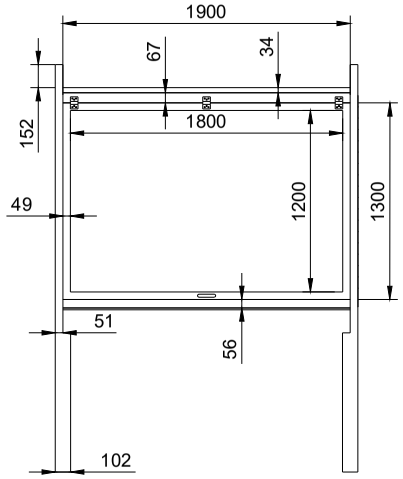
x	g(s1)	f(s2)
0	1732	2425
100	1732	2425
200	1731	2424
300	1730	2422
400	1728	2419
500	1723	2412
600	1717	2403
700	1708	2391
800	1696	2374
900	1680	2352
1000	1661	2325
1100	1637	2292
1200	1609	2253
1300	1576	2206
1400	1537	2152
1500	1492	2089
1600	1441	2017
1700	1383	1936
1800	1318	1845
1900	1245	1743
2000	1179	1650
2100	1125	1576
2200	1084	1518
2300	1053	1474
2400	1031	1443
2500	1016	1422
2600	1007	1409
2700	1002	1403
2800	1000	1400
2900	1000	1400

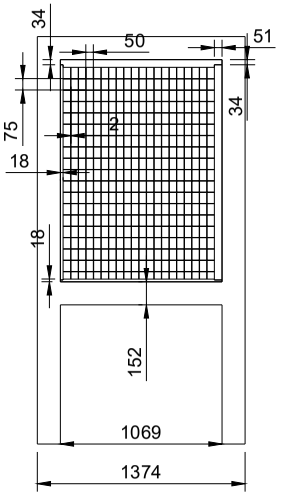
Unidades

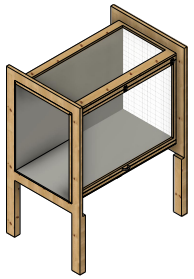
Longitud: mm
Ángulos: °

Autores: Agustín Freitas, Victor Silveira	Tutor: José Cataldo
Documento: Planos estructurales	Notas: La representación de la curvatura no es correcta, por lo que se hace referencia a las tablas por las dimensiones.
Título: Túnel de viento Contracción	Fecha: 05/06/2022 — Hoja: 3/7

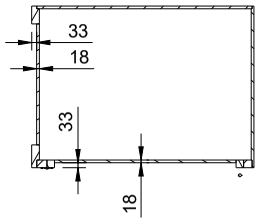


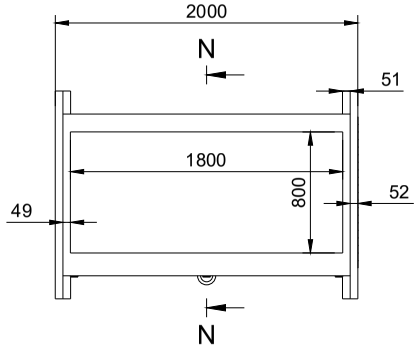






N-N (1:25)

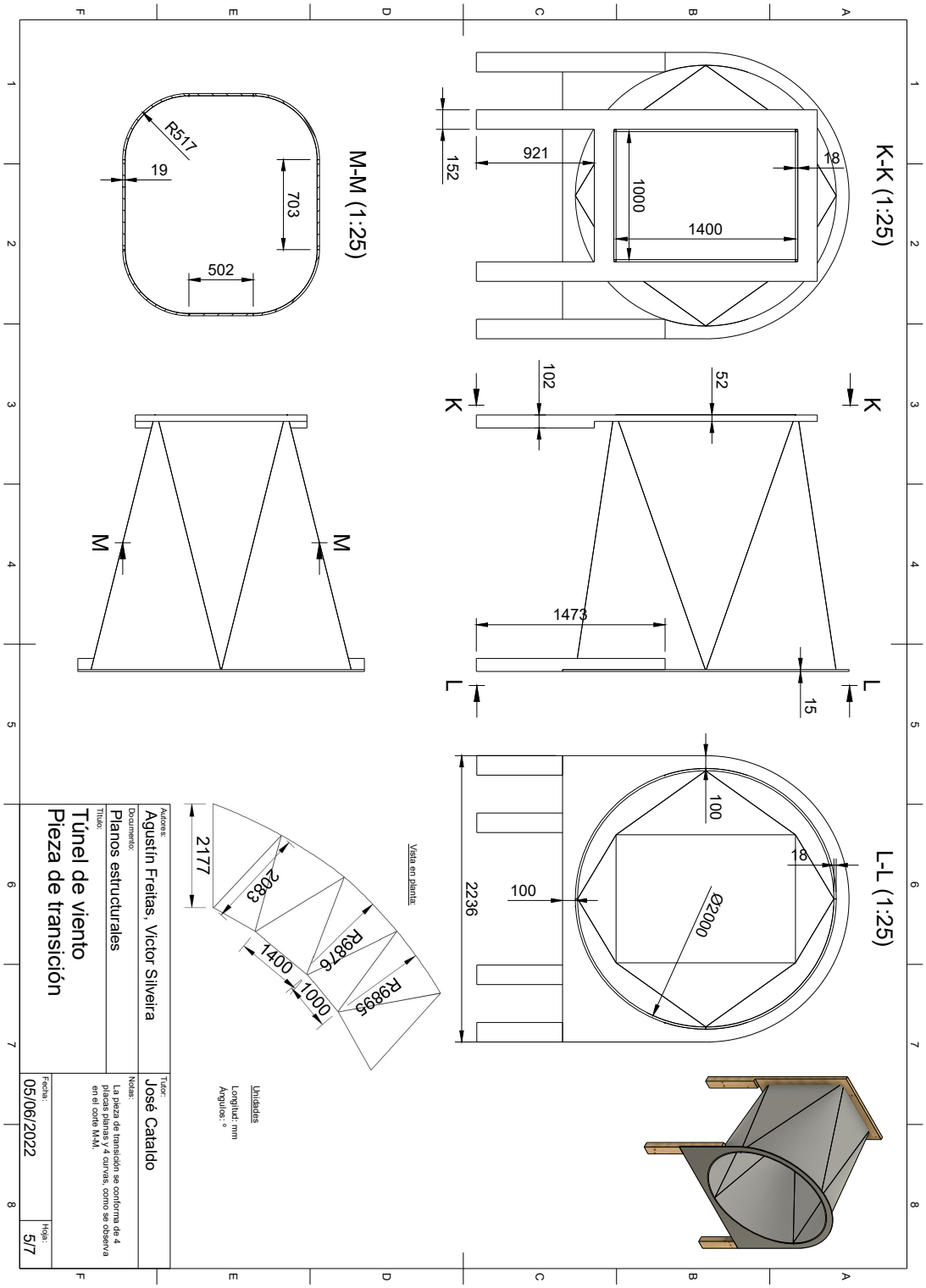




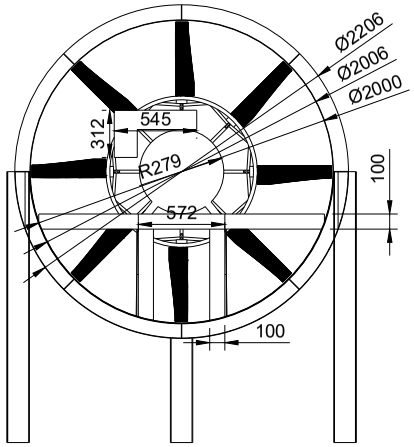
Unidades

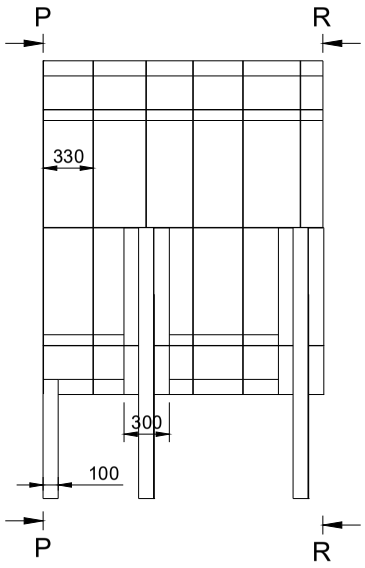
Longitud: mm
Ángulos: °

Autores: Agustín Freitas, Victor Silveira	Tutor: José Cataldo
Documento: Planos estructurales	Notas: Se representa la configuración en la que se utiliza dos placas de policarbonato sin un marco intermedio. Se adicionan bisagras para mostrar el concepto de apertura ideado.
Título: Túnel de viento Zona de trabajo	Fecha: 05/06/2022 — Hoja: 4/7

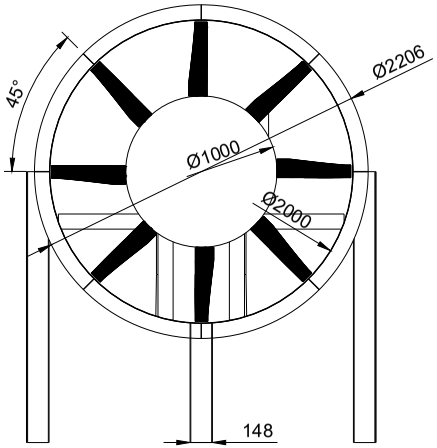

K-K (1:25)
L-L (1:25)
M-M (1:25)
921
152
18
1000
1400
102
52
1473
15
100
2236
Ø2000
R517
19
703
502
2177
2083
R9876
R9895
Vista en planta:
Unidades
Longitud: mm
Ángulos: °
Autores:
Agustín Freitas, Victor Silveira
Documento:
Planos estructurales
Título:
Túnel de viento
Pieza de transición
Tutor:
José Cataldo
Notas:
La pieza de transición se conforma de 4 placas planas y 4 curvas, como se observa en el corte M-M.
Fecha:
05/06/2022
Hoja:
5/7

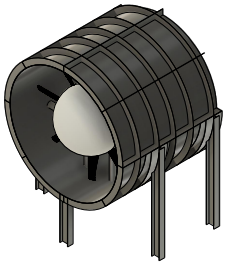
R-R (1:25)





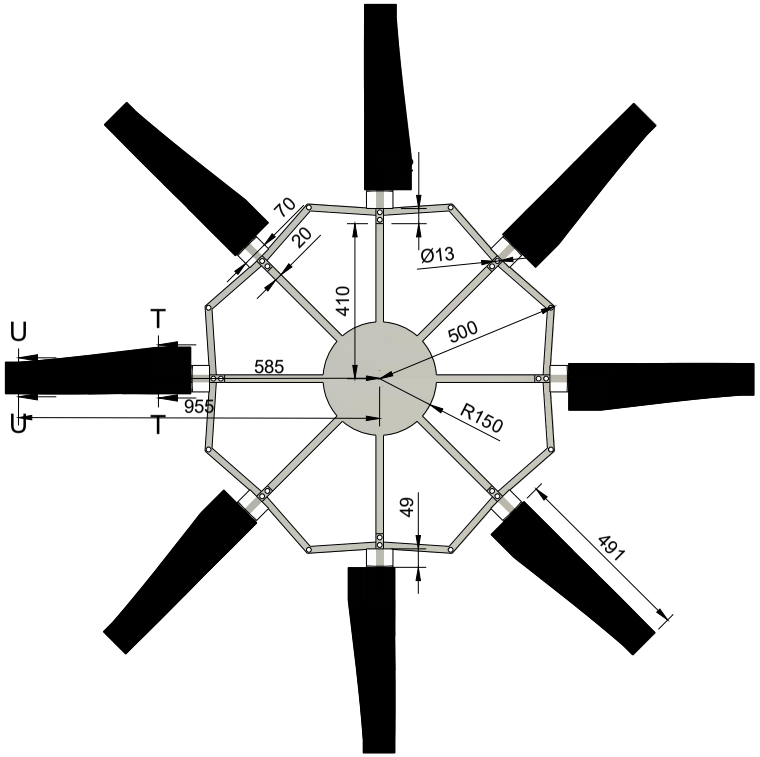
P-P (1:25)

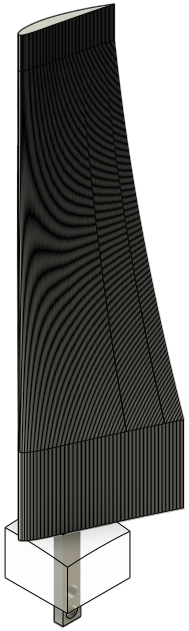


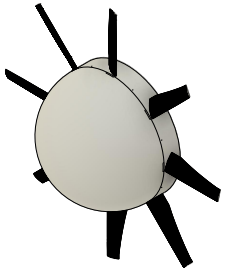


217

U-U (1:10) T-T (1:10)



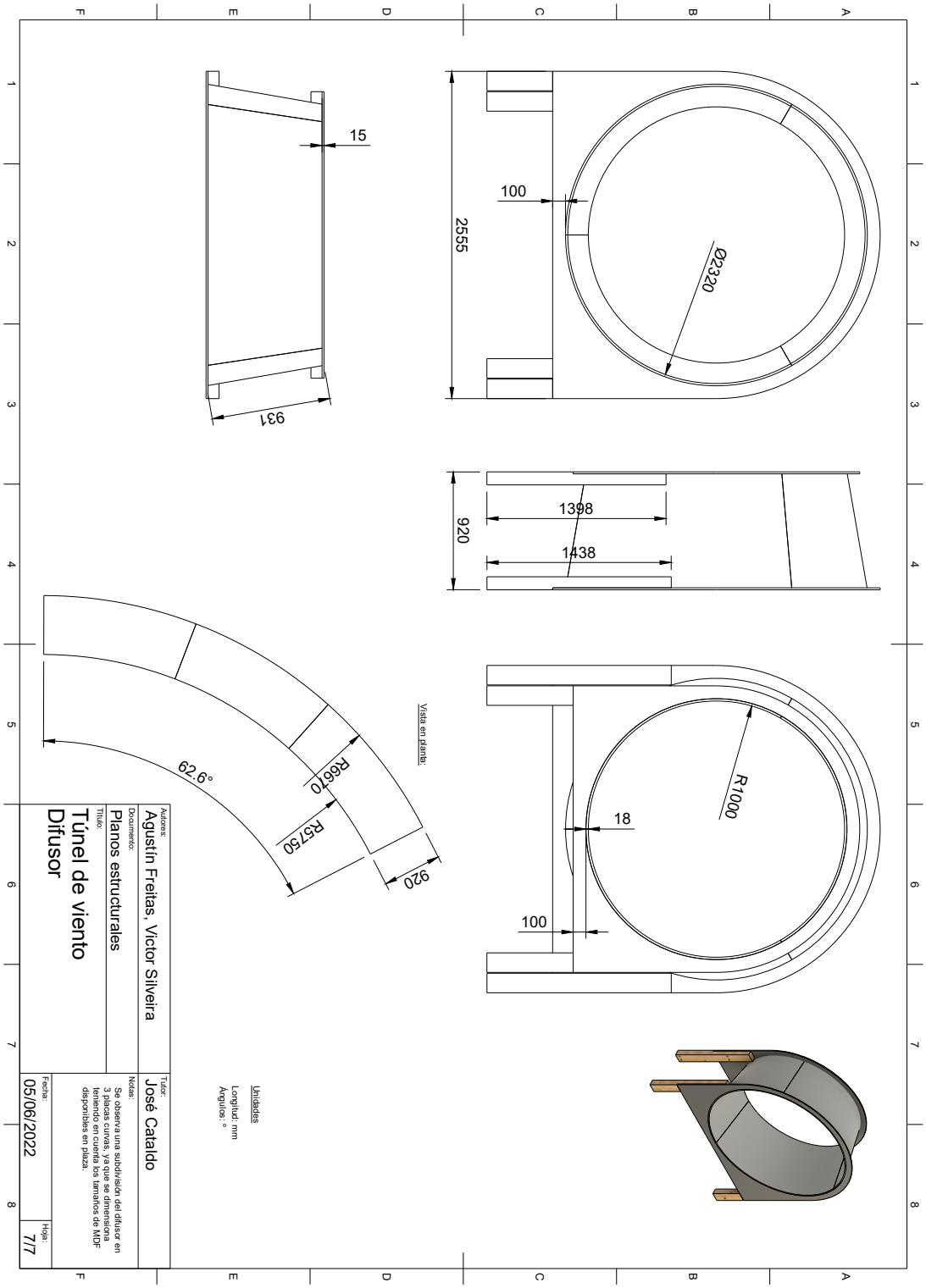




Unidades

Longitud: mm
Ángulos: °

Autores: Agustín Freitas, Victor Silveira	Tutor: José Cataldo
Documento: Planos estructurales	Notas: Perfil NACA 4412. Medidas especificas de este se muestran en la tabla 9.10
Título: Túnel de viento Ventilador	Fecha: 05/06/2022 — Hoja: 6/7


15
100
2555
Ø2320
931
920
1398
1438
R1000
18
100
Vista en planta:
62.6°
R6670
R5750
920
Unidades
Longitud: mm
Ángulos: °
Autores:
Agustín Freitas, Victor Silveira
Tutor:
José Cataldo
Documento:
Planos estructurales
Notas:
Se observa una subdivisión del difusor en 3 placas curvas, ya que se dimensiona teniendo en cuenta los tamaños de MDF disponibles en plaza.
Título:
Túnel de viento
Difusor
Fecha:
05/06/2022
Hoja:
7/7

Referencias

[1] Slavica Ristic, Jovan Isaković, Biljana Ilic, and Goran Ocokoljic. Review of methods for flow velocity measurement in wind tunnels. 09 2004.

[2] Alex Liberzon, Theo Käufer, Andreas Bauer, Peter Vennemann, and Erich Zimmer. Openpiv/openpiv-python: Openpiv-python v0.23.4, January 2021. doi:10.5281/zenodo.4409178.

[3] Sonntag R Thielicke, W. Particle image velocimetry for matlab: Accuracy and enhanced algorithms in pivlab. *Journal of Open Research Software*, 9, 2021. URL: https://doi.org/10.5334/jors.334.

[4] Gunnar Farnebäck. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion. In *Scandinavian conference on Image analysis*, pages 363–370. Springer, 2003.

[5] Sanja Miskovic Guilherme Lindner, Yann Devaux. Vortexfitting: A post-processing fluid mechanics tool for vortex identification. *SoftwareX*, 12 2020. doi:https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100604.

[6] Johannes Schindelin, Ignacio Arganda-Carreras, Erwin Frise, Verena Kaynig, Mark Longair, Tobias Pietzsch, Stephan Preibisch, Curtis Rueden, Stephan Saalfeld, Benjamin Schmid, Jean-Yves Tinevez, Daniel White, Volker Hartenstein, Kevin Eliceiri, Pavel Tomancak, and Albert Cardona. Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9:676–82, 06 2012. doi:10.1038/nmeth.2019.

[7] Napari Contributors. napari: a multi-dimensional image viewer for python. doi:10.5281/zenodo.3555620.

[8] Ira M. Cohen Pijush K. Kundu. *Fluid Mechanics*. Elsevier Science, 2002.

[9] IMFIA. *Notas del curso Mecánica de los Fluidos*. Facultad de Ingeniería, UdelaR. URL: https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=467.

[10] H. Schlichting. *Boundary-layer Theory*. McGraw-Hill, 1987.

[11] Fastcam mini ux - photron. URL: https://photron.com/es/fastcam-mini-ux/.

[12] Opencv official webpage, Apr 2022. URL: https://opencv.org/.

[13] H. H. Fernholz. Hot-wire anemometry. by h. h. bruun. oxford university press, 1995. 507 pp. isbn 0 19 856 342 6. £60. *Journal of Fluid Mechanics*, 311:381–381, 1996. doi:10.1017/S0022112096232641.

[14] Slavica Ristic, Jovan Isaković, Biljana Ilic, and Goran Ocokoljic. Review of methods for flow velocity measurement in wind tunnels. 09 2004.

[15] Markus Raffel, Christian E. Willert, Fulvio Scarano, Christian J. Kähler, Steve T. Wereley, and Jürgen Kompenhans. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer, Cham, 2018.

[16] K Okamoto, S Nishio, T Saga, and Kobayashi. Standard images for particle-image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 11:685, 05 2000. doi:10.1088/0957-0233/11/6/311.

[17] Estudio de esfuerzos, deformaciones y confort peatonal en la torre de las comunicaciones de antel. https://www.fing.edu.uy/imfia/eolodinamica/tunel/torre.html.

[18] Bruno Jobard and Wilfrid Lefer. Creating evenly-spaced streamlines of arbitrary density. *Proceedings of the eight Eurographics Workshop on visualization in scientific computing*, 7, 12 1997. doi:10.1007/978-3-7091-6876-9_5.

[19] J. D. Hunter. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95, 2007. doi:10.1109/MCSE.2007.55.

[20] Alexander Yakhot, Heping Liu, and Nikolay Nikitin. Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27(6):994–1009, 2006. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X06000476, doi:https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.02.026.

[21] Ferrari 458 italia (2009). URL: https://www.ferrari.com/en-EN/auto/458-italia.

[22] Renan Soares. *Estudo Fluidodinâmico Computacional (CFD) Aplicado à Aerodinâmica do Esporte Automobilístico*. PhD thesis, 09 2013. doi:10.13140/2.1.2247.2488.

[23] Yann Devaux, Lionel Thomas, Damien Calluaud, and Gérard Pineau. Isolated columnar vortex generation: influence of momentum impulsion characteristics and wall roughness. *Fluid Dynamics Research*, 52(2):025511, may 2020. doi:10.1088/1873-7005/ab7ebf.

[24] José Miguel Sánchez López. Diseño de balanza para un túnel de viento subsónico. URL: https://slideplayer.es/slide/12779631/.

[25] IEC. *IEC 61400-12-1: Wind energy generation systems – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. UNIT, 2017.

[26] *Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures.* American Society of Civil Engineers, asce/sei 49-12 edition, 2012. URL: https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412282, arXiv:https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784412282, doi:10.1061/9780784412282.

[27] I. E. Idelchik. *Handbook of Hydraulic Resistance, 4th revised and augmented edition.* Begell House, 2008.

[28] N. A. Ahmed. *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications.* IntechOpen, Rijeka, 2013. doi:10.5772/3403.

[29] A. Townsend K. Batchelor. Decay of vorticity in isotropic turbulence. *Royal Society*, 12 1946.

[30] R.I. Loehrke and Hassan Nagib. Control of freestream turbulence by means of honeycombs: A balance between supression and generation. *J.FLUID ENGNG.*, 98:342–353, 01 1976.

[31] L. Howarth T. de Kármán. On the statistical theory of isotropic turbulence. *Royal Society*, 1937.

[32] L. Lumley H. Tennekes. *A First Course in Turbulence.* The MIT Press, 1972.

[33] Arne V. Johansson Johan Groth. Turbulence reduction by screens. *Fluid Mech.*, 1988.

[34] J.H. WATMUFF. *Design of a new contraction for the ARL low speed wind tunnel.* DEPARTMENT OF DEFENCE DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION O AERONAUTICAL RESEARCH LABORATORIES, 1988.

[35] T. Morel. Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions. *Journal of Fluids Engineering*, 1975.

[36] Frank M. White. *Viscous Fluid Flow.* McGraw-Hill, 2006.

[37] A. J. Ward Smith. Pressure losses in ducted flows. 1971.

[38] W22 - motor eléctrico trifásico - catálogo técnico - mercado latinoamericano - weg. Accessed: 2022-06-01. URL: https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6863/mod_resource/content/1/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-latinoamericano-50024297-catalogo-esp pdf.

[39] IMFIA. *Notas del curso de Máquinas para Fluidos 2.* Facultad de Ingeniería, UdelaR. URL: https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=465.

[40] Virgil Moring Faires. Design of machine elements. Technical report, 1965.

[41] E.P. Popov. *Engineering Mechanics Of Solids 2Nd Ed.* Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 1998. URL: https://books.google.com.uy/books?id=UkBNPgAACAAJ.

[42] F.P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition with IHT/FEHT 3.0 CD with User Guide Set.* Wiley, 2006. URL: https://books.google.com.uy/books?id=Xup3PgAACAAJ.

[43] Stephen Timoshenko, Sergius Woinowsky-Krieger, et al. *Theory of plates and shells*, volume 2. McGraw-hill New York, 1959.

[44] Sidney H. Goodman. 6 - epoxy resins. In Sidney H. Goodman, editor, *Handbook of Thermoset Plastics (Second Edition)*, pages 193–268. William Andrew Publishing, Westwood, NJ, second edition edition, 1998. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815514213500096, doi:https://doi.org/10.1016/B978-081551421-3.50009-6.

[45] Imad Shakir Abbood, Sief aldeen Odaa, Kamalaldin F. Hasan, and Mohammed A. Jasim. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – a review. *Materials Today: Proceedings*, 43:1003–1008, 2021. International Conference on Advanced Materials Behavior and Characterization (ICAMBC 2020). URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320357618, doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636.

[46] Robert D. Blevins. *Formulas for natural frequency and mode shape / Robert D. Blevins.* Van Nostrand Reinhold Co New York, 1979.

[47] Frequency inverter - cfw-11 - user's manual - weg. https://static.weg.net/medias/downloadcenter/haa/hac/WEG-cfw11-users-manual-200-400v-sizes-a-to-d-10000063093-en.pdf. Accessed: 2022-06-01.

[48] Ficha técnica pino misionero o paraná o brasil. http://cadamda.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=47&Itemid=36. Accessed: 2022-01-24.

[49] Cecilia Volpe Baridón Ricardo Cerviño Leis, Karen García Cocozzelli. Caracterización de la madera laminada encolada de eucalyptus grandis uruguayo. *Facultad de Ingenieria, UdelaR*, 2017.

[50] Madera de pino: Tipos, propiedades y usos. https://maderame.com/enciclopedia-madera/pino/. Accessed: 2022-01-29.

[51] Madera de abeto douglas o pino oregón: Características y usos. https://maderame.com/enciclopedia-madera/abeto-douglas-pino-oregon/. Accessed: 2022-01-29.

[52] Ficha técnica pino elliotti. http://www.cadamda.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=36. Accessed: 2022-01-29.

[53] Ms-006 wood based composite materials. https://pdhstar.com/wp-content/uploads/2018/11/MS-006-Wood-Based-Composite-Materials-FINAL.pdf. Accessed: 2022-06-04.

[54] Polycarbonate properties. https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Plastic-Material-Properties/Polycarbonate#:~:text=Polycarbonate%20Properties&text=Polycarbonate%20is%20a%20tough%2C%20transparent,and%20have%20excellent%20dimensional%20stability. Accessed: 2022-06-04.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

1.1. Requisitos de diseño 8
1.2. Especificaciones del motor eléctrico y variador de frecuencia 8
1.3. Punto de funcionamiento en condiciones nominales 16

4.1. Parámetros de la simulación 39
4.2. Valores obtenidos de la medición y análisis de datos 45

5.1. Comparación de los parámetros del flujo 66

6.1. Tabla con valores predeterminados de `vortexfitting`. 79
6.2. Vórtices detectados utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`. 83
6.3. Vórtices detectados utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`. 89

8.1. Velocidades máximas alcanzables 113
8.2. Largos de cuerda admisibles para alturas de zona de trabajo 1,3, 1,4 y 1,5 m. 113
8.3. Bloqueo para largo de cuerda de 0,305 m. 114
8.4. Bloqueo par largo de cuerda de 0,458 m. 114
8.5. Valores de perdida de carga estimados para cada relación de contracción-difusión 116
8.6. Largo estimado en metros de la contracción, sección de trabajo y difusor 116

9.1. Datos de la sección del Honeycomb 123
9.2. Características de las mallas 124
9.3. Coeficientes de pérdida de carga de la zona de acondicionamiento. 125
9.4. Largos requeridos de la zona de acondicionamiento. 125
9.5. Comparación L/D vs X_m, condición de C_{pi} (N = 3) 128
9.6. Comparación L/D versus X_m, condición de C_{pe} 129
9.7. Diseño final de la contracción 130
9.8. Requisitos de diseño de la pieza de transición 132
9.9. Ángulos medios y perdidas de carga para un largo dado 133
9.10. Datos de diseño del difusor 134
9.11. Parámetros nominales preliminares. 136

9.12. Largo de cuerda según número de palas. 142
9.13. Dimensiones finales del rotor para cada subsección de diseño. . . . 143
9.14. Perdidas de carga y Largos de cada elemento 144

10.1. Estimación del peso de la sección del Honeycomb 149
10.2. Cantidad de soportes para cada espesor de tabla MDF 151
10.3. Peso de la estructura para cada espesor de MDF 151
10.4. Esfuerzos Honeycomb 151
10.5. Soportes transversales necesarios para cada sección de mallas . . . 152
10.6. Cantidad de soportes en función del espesor de tablas 153
10.7. Ubicación de los soportes transversales (distancia medida a partir del comienzo de la contracción aguas arriba) y peso a soportar. . . 153
10.8. Bastidores necesarios según la condición de carga 155
10.9. Resultados del modelado por elemento bidimensional, tablas de MDF para la condición de depresión 156
10.10 Resultados del dimensionamiento de las ventanas de policarbonato, $h = 18\,mm$ 156
10.11 Dimensiones de la pieza de transición 157
10.12 Resultados obtenidos del sistema de ecuaciones para la pieza de transición 157
10.13 Dimensiones del difusor 158
10.14 Resultados obtenidos del sistema de ecuaciones para el difusor . . . 158
10.15 Resultados obtenidos para las columnas de madera 160
10.16 Datos para el dimensionamiento de soportes 160
10.17 Resultados del dimensionamiento para soportes de elementos de sección rectangular 161
10.18 Resultado del dimensionamiento de soportes de MDF para elementos de sección curva 162
10.19 Datos necesarios para el diseño del soporte del motor 162
10.20 Solución al sistema de ecuaciones 164
10.21 Dimensiones mínimas admisibles de soportes para el caso 2 165
10.22 Cálculo de pandeo por método de Euler 166
10.23 Dimensiones mínimas admisibles para evitar pandeo y falla por fluencia 166
10.24 Resultados del sistema de ecuaciones para la carcasa 168
10.25 Valores mínimos admisibles para la geometría transversal de la viga 168
10.26 Dimensiones admisibles para refuerzos 169
10.27 Datos para el dimensionamiento del soporte de la carcasa 170
10.28 Dimensiones del soporte de la carcasa 170
10.29 Esfuerzos sobre las 5 regiones de la pala 173
10.30 Tabla de valores de motor y ventilador 184
10.31 Emisiones acústicas resultantes 184
10.32 Emisiones acústicas para cada diámetro de cilindro con $v = 19,5\,m/s$ 186
10.33 Frecuencias de resonancia calculadas 188
10.34 Dimensiones finales de la estructura de soporte del motor 189

10.35 Resultados obtenidos del cálculo de la frecuencia de resonancia de la carcasa 190
10.36 Datos del eje del motor 190
10.37 Frecuencias de resonancia para tablas y ventanas de la sección de trabajo 191
10.38 Peso del túnel de viento diferenciado por elemento 192

11.1. Resumen de elementos aerodinámicos 198
11.2. Valores nominales estimados 198
11.3. Desglose de costos por horas de trabajo 200

B.1. Resumen de propiedades estructurales de la madera de pino Paraná 209
B.2. Precios para las tablas de Eucalipto Finger-Joint 209
B.3. Propiedades mecánicas Eucalyptus Finger-Joint 209
B.4. Propiedades de diferentes maderas de pinos 210
B.5. Propiedades estructurales de tablones de MDF [53] 210
B.6. Propiedades estructurales de placas de policarbonato [54] 210
B.7. Propiedades estructurales de Placas de acero [41] 210

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1. Diagrama de desarrollo del proyecto 1
1.2. Diagrama de bloque de herramienta de visualización. 3
1.3. Ejemplo de adquisición de un flujo en torno a un obstáculo con sección rectangular. Describiendo en a) una imagen del experimento indicando componentes, b)se observa el humo iluminado por el plano láser y en c) la imagen adquirida por la cámara. 4
1.4. Campo de velocidad instantáneo a $t = 0{,}2\ s$. 4
1.5. Ejemplo de campo de velocidades medio 5
1.6. Campo de velocidad promediando los campos instantáneos obtenidos de promediando los campo de velocidades obtenidos entre los tiempos 4,9 - 5,0 s. 5
1.7. Ejemplo de dibujo de líneas de flujo 6
1.8. Ejemplo de detección de vórtice estacionario 6
1.9. Interfaz gráfica desarrollada con Napari 8
1.10. Descripción de elementos del túnel de viento. 9
1.11. Diseño final de la sección de trabajo 10
1.12. Diseño final del acondicionador de flujo 11
1.13. Diseño final de la contracción 12
1.14. Diseño final de la pieza de transición 12
1.15. Diseño final del ventilador 14
1.16. Diseño final del carcasa 15
1.17. Modelo 3D del ensamblaje del túnel de viento 15
1.18. Acople de herramientas de visualización al diseño del túnel de viento 16

2.1. Distribución de velocidades características. [8] 21
2.2. Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana. [8] 22
2.3. Componentes de la velocidad dentro de la capa límite. [10] 23
2.4. Desprendimiento de capa límite. [8] 24
2.5. Líneas de flujo del desprendimiento de la capa límite. [8] 24

3.1. Ejemplo de una adquisición realizada. 25
3.2. Diagrama general de la adquisición 26
3.3. Ejemplo de adquisición de un flujo en torno a un obstáculo con sección rectangular. En la figura a) se observan componentes de la adquisición y en b) la imagen adquirida por la cámara. 26

3.4. Aspersor de trazador 27
3.5. Esquema de la máquina de humo 27
3.6. Esquema de posición de principales componentes de la visualización 29
3.7. Guía para la selección de parámetros de resolución y zoom de la cámara. 31
3.8. Ejemplo de ajuste del foco. En la imagen a) se observa el patrón de ajuste [12], en la imagen b) se observa un ejemplo del ajuste y en la imagen c) el mismo ejemplo desde perspectiva de la cámara. . . 32
3.9. Guía para determinar la calidad de la imagen con los parámetros de R, FPS y la velocidad del experimento v. 33
3.10. Efecto indeterminado de las limitaciones sobre la calidad de imagen. 34

4.1. Sistema de adquisición típico de PIV [15]. 36
4.2. Diagrama simplificado del funcionamiento de `OpenPIV` para una iteración. 37
4.3. Distribución teórica de las velocidades en el plano en el caso n°1. . 39
4.4. Imágenes generadas en el plano en el caso n°1. 40
4.5. Resultados obtenidos con `OpenPIV`. 40
4.6. Histograma de diferencia relativa del módulo de velocidades 41
4.7. Histograma de diferencia de direcciones 42
4.8. Capa límite en el piso del túnel de viento 43
4.9. Diagrama de la adquisición 43
4.10. Experimento de capa límite a $t = 0,42\ s$. Se ha superpuesto en color violeta la región de interés (ROI) analizada. 44
4.11. Ejemplos de sumideros y fuentes no deseables en el campo de velocidades. 44
4.12. Perfile de velocidades de la capa límite experimental a $16,8\ m/s$. . 45
4.13. Resultado del campo de velocidad obtenido utilizando `OpenPIV`. . . 46
4.14. Resultado del perfil velocidad en una capa límite obtenido mediante `OpenPIV` a $1,96\, m/s$. 47
4.15. Desviación de intensidad del trazador. 47
4.16. Comparación perfiles de velocidades teóricas (figura 4.12) y procesados (figura 4.14) 48
4.17. Correlaciones para los perfiles de velocidad en el ROI 48
4.18. Campo de velocidad media obtenido con flujo óptico. 52
4.19. Resultado del perfil de velocidad en una capa límite obtenido mediante flujo óptico 52
4.20. Comparación de perfiles de velocidades teóricos y procesados . . . 53
4.21. Perfiles de velocidades para cada columna 54
4.22. Curva de correlación entre perfiles de velocidades y perfil teórico . 54
4.23. Esquema de un flujo libre 55
4.24. Esquema del ensayo para flujo libre 56
4.25. Región de interés seleccionada. a) Es una captura de la adquisición con la velocidad del túnel $u_\infty = 1{,}0\ m/s$, b) a $u_\infty = 2{,}2\ m/s$ y c) $u_\infty = 3{,}3\ m/s$ 57
4.26. Comparación de valores obtenidos con flujo óptico vs reales. 57

5.1. Estudio alrededor de la torre de comunicaciones de ANTEL [17]. a) Etapa de visualización, b)Patrón de flujo a nivel peatonal (viento SE) 59
5.2. Ejemplo del procesamiento de líneas de flujo. En la parte a, se observa el campo velocidades y en la parte b sus correspondientes líneas de flujo. 60
5.3. Imagen del experimento indicando componentes. 61
5.4. Cuadro de la grabación indicando cada uno de los patrones. 62
5.5. Secuencia de imágenes para el patrón 1. 62
5.6. Secuencia de imágenes para el patrón 2. 63
5.7. Secuencia de imágenes para el patrón 3. 63
5.8. Secuencia de imágenes para el patrón 4. 64
5.9. Secuencia de imágenes para el patrón 5 64
5.10. Campo medio de velocidades para una velocidad media de 1,1 m/s 65
5.11. Líneas de flujo para el campo de velocidades medio 65
5.12. Patrones principales del flujo descrito mediante líneas de flujo del campo medio de velocidades. 65
5.13. Líneas de flujo medio estudiadas por [20] 66
5.14. Líneas de flujo a velocidad a)2,2 m/s y b)3,4 m/s 68
5.15. Modelo a escala del automóvil. 69
5.16. Esquema de adquisición del experimento. 70
5.17. Cuadro de adquisición del flujo en torno al automóvil. 70
5.18. Patrones de flujo detectados sobre el automóvil. 71
5.19. Líneas de flujo obtenidas para el campo medio 71
5.20. Módulo de campo de velocidades 72
5.21. Módulo de campo de presiones 73

6.1. Diagrama de flujo del programa principal de `vortexfitting` [5]. . 77
6.2. Líneas de flujo promediando los resultados obtenidos desde $t = 0{,}2\,s$ a $t = 0{,}4\,s$. 79
6.3. Ejemplo de vórtice detectado con un valor de correlación de 0.9 utilizando un `initial_r = 25`. 80
6.4. Ejemplo de vorticidad del flujo utilizando los parámetros predeterminados. 80
6.5. Ejemplo del campo de detección del flujo utilizando los parámetros predeterminados. 81
6.6. Ejemplo de candidatos a centros de vórtices del flujo utilizando los parámetros predeterminados. 82
6.7. Ejemplo de candidatos a centros de vórtices del flujo utilizando un `box_size=20`. 82
6.8. Ejemplo de detección de vórtices del flujo utilizando un `box_size=20`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`. 83
6.9. Ejemplo de detección de vórtices del flujo utilizando un `box_size=100`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.75`. 84
6.10. Campo de detección utilizando criterio Q. 84
6.11. Campo de detección utilizando criterio delta. 85
6.12. Detección de vórtices utilizando criterio delta. 85

6.13. Líneas de flujo media. 86
6.14. Vorticidad del flujo medio con valores predeterminados. 86
6.15. Campo de detección en el flujo medio con método *swirling* y `box_size=20` 87
6.16. Líneas de flujo media con candidatos a vortices. 87
6.17. Líneas de flujo media con detección de vórtices. 88
6.18. Líneas de flujo media con detección de vórtices con `box_size=10`, `initial_r=50` y `correlation_threshold=0.72`. 88

7.1. Diagrama de estructura de las principales clases asociadas al procesamiento de las funcionalidades. 92
7.2. Diagrama de estructura de las clases asociadas a la visualización de las funcionalidades. 92
7.3. Diagrama de estructura del archivo de configuración con algunos elementos. 93
7.4. Pseudocódigo del código principal. 93
7.5. Diagrama de bloque de la interfaz. 94
7.6. Ejemplo simple de generación de un menú. 95
7.7. Ejemplo simple de generación de un menú. 95
7.8. Ejemplo simple de generación de un menú. 96
7.9. Diagrama de estructura interfaz. 96
7.10. Menú principal de Fiji. [6] 97
7.11. Menú realizando utilizando Napari. [7] 98
7.12. Menú de configuración avanzada. 99
7.13. Menú de configuración avanzada del algoritmo de flujo óptico. . . . 99
7.14. Menú de configuración media móvil. 100
7.15. Menú de configuración de la detección de vórtices. 100
7.16. Menú completo del modo instantáneo. 101
7.17. Menú completo de la visualización modo medio. 101
7.18. En la izquierda se observa un cuadro original, en la derecha modificando el mapeo de los valores de intensidad, en este caso se utiliza magma. 102
7.19. Selección de la primera región de interés. 102
7.20. Selección de todas las regiones de interés. 103
7.21. Corrida con configuración con valores predeterminada. 103
7.22. Corrida con configuracion con `Step Grid = 2` 104
7.23. Corrida con configuración con `Step Grid = 6` 104
7.24. Corrida con configuracion con `Step Grid = 6` observando el campo de velocidades y líneas de flujo medio. 105
7.25. Corrida observando vórtices con configuración predeterminada. . . 105
7.26. Detección de vórtice medio. 105

8.1. Configuraciones generales de un túnel de viento [24] 107
8.2. Áreas de pasaje en la definición del factor de bloqueo β 109
8.3. Proceso de predimensionamiento 111
8.4. Modelado del bloqueo introducido por perfil aerodinámico 112
8.5. Incidencia del flujo sobre un perfil 114

8.6. Diagrama de Cordier 117

9.1. Labios de entrada 120
9.2. Diámetro hidráulico, mallas y Honeycomb 121
9.3. Distancia del inicio de la contracción hasta presión máxima de la pared vs la distancia desde el inicio de la contracción hasta X_m [35]. 127
9.4. Gradiente de presiones en la pared [35]. 128
9.5. Diagrama de diseño para $N = 4\,(CR = 4)$ [35] 129
9.6. Ángulos entre la sección de trabajo y la sección del rotor 133
9.7. Esquema de pérdidas de carga del ventilador 137
9.8. Procedimiento rendimiento ventilador 140

10.1. Esquema del modelado de la pieza de transición 147
10.2. Ejemplo ilustrativo de elementos a diseñar 148
10.3. División de la sección de mallas 149
10.4. Ejemplo de parrilla 150
10.5. Sellado de la sujeción de las mallas 152
10.6. Detalle para las tablas superiores e inferiores de la sección de trabajo157
10.7. Dimensión transversal patas 158
10.8. Esquema de soportes distribuidos en el túnel de viento 159
10.9. Soportes para elementos de secciones curvas. 161
10.10Diagrama del motor 163
10.11Diagrama de fuerzas para soportes del motor 164
10.12Diagrama de fuerzas aplicadas sobre la carcasa 167
10.13Problema equivalente 167
10.14Sección transversal con N refuerzos 169
10.15Diagrama de cuerpo libre sobre la estructura de la carcasa 171
10.16Sujeción del alma de la pala 172
10.17Ángulos de interés 173
10.18Modelado del vínculo entre la pieza de resina y el alma de acero . 174
10.19Esquema de modelado como viga en voladizo 175
10.20Vista de la sección 176
10.21Vista de las chapas junto al alma de los álabes y la resina 178
10.22Esquema de platina de acoplamiento al eje 180
10.23Croquis esquemático 180
10.24Croquis esquemático 181
10.25Cubo de madera 181
10.26Tabla de conversión de dB a dB_A 182
10.27Variación del número de Strouhal con Re 185
10.28Crucetas longitudinales para aumentar la rigidez del sistema 188
10.29Puerta vertical para la sección de trabajo 192
10.30Disposición del sistema de adquisición en el túnel diseñado 193

11.1. Diagrama de bloque de herramienta de visualización. 196
11.2. Distribución horaria del proyecto. 200

A.1. Relación teórica de una capa límite adimensionada 202
A.2. Capa límite adimensionada a 30 Hz. 202
A.3. Capa límite adimensionada a 4 Hz usando `OpenPIV`. 204
A.4. Capa límite adimensionada a 4 Hz usando flujo óptico. 204
A.5. Comparación capa límite adimensionada a 4 Hz y 30 Hz usando `OpenPIV`. 205
A.6. Comparación de capa límite adimensionada a 4 Hz y 30 Hz usando flujo óptico. 205

B.1. Honeycombs disponibles 208
B.2. Balanza aerodinámica 209

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 27 julio, 2022.
http://iie.fing.edu.uy/