



CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO A PEQUEÑA ESCALA

José Luis Muñoz Lombilla [*], Bruno Pereiras García [], Jesús Manuel Fernández Oro[**].**
[*]Alumno; [**]Tutores
UO138082@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Los docentes de mecánica de fluidos siempre se han encontrado con dificultades a la hora de mostrar a los estudiantes como se ve afectado el fluido en su interacción con los objetos. Conceptos como línea de corriente, estela, desprendimiento alternativo de vórtices, etc., se comprenden mucho mejor a través de la visualización. El uso de túneles tanto aerodinámicos como hidrodinámicos ayuda mucho en este propósito. El objeto de este proyecto es idear y construir un túnel de viento que permita visualizar los fenómenos que se producen al interaccionar un fluido en movimiento con cuerpos estáticos.

El túnel será de baja velocidad, hasta 3.5 m/s. Tendrá unas dimensiones pequeñas que permitirán su uso por parte de los alumnos. Además incorpora un pequeño control de la velocidad del aire, un equipo de iluminación y elementos de medida de la velocidad y fuerza de arrastre. La visualización se realizará por medio de vapor de agua generado mediante un equipo humidificador.

SUMMARY

Teaching Fluid Mechanics has always been difficult because the students usually have problems to understand how is affected the fluid by fluid-solid interactions. Concepts such as power line, wake, alternate vortex shedding, etc., are understood better through visualization. Using wind tunnels or hydraulic channels is very helpful with such matters. Designing and manufacturing a wind tunnel which allows to analyze the flow pattern in fluid-solid interactions is the purpose of this project.

The tunnel is low speed to 3.5 m/s. It will have small dimensions to make easier its use by

students. It also incorporates a small control air speed, lighting equipment and measuring elements of speed and forces. The visualization is made by steam generated by a humidifier equipment.

1. INTRODUCCIÓN

La docencia en mecánica y dinámica de fluidos, debido a su importante carga matemática y a la dificultad para visualizar los procesos, presentan una gran dificultad en su comprensión por parte de los alumnos. Este hecho, recogido por los docentes en su experiencia diaria, ha motivado la construcción de un túnel de viento subsónico abierto de tiro inducido y de pequeña escala. Con la incorporación además, de vapor de agua, se consiguen observar algunos de los fenómenos que se estudian en esta materia.

Con el ánimo de mostrar a los alumnos la posibilidad de realizar estos ensayos de una manera económica y accesible, intentando primar en mayor medida la imaginación más que los recursos económicos, se ha llevado a cabo este trabajo con materiales cotidianos y en ocasiones reutilizados que permiten obtener unos costes reducidos y una buena accesibilidad a los mismos.

El objetivo general de este trabajo es visualizar los principales fenómenos que se producen cuando un fluido, en este caso aire con alto contenido de humedad, circula alrededor de un cuerpo sólido. Además se comprueba de manera experimental el comportamiento teórico de la circulación de un fluido alrededor de un cilindro y una esfera y se verificará su por comparación con los gráficos teóricos.



Para alcanzar este objetivo general se ha de diseñar, fabricar y caracterizar un túnel de viento, con lo cual, se deben de desarrollar primero otros objetivos parciales a lo largo de este trabajo, como son:

-Diseñar los componentes y la geometría para la construcción del túnel de viento.

-Realizar un análisis de materiales para su construcción, teniendo presente la reutilización de materiales y un reducido coste que posibilite la reproducción o mejora de este trabajo en el futuro.

-Realizar pruebas experimentales y verificar el correcto funcionamiento.

-Medir las componentes de velocidad del aire y fuerza de arrastre.

2. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción del túnel de viento se ha dividido en las siguientes partes:

- Dimensiones geométricas.
- Elementos de medida
- Elementos de control
- Fuente de alimentación

Cada una de ellas se desarrolla en los siguientes apartados.

2.1 Dimensiones geométricas

Con el propósito de ir alcanzando los objetivos planteados, se comienza por definir las dimensiones geométricas del túnel a construir. Para ello se determinan las dimensiones considerando el tamaño de los objetos a ensayar (objetos en torno a 50 mm) y teniendo presente los siguientes aspectos:

-Facilidad de manejo y transporte.

-Funcionalidad, en cuanto a la visibilidad de los fenómenos a observar.

-Costes reducidos. Empleo de materiales comunes y reutilizados.

Las principales partes que definen la geometría del túnel de viento se pueden observar en la figura 1 y son las siguientes:

- Elementos de impulsión del aire
- Cámara de ensayos
- Tronco pirámide de entrada
- Canal de salida.
- Estabilizador de flujo

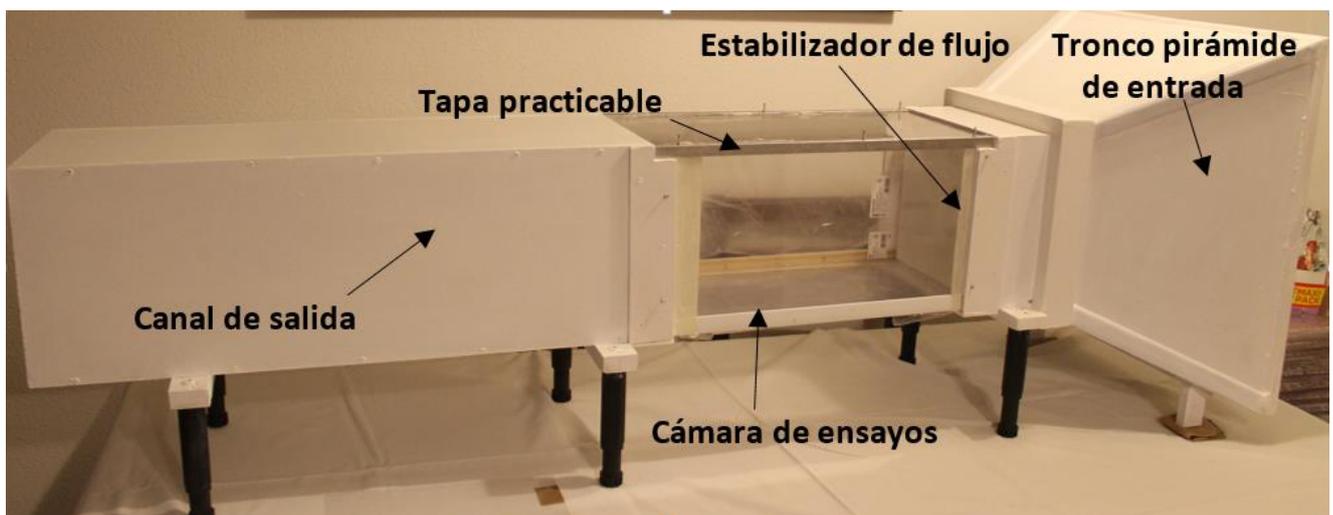


Figura 1: Principales partes del túnel de viento.



2.1.1 Elementos de impulsión del aire.

Para dotar de movimiento al aire se ha optado por emplear 4 ventiladores de 6 W alimentados a 12 Vdc y colocados en la terminación del canal de salida formando una matriz de dos filas y dos columnas según se indica en la figura 2. Con esta composición se pretende disponer de versatilidad en la velocidad y en la dirección de movimiento del flujo de aire dentro de la cámara de ensayos, lo que posibilita actuar sobre los objetos ensayados con diferentes velocidades y ángulos de ataque.

La velocidad de los ventiladores está regulada mediante cuatro potenciómetros, uno por cada ventilador. Esto permite velocidades en cada uno de ellos de entre 0 y 0.6 5 m/s. Aplicando la máxima capacidad de impulsión del aire (con los cuatro ventiladores accionados) se puede llegar a velocidades de hasta 3 m/s.

La dimensión y colocación de los ventiladores son un condicionante para la construcción del túnel, ya que la cámara de ensayos debe de ajustarse a la medida de estos.



Figura 2: Disposición de la matriz de ventiladores

Las características e imágenes de estos elementos aparecen en el anexo 1.

2.1.2 Cámara de ensayos

La cámara de ensayos (figura 1), es el elemento principal en la elección de la geometría y dimensiones del túnel de viento. Su función

principal es permitir visualizar el movimiento del flujo de aire alrededor de los objetos ensayados sin comprometer la movilidad y funcionalidad del equipo.

Se contempla inicialmente una cámara de ensayo cuadrada de entre 200 o 300 mm de lado, con el propósito de ensayar objetos de un tamaño aproximado de 50 mm de lado o diámetro. A pesar de que la geometría cilíndrica es mejor para este tipo de ensayos, se ha optado por una geometría cuadrada basada en los siguientes puntos:

-El cambio de geometría no compromete el objetivo de este trabajo.

-Facilidad de construcción.

-Mejor posibilidad de reutilización de elementos.

La reutilización de los ventiladores de 125 mm de lado, colocados como se indica en la figura 2, han definido finalmente la cámara de ensayos en cuanto a sus dimensiones en su superficie de paso (250 x 250 mm²).

Para disponer de un buen campo de visualización se ha decidido una longitud de cámara de 500 mm en consonancia con el tamaño de los objetos a ensayar. Además se ha comprobado el dimensionado teniendo en cuenta la necesidad de que el flujo de aire se estabilice y no sufra distorsiones debidas a la proximidad de los elementos con los que limita: ventiladores y estabilizador de flujo.

En función del tamaño de la cámara de prueba, deben de estar los modelos ensayados para que las paredes no influyan sobre los resultados de los procesos.

El bloqueo del flujo ocurre durante las pruebas con modelos relativamente grandes en la sección de túneles de tamaño limitado. Este bloqueo se define como la relación entre el área de la sección frontal del modelo y el área de la sección de prueba. Estas relaciones no deberían exceder del 10 % de la sección del túnel siendo el comportamiento óptimo del coeficiente de bloqueo los valores comprendidos entre 0,075 y 0,10 [1].

Así se tiene que:



$$0,075 < \frac{\text{Área frontal del modelo}}{\text{Área de la zona de prueba}} < 0,1$$

En este caso, el área de la zona de prueba es de:

$$250 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} = 62500 \text{ mm}^2$$

El área del modelo no será mayor de

$$62500 \text{ mm}^2 \cdot 0,1 = 6250 \text{ mm}^2$$

Ni menor que

$$62500 \text{ mm}^2 \cdot 0,075 \text{ mm}^2 = 4687 \text{ mm}^2$$

Con estas directrices, los modelos de sección cuadrada estarán comprendidos entre 68 y 79 mm de lado y las secciones circulares, estarán construidas con diámetros de valores que oscilan entre 38 y 89 mm de diámetro.

La longitud de la cámara de prueba, se construye en función de la longitud del modelo y de la distancia necesaria para eliminar el efecto de una expansión brusca. Según algunos estudios [2], el flujo al salir a una expansión brusca se expande ocupando el mayor área posible, al ser la cámara de prueba una instalación bajo similares condiciones de presión, las líneas de corriente del flujo tratarán de expandirse al salir de un colector. No existe información sobre la longitud necesaria para que las líneas de corriente vuelvan a su estado normal, pero en casos de conductos cilíndricos se asume que esta expansión ocurre a una distancia no mayor que el diámetro menor que conforma una expansión brusca (*dme*) [2].

Similar situación se tiene para la contracción brusca que se originaría a la entrada de la cámara de ensayos si no existiese una entrada gradual.

En esta construcción no existe expansión brusca a la salida de la cámara de ensayos y la entrada a la misma se realiza de manera gradual (figura 1). Siendo muy rigurosos y quedando del lado de la seguridad para calcular la longitud de la cámara de ensayos, se supone una contracción brusca de entrada con lo se puede calcular una longitud mínima de ésta utilizando la siguiente expresión:

$$L_{cp} = 2 \cdot d_{me} + L_m$$

L_{cp}: Longitud de la cámara de prueba
d_{me}: Diámetro menor de la expansión brusca

L_m: Longitud del modelo

L: Longitud del lado de la cámara de ensayos

Dado que no existe el *dme* a la salida de la cámara de ensayos, por permanecer la sección constante, se obtiene:

$$L_{cp} = d_{me} + L_m$$

Calculando el diámetro hidráulico (*Dh*) de la sección cuadrada de la cámara se obtiene:

$$D_h = L \cdot L / 4 \cdot L = 250 \cdot 250 / 4 \cdot 250 = 62,5 \text{ mm}$$

Haciendo *Dh=dme* y suponiendo la longitud del modelo de 200 mm se obtiene finalmente.

$$L_{cp} = 62,5 + 200 = 262,5 \text{ mm}$$

Sería necesaria una longitud mínima de cámara de ensayo de 262.5mm.

Los materiales empleados en la construcción del túnel, han sido metacrilato transparente de 5 mm de espesor y angulares de aluminio y PVC. Para posibilitar el acceso al interior de la cámara se ha construido practicable la tapa superior (Figura 1).

Finalmente, se ha mejorado la visualización dentro de la cámara de ensayos aplicando a dos de las cuatro paredes pintura acrílica de color negro mate que facilita el contraste con el vapor de agua.

2.1.3 Tronco pirámide de entrada

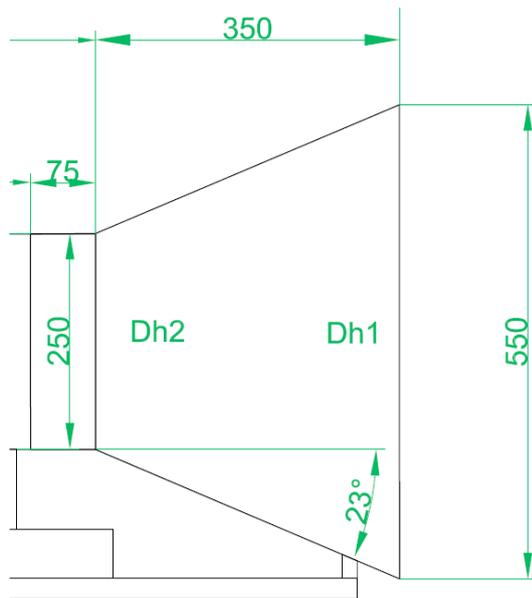
La pérdida de energía en una contracción puede disminuirse sustancialmente haciendo ésta más gradual. La bibliografía existente trabaja principalmente con diámetros y secciones circulares. En este caso, al ser la sección cuadrada se trabaja con el diámetro hidráulico (*Dh*).

La figura 3 representa la pendiente de la tronco de pirámide de entrada al túnel de viento.

Para definir la forma de la entrada se ha ido a referencias bibliográficas [2] donde se indican los ángulos de entrada θ entre 20° y 40°.

En la figura 4 se observan los coeficientes de resistencia (K) en función de la relación de diámetros hidráulicos y del ángulo de entrada θ .

$$\frac{Dh1}{Dh2} = \frac{550}{250} = 2,2$$



La Figura 3: Tronco pirámide de entrada

La expresión de la pérdida de carga en función del coeficiente de carga y de la velocidad es:

$$hl = K (V_2)^2 / 2g$$

- hl : pérdida de carga
- K : coeficiente de resistencia
- V_2 : velocidad en la sección 2
- g : gravedad

Realizando la construcción del Tronco pirámide de entrada con la geometría indicada en la figura 3 se mejora el coeficiente de carga (K) entre 9 y 10 veces con respecto a una entrada brusca, desde 0.4 hasta valores de 0.04 como se observa en las figuras 4 y 5, mejorando la pérdida de carga en la misma proporción

Las gráficas indican que para los ángulos sobre el intervalo de 15° a 40°, $K=0.05$ o menor, y para ángulos de hasta 60°, K es menor que 0,08. Al disminuir el ángulo del cono por debajo de 15°,

el coeficiente de resistencia se incrementa. La razón es que los datos incluyen los efectos tanto de la turbulencia local ocasionada por la separación del flujo como de la fricción del conducto. Para los ángulos menores, la transición entre los dos diámetros es muy larga, lo que incrementa las pérdidas de fricción.

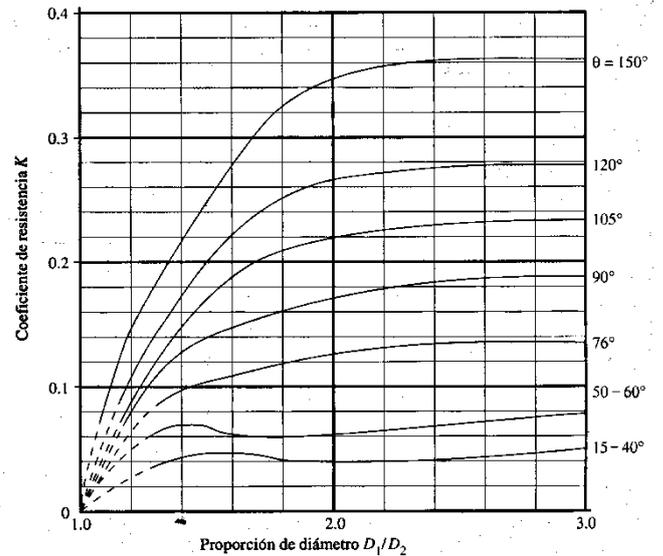


Figura 4: Coeficiente de resistencia en función de D_2/D_1 y del ángulo θ con entrada troncocónica.

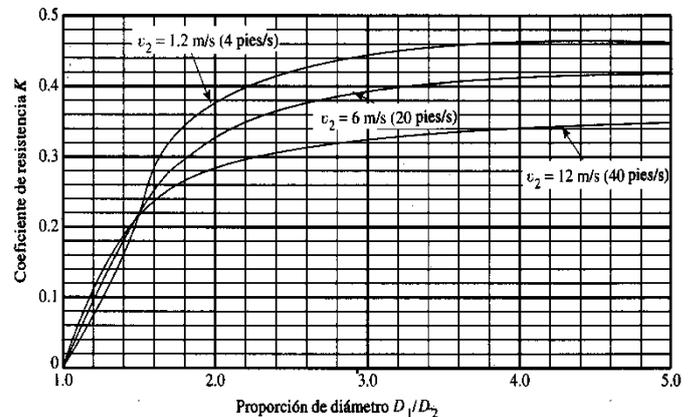


Figura 5: Coeficiente de resistencia en función de D_2/D_1 con entrada brusca.

2.1.4 Canal de salida

Los estudios recomiendan que el elemento difusor de un túnel de viento disponga de una geometría troncocónica con un ángulo de salida no superior a 8° [3]. En este caso se tiene un tronco de pirámide por ser la sección cuadrada, de tal forma que se disminuyan las pérdidas de carga.



En la figura 1 se puede observar que en este caso la salida del aire al exterior se realiza a través de un tramo recto de conducción cuadrada de 250 mm de lado, y 750 mm de longitud, manteniendo la continuidad de la cámara de ensayos. Esta configuración, aunque está penalizada con un aumento en la pérdida de carga, ha sido empleada por su simplicidad constructiva y teniendo en cuenta que no afecta a los resultados finales debido al exceso de capacidad de los ventiladores con relación a los objetivos esperados.

2.1.5 Estabilizador de flujo

Este elemento obliga al flujo de aire que entra desde el Tronco de pirámide de entrada hacia la cámara de ensayos, lo haga sin perturbaciones. Su objetivo es redirigir el flujo en su camino hacia la cámara de ensayo. Su ubicación puede observarse en la figura 1.

La construcción de este elemento se ha realizado utilizando una placa alveolar de policarbonato extruido de 2 x 1 m cortada en rectángulos de 250 x 75 mm.

La geometría final del elemento es la de un paralelepípedo de 250 mm de lado y 75 mm de ancho, dimensiones establecidas por la cámara de ensayos. A su vez esta geometría está compuesta por paralelepípedos más pequeños de dimensiones de 6 mm de lado y 75 mm de largo, ver figura 6. La longitud de este elemento (75 mm) se ha obtenido empíricamente buscando el equilibrio entre la pérdida de carga y las necesidades de velocidad dentro de la cámara de ensayos.

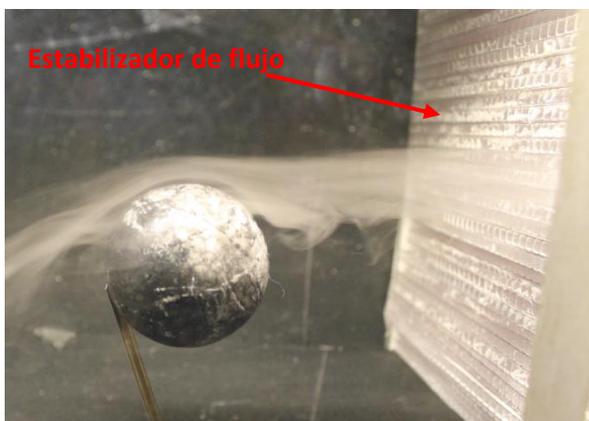


Figura 6: Estabilizador de flujo (250 x 250 mm).

2.2 Elementos de medida

Para caracterizar de una manera adecuada el túnel de viento, además de conocer sus dimensiones geométricas se debe de conocer lo que sucede en el interior de la cámara de ensayos. Las variables que se miden en este trabajo son la velocidad del flujo de aire y la fuerza que éste ejerce sobre los cuerpos a ensayar.

Otros elementos utilizados, permiten conocer la caída de tensión en los ventiladores en todo momento. Esto permite estimar la velocidad de trabajo de los ventiladores y realizando mediciones de intensidad, calcular la potencia consumida por los equipos de trabajo.

Para realizar todas estas medidas se han utilizado una serie de equipos cuyas características se desarrollan en el siguiente apartado.

2.2.1 Medida de la velocidad del aire

Con el objeto de medir la velocidad del aire dentro de la cámara de ensayos y conocer su caudal, se ha instalado un sensor de velocidad cuyo rango de funcionamiento está comprendido entre 0 y 3 m/s. Las características de este elemento pueden verse en el anexo 1.

En la tabla 1 se puede observar precisión del sensor en función de la velocidad del aire

Velocidad del aire. (m/s)	Voltaje de salida (V)
0	0.5 ± 0.15
0.75	0.70 ± 0.15
1.5	1.11 ± 0.15
2.25	1.58 ± 0.15
3	2 ± 0.15

Tabla 1: Precisión del sensor de velocidad (Condiciones de medida: alimentación 3.3 Vdc, T^a ambiente 25 °C, aire seco.)

La relación entre la tensión de salida y la velocidad del aire no es lineal, por lo que es

conveniente, acudir a la gráfica del fabricante (figura 7) evitando interpolar entre valores.

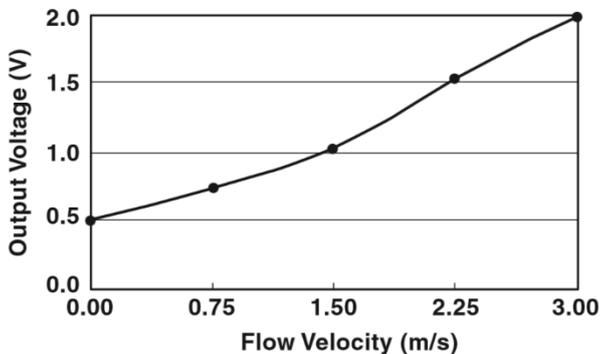


Figura 7 : Curva voltage de salida - velocidad del aire.

2.2.2 Medida de la fuerza de arrastre.

Para conocer la fuerza de arrastre (D) que ejerce el aire sobre el cuerpo ensayado, se utiliza una balanza de precisión. Ésta se encuentra colocada sobre la cámara de ensayo y es accionada mediante un eje que transmite el par de la fuerza provocada por el flujo de aire sobre la superficie del cuerpo a ensayar. Conocida las distancias (Dp) desde el cuerpo a ensayar, al punto de giro (P) de la varilla y la distancia (dp) desde este punto P a la balanza (ver figura 8), se puede establecer la relación que se indica a continuación, aplicando la igualdad de los momentos de las fuerzas:

$$M \cdot g \cdot dp = Cd \cdot Dp$$

Haciendo $Dp/dp = 2,21$

Se obtiene que $Cd = 21,7 \cdot M$

M = masa indicada por la balanza (kg);

g = gravedad (9.8 m/s²);

dp = distancia desde la balanza al punto de giro "P" (m);

Dp =Distancia desde el objeto de ensayo al punto "P" de giro (m);

D = Fuerza de arrastre (N)

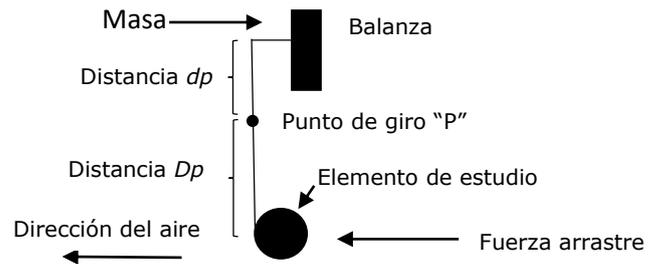


Figura 8: Relación entre Dp/dp .

Dados los pequeños valores de la fuerza de arrastre que actúa sobre los objetos, se emplea para realizar la medida, una balanza de precisión cuyas características e imágenes se pueden ver en el anexo 1

2.3 Elementos de control

Otro aspecto que se ha tenido en cuenta es la versatilidad de las condiciones de trabajo dentro de la cámara de ensayos. Para ello se han colocado elementos de control que regulan la velocidad del aire, el caudal de vapor de agua y la iluminación.

2.3.1 Generador de vapor

Para poder visualizar el movimiento del aire alrededor de los objetos, se genera vapor de agua que es arrastrado por el flujo de aire. La generación de este vapor se realiza empleando un humidificador de aire ultrasónico de membrana con una potencia total de 24 W y un caudal de agua de 500 ml/h.

Empíricamente se ha comprobado que empleando un caudal de vapor de agua de aproximadamente 60 ml/h es posible visualizar los efectos del movimiento de aire para velocidades no superiores a 1 m/s. Si se aumenta la velocidad del aire, es necesario aumentar el caudal de vapor de agua, de tal manera, que para alcanzar velocidades de 3 o 3.5 m/s se necesitan caudales de vapor superiores a 200 ml/h.

Los caudales que se pueden manejar con este equipo varían entre 0 y 500 ml/h, pudiendo alcanzar rangos de caudales mayores con la ayuda de equipos externos.



Para provocar la salida del vapor de agua del recipiente que contiene al humidificador, se ha instalado un ventilador que fuerza la salida del vapor hacia la cámara de ensayos.

La velocidad de giro del ventilador se regula mediante un potenciómetro de 1K Ω . Esta regulación permite caudales desde 0 hasta 500ml/h.

Las características del humidificador y su ventilador asociado pueden verse en el anexo 1.

2.3.2 Iluminación

Para obtener una adecuada visualización de los fenómenos en la cámara de ensayos, se emplea una fuente de iluminación propia utilizando lámparas que funcionan con leds y sustentas estas mediante tubo flexo que permite mayor flexibilidad en la colocación del foco de luz.

2.3.3 Panel de control

Con el objetivo de poder maniobrar los diferentes elementos que participan en el proceso (ventiladores, humidificador, e iluminación.) se dispone de un panel de mando donde están ubicados los elementos de control. El panel, está compuesto principalmente por los interruptores de alimentación de cada uno de los ventiladores, del humidificador y de la iluminación. Cada elemento indicado ha sido regulado mediante un potenciómetro que mejora su maniobrabilidad.

Los ventiladores de impulsión de aire, se regulan mediante potenciómetros bobinados de 50 Ω y una potencia de disipación de 5 W. Esto permite variar la velocidad en cada ventilador desde 0 a 3100 rpm.

La regulación, tanto del ventilador de impulsión del vapor de agua, como de la iluminación, se realiza con sendos potenciómetros de carbón de 100 Ω y una disipación de corriente de 1 W.

Para conocer en todo momento los valores de tensión cada uno de los ventiladores se han colocado mini voltímetros que informan del voltaje de trabajo, con este dato y midiendo la intensidad consumida se puede obtener la potencia

absorbida en cada ventilador, pudiendo establecer una relación entre la potencia consumida y la velocidad del aire en la cámara de ensayo para cada objeto analizado (Se adjuntan característica en el anexo 1).

2.4 Fuente de alimentación

La mayoría de los equipos empleados, necesitan para su funcionamiento voltajes en continua de diferentes valores. Para suministrar estas tensiones se ha reutilizado una fuente de alimentación de continua, procedente de un PC, con rangos de trabajo de 24, 12, 9, 5 y 3 Vdc y una potencia de 210 W.

Las alimentaciones empleadas en este trabajo son las siguientes:

Tensión (V)	2	1	3
Cantidad	1	2	1

Tabla 2: Tensiones utilizadas.

3. ENSAYOS

Una vez construido el túnel de viento, se verifica su correcto funcionamiento contrastando las pruebas experimentales realizadas en el interior de la cámara de ensayos, con los estudios teóricos validados por la bibliografía existente sobre la circulación del aire alrededor de los objetos [4]. Para ello se realizan los siguientes ensayos:

-Estudio del comportamiento del flujo del aire alrededor de un cilindro disponiendo de un flujo bidimensional.

-Estudio del comportamiento del flujo del aire alrededor de una esfera disponiendo de un flujo tridimensional.

3.1 Flujo bidimensional alrededor de un cilindro

El primer ensayo, se realiza utilizando un cilindro y un flujo de aire bidimensional. De la diferente bibliografía existente se obtiene la curva



característica de la evolución del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds [4]. Ver figura 8

En este caso se trabaja con los siguientes valores de las magnitudes principales:

Magnitud	Unidad
Velocidad del aire	Va=0-3.5 m/s
Viscosidad del aire	$\mu=1,83 \times 10^{-5}$ N s/m ²
Presión atmosférica	P= 1 atm
Temperatura amb.	T=25 °C
Densidad del aire	$\rho=1,21$ kg/m ³
Diámetro cilindro	d=40 mm
Nº de Reynolds	Re= 100-10 ⁴
Coeficiente arrastre	Cd= 0.8-3

Tabla 3: Magnitudes principales del ensayo del cilindro en flujo bidimensional

Para las magnitudes que se proponen y la variación de velocidad del aire entre 0-3 m/s se obtiene el siguiente rango de trabajo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (1)$$

Dando valores a la velocidad en la expresión (1) se obtienen los resultados de la tabla 4, donde se observa que los valores del número de Reynolds quedan comprendidos entre 10² y 10⁴.

Para comprobar el funcionamiento del túnel construido, se trabaja con el rango de valores de la gráfica de la figura 8.

Con estas premisas se realizan los siguientes pasos:

1º) Medir la fuerza de arrastre (*D*) de manera experimental en la cámara de ensayos mediante la balanza de precisión.

2º) Calcular el coeficiente de arrastre (*Cd*):

$$D = \frac{C_d \cdot V^2 \cdot A \cdot \rho}{2} \Rightarrow$$

$$C_d = \frac{2 \cdot D}{V^2 \cdot A \cdot \rho} \quad (2)$$

3º) Realizar una tabla y su correspondiente gráfica con los valores obtenidos, en la que se muestra el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds ($C_d=f(Re)$).

4º) Por último comparar los valores obtenidos con los de la gráfica teórica (figura 8) y comprobar si existe similitud entre ambas.

3.2 Flujo tridimensional alrededor de una esfera

En este segundo ensayo, se utiliza una esfera y un flujo de aire tridimensional. De la bibliografía se obtiene la curva característica de la evolución del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds [2].

Manteniendo las mismas indicaciones que se han seguido para el ensayo del cilindro, se comienza con la cuantificación de los valores de las magnitudes que se van a utilizar.

Magnitud	Unidad
Velocidad del	Va=0-3.5 m/s
Viscosidad del	$\mu=1,83 \times 10^{-5}$ N
Presión	P= 1 atm
Temperatura	T=25 °C
Densidad del	$\rho=1,21$ kg/m ³
Diámetro	d=55 mm
Nº de Reynolds	Re= 10 ² -10 ⁴
Coeficiente	Cd= 0.4-4

Tabla 4: Magnitudes principales del ensayo de la esfera en flujo tridimensional

Para los valores indicados y siguiendo los pasos del apartado anterior, se obtienen los valores de *Re* en función de la velocidad, comprendidos entre 10² y 10⁴.

Finalmente se obtienen los resultados de la fuerza de arrastre y del coeficiente de arrastre. Ver figura 9

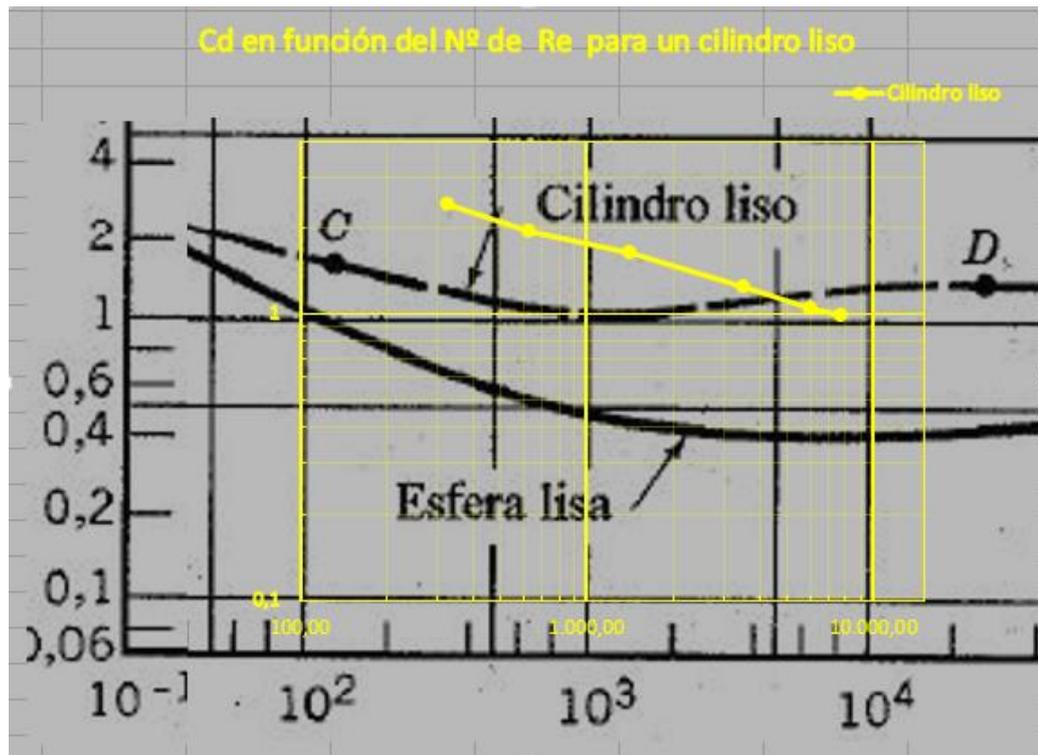


Figura 8: Coeficiente de arrastre en función del Nº de Re para un cilindro liso. Comparación de la gráfica teórica con la obtenida.

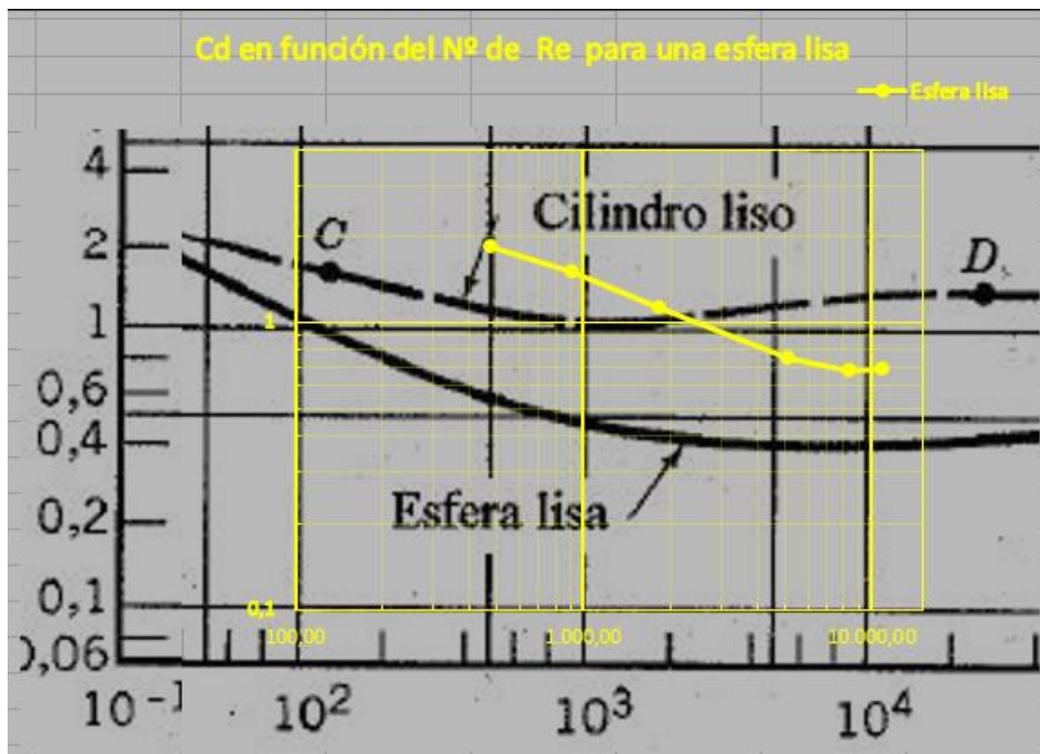


Figura 9: Coeficiente de arrastre en función del Nº de Re para una esfera lisa. Comparación de la gráfica teórica con la obtenida.

3.1 Flujo de aire alrededor de objetos

En este apartado se trata de visualizar los fenómenos que se producen en diferentes objetos, cuando son rodeados por un fluido en movimiento. Cabe esperar que en las visualizaciones aparezcan efectos como los que se indican en la figura 10 y que están corroborados por fundamentos teóricos y experimentales [1].

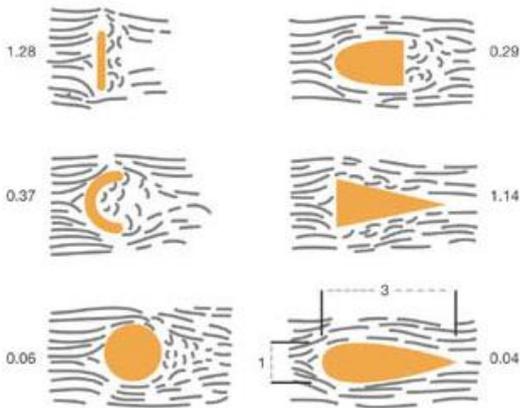


Figura 10: Posibilidad de los fenómenos a visualizar con el equipo construido.

Las imágenes que a continuación se exponen reflejan algunos de los resultados obtenidos. Las velocidades de aire empleadas con el fin de obtener una mejor visualización en las fotografías, han sido valores comprendidos entre 0,5 y 1 m/s.



Figura 11: Desprendimiento de capa límite para una $v=0,6$ m/s y un diámetro de la esfera de 55 mm



Figura 12: Desprendimiento de capa límite para una $v=1$ m/s y un diámetro de la esfera de 55 mm



Figura 13: Desprendimiento de capa límite para una $v=1,5$ m/s y un diámetro de la esfera de 55 mm



Figura 14 y 15: Desprendimiento de vórtices para una $v=0,5$ m/s y un diámetro de cilindro de 40 mm

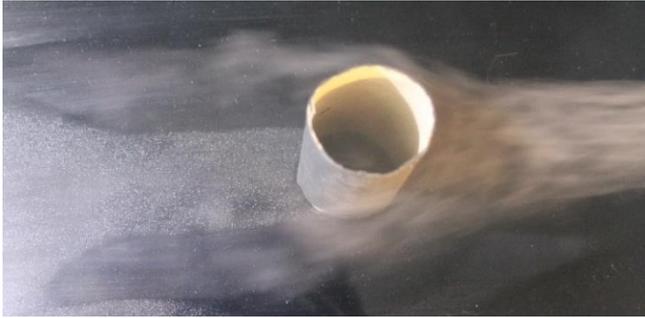


Figura 16: Velocidad $v=1$ m/s y un diámetro de cilindro de 40 mm.



Figura 17: Perfil alar Velocidad $v=0.5$ m/s. Longitud 100 mm, ancho 40 mm.



Figura 18: Visualización de las calles de Von Kármán.
 $V=0.5$ m/s. Diámetro= 40 mm.

Las siguientes imágenes muestran una serie de fotografías continuas, tomadas con un intervalo de 0,4 s entre cada una de ellas.

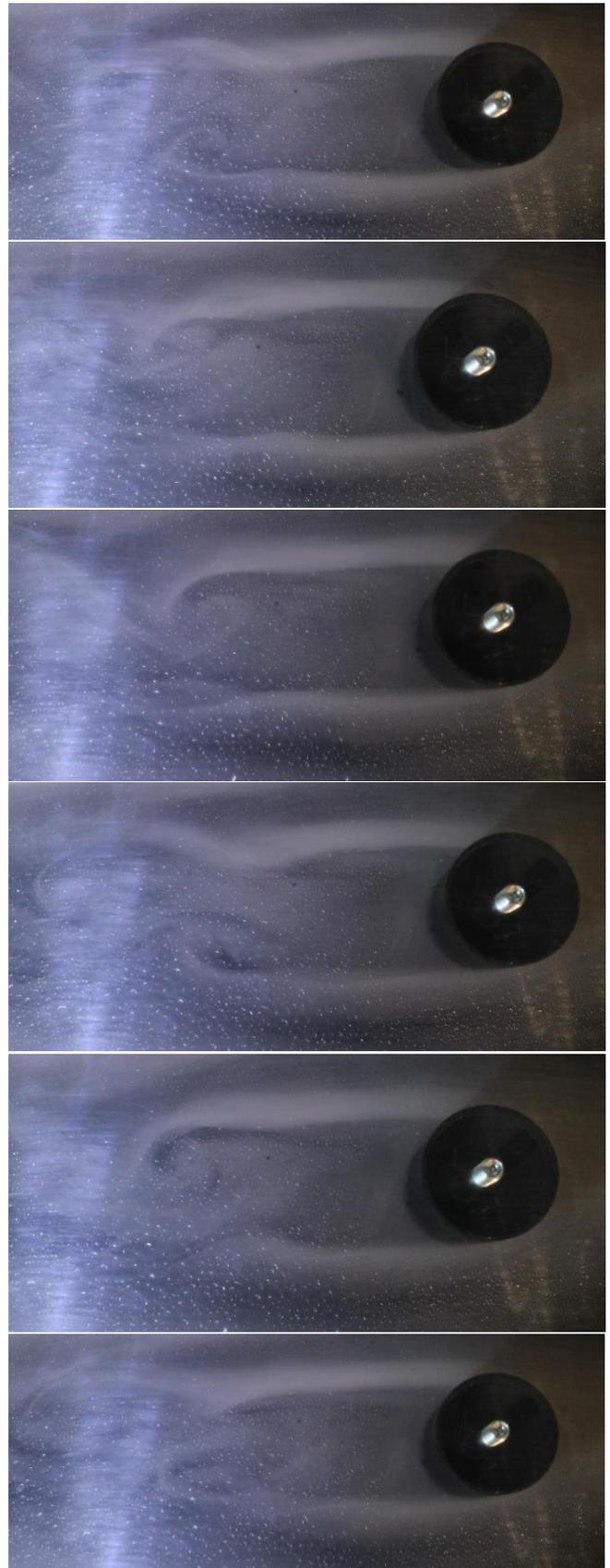


Figura 19: Visualización de secuencia de las calles de Von Kármán. $V=0.5$ m/s. Diámetro= 40 mm.



4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos inicialmente propuestos, los cuales tenían un fondo formativo y la pretensión de ayudar a futuros alumnos en la visualización de una materia no siempre fácil de entender, atendiendo esto además, con unos recursos económicos y productivos limitados, se puede concluir, que los objetivos alcanzados, a la vista de los resultados, han sido los inicialmente establecidos, siendo posible visualizar algunos de los comportamiento de los fluidos en su circulación alrededor de los objetos como por ejemplo:

- Estelas generadas por los diferentes objetos.
- Comportamiento aerodinámico.
- Desprendimiento de vórtices.
- Capa límite
- Calles de Von Kármán
- Medida de velocidad
- Medida de fuerza.
- Etc.

Este trabajo, no obstante, podría considerarse un punto de partida a futuras actuaciones de mejora y perfeccionamiento que sería posible acometer.

5. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que hacen más fácil el camino hacia el conocimiento.

REFERENCIAS

- [1] I. Prada y Noriega, El tunel del viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula I, Anales de Mecánica y Electricidad, Asociación de Ingenieros del ICAI, Madrid, Nov-Dic (2006, Madrid: Asociación de Ingenieros del ICAI, 2006.
- [2] José González Pérez, Katia M^a Argüelles Díaz, Rafael Ballesteros Tajadura, Raúl Barrio Perotti, Jesús Manuel Fernández Oro, Principios de Mecánica de Fluidos, Oviedo: Servicio Publicaciones Universidad de Oviedo, 2010.
- [3] A. Crespo Martínez, Mecánica de Fluidos, Madrid: Paraninfo, 2010.
- [4] R. L. Mott, Mecánica de fluidos, Mejioco: Pearson educación, 2006.



ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS UTILIZADOS



ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA

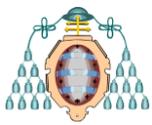
Descripción	Características
<u>Estructura</u>	Tablero de madera aglomerado de 5 mm de espesor
	Tablero de contrachapado de 5 mm de espesor
	Patas regulables
<u>Cámara de ensayos</u>	Planchas de metacrilato de 5 mm de espesor
	Angular de aluminio de 10 mm de ala
	Angular de PVC de 20 mm de ala

ELEMENTOS DE IMPULSIÓN

Se utilizan para la impulsar el aire 4 ventiladores de las características indicadas

Descripción	Características
Equipo	Ventilador
Fabricante	Sunon
Modelo	KD1212PMS1-6A
Gas aplicable	Aire
Alimentación	12 Vdc
I.máxima	0.56 A
Potencia	6.8 W
Velocidad	3100 rpm
Caudal	0.051m ³ /s
Presión de aire	7,87 mmH ₂ O
Ruido	42 dBA





ELEMENTOS DE GENERACIÓN DE VAPOR

Para la generación de vapor se emplea un humidificador y un pequeño ventilador para mover el aire.

Humidificador

Descripción	Características
Equipo	Cabeza nebulizada
Fabricante	Croled
Modelo	BL500
Caudal	500 ml/h
Entrada adaptador	AC100-240V
Salida adaptador	DC 24V 1A
Mejor posición agua	5cm



Ventilador

Descripción	Características
Equipo	Ventilador
Fabricante	Titan
Modelo	TFD-8025M12X
Gas aplicable	Aire
Alimentación	12 Vdc
Imáxima	0.11 A
Potencia	1.32 W
Velocidad	2500 rpm
Caudal	0.0118m ³ /s
Presión de aire	2,03mm-H ₂ O
Ruido	28 dBA





ESTABILIZADOR DE FLUJO

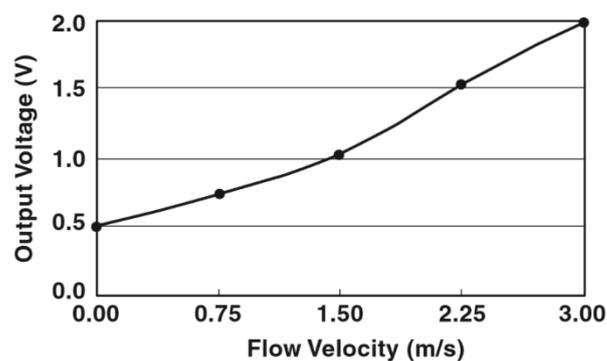
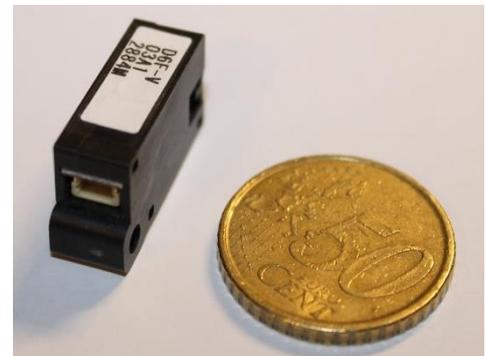
Para estabilizar el flujo se ha empleado una placa alveolar de policarbonato extruido con las siguientes características.

Descripción	Características
Equipo	Estabilizador flujo
Fabr. Material	Koscon Industrial
Modelo	Multiwall LL 2W/6 - 6
Espesor	6 mm
Material	Placa alveolar de policarbonato
Paso	6 mm

SENSOR DE VELOCIDAD.

Características del sensor encargado de medir la velocidad del aire en el túnel.

Descripción	Características
Equipo	Sensor de velocidad
Fabricante	Omron
Modelo	D6f-v03a12884w
Gas aplicable	Aire
Rango de medida	De 0 a 3 m/s
Alimentación	Desde 3.15 hasta 9.45 vdc
Voltaje de salida	3 Vdc
Voltaje de salida	Desde 0.5 hasta 2 vdc
Consumo max	15 mA (sin carga y 3.3 Vdc)





BALANZA DE PRECISIÓN.

Descripción	Características
Equipo Rango	Balanza de precisión
Fabricante	
Modelo	
Medida max	500 gr
Rango de medida	0.01 gr
Alimentación	3.3 Vdc



ILUMINACIÓN.

Descripción	Características
Equipo	Tira de Leds
Fabricante	Croled
Modelo LED	3528 SMD
Nº de Leds	60 Ud/m
Potencia	0.08 W/Led
Voltaje de entrada	12 Vdc,
Lúmenes	0.066 Lm/Led
Imax	2 A
Duración	50.000 horas aprox.
Longitud	5 m





ELEMENTOS DE CONTROL

Se adjuntan imágenes de los elementos mencionados.



Potenciómetro 50 Ω .



Interruptor



Mini voltímetro



Potenciómetro 100 Ω .