



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecánica de Fluidos

Área de Mecánica de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga

Autor: Pedro C. Martos Martín

Directores: Luis Parras Anguita

José Francisco Velázquez Navarro

Titulación: Ingeniería Industrial

MÁLAGA, junio de 2015

Índice general

1	INTRODUCCIÓN.....	8
	1.1 Objetivo.....	9
2	TÚNELES DE VIENTO	10
	2.1 Clasificación de los túneles de viento	10
	2.2 Túnel de viento de la Universidad de Málaga.....	12
	2.2.1 Elementos principales	13
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	18
	3.1 Técnicas de medición de la velocidad.....	18
	3.1.1 Medida de velocidad mediante la presión.....	18
	3.1.2 Medida de velocidad mediante partículas.....	19
	3.1.3 Medida mediante Hilo Caliente	21
	3.2 Turbulencia	22
	3.3 Descripción del equipo experimental.....	23
	3.4 Características generales de la calibración.....	29
	3.4.1 Función de transferencia	30
	3.4.2 Funcionamiento del software de DANTEC®	31
	3.4.3 Velocidad real del flujo.....	32
4	RESULTADOS	36
	4.1 Calibración del equipo de medida.....	36
	4.1.2 Calibración Hilo Industrial	41
	4.1.3 Calibración Hilo de alta precisión	43
	4.1.4 Calibración Tubo de Pitot	47
	4.2 Lecturas y calibración del túnel	50
	4.2.1 Relación Consigna-Velocidad	51
	4.2.2 Variaciones a lo largo de la sección.....	59
5	CONCLUSIONES.....	64
6	LÍNEAS FUTURAS.....	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	68

Índice de figuras

Figura 1 : Esquema de funcionamiento de un túnel de circuito abierto (a) y un túnel de circuito cerrado (b)	11
Figura 2 : Vista Isométrica del Túnel de Viento	13
Figura 3: Fotografía de los cuatro ventiladores instalados en el Túnel de Viento	14
Figura 4: Fotografía de los deflectores presentes en los codos del Túnel de Viento	15
Figura 5: Fotografía del panal de abeja interior de la cámara de acondicionamiento de flujo presente en el Túnel de Viento.	15
Figura 6: Fotografía de la contracción presente en el Túnel de Viento	16
Figura 7: Fotografía de la cámara de ensayo presente en el Túnel de Viento	17
Figura 8: Funcionamiento Tubo de Pitot	19
Figura 9: Esquema Anemometría Láser	20
Figura 10: Medición de la velocidad por partículas	20
Figura 11: Esquema Hilo Caliente	21
Figura 12: Diferentes tipos de Hilos Calientes según las direcciones posibles de medida	22
Figura 13: Fotografía ejemplo de Turbulencia	23
Figura 14: Air Velocity/airflow Transmitter – CTV 200	24
Figura 15: Esquema de la sonda de hilo caliente proporcionada por KIMO [®] Instruments	25
Figura 16: Preassure Transmitter CP200	25
Figura 17: Fotografía del sistema de presión utilizado	26
Figura 18: Fotografía del Calibrador de Hilo Caliente 54H10 de DANTEC [®]	27
Figura 19: Esquema del Hilo Caliente de alta precisión	28
Figura 20: Fotografía del Tubo de Pitot instalado en el Túnel de Viento.	29
Figura 21: Vista de la Hoja de Cálculo proporcionada por DANTEC [®]	31
Figura 22: Esquema de tobera convergente y fotografía del Calibrador	33
Figura 23: Comparación del modelo utilizado con respecto al software de DANTEC [®]	35
Figura 24: Relación velocidad mostrada por pantalla por CTV200 respecto a la velocidad real	39
Figura 25: Relación entre la presión diferencial y la velocidad real a la salida del calibrador	40
Figura 26: Calibración del Hilo Caliente Industrial	42
Figura 27: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Hilo Caliente Industrial.	43
Figura 28: Fotografía de la sonda recta instalada en el calibrador	44
Figura 29: Fotografía de la sonda perpendicular instalada para las mediciones en el Túnel de Viento	44
Figura 30: Calibración del Hilo Caliente de alta precisión	45
Figura 31: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Hilo Caliente de alta precisión	47
Figura 32: Calibración del Tubo de Pitot	48
Figura 33: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Tubo de Pitot	49
Figura 34: Fotografía de la disposición del hilo caliente de KIMO [®] Instruments y el parámetro d, que indica la distancia a la pared desde la que se mide la velocidad del flujo de aire.	50
Figura 35: Relación Consigna-Velocidad para el Hilo Caliente industrial	52
Figura 36: Relación Consigna-Turbulencia para el Hilo Caliente Industrial	53
Figura 37: Análisis temporal en el Hilo Caliente Industrial para una consigna del 15%	53
Figura 38: Relación Consigna-Velocidad para el Hilo Caliente de alta precisión	54
Figura 39: Relación Consigna-Turbulencia para el Hilo Caliente de alta precisión	55
Figura 40: Análisis temporal del Hilo Caliente de alta precisión para una consigna del 10%	56
Figura 41: Relación Consigna-Velocidad para el Tubo de Pitot	56

<i>Figura 42: Interpolación de Pitot a bajas velocidades</i>	57
<i>Figura 43: Interpolación de Pitot a altas velocidades</i>	57
<i>Figura 44: Relación Consigna- Turbulencia para el Tubo de Pitot</i>	58
<i>Figura 45: Representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.</i>	59
<i>Figura 46: Velocidad en el túnel respecto a la profundidad del ensayo</i>	60
<i>Figura 47: Velocidad en el Túnel respecto a la profundidad del ensayo. Variaciones temporales incluidas.</i>	62
<i>Figura 48: Variación de la velocidad con respecto a la consigna para cada profundidad</i>	63
<i>Figura 49: Variación en tanto por ciento de la velocidad para cada distancia</i>	63
<i>Figura 50: Representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.</i>	64
<i>Figura 51: Imagen ampliada de la representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.</i>	65
<i>Figura 52: Fotografía DANTEC[®] Traverse System</i>	67
<i>Figura 53: Esquema de pieza para anclaje Traverse-Hilo</i>	67

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Ejemplo de tabla de realizada para calcular la velocidad de salida</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2: Relación entre la velocidad que muestra por pantalla el lector CTV200 respecto a la velocidad real a la que llega el flujo del aire.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3: Velocidad a diferentes profundidades</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4: Influencia de las oscilaciones temporales a distinta profundidad para una consigna del 30%</i>	<i>61</i>

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento es el proyecto final de carrera de la titulación *Ingeniería Industrial* realizado por *Pedro C. Martos Martín*, dirigido por los profesores *Luis Parras Anguita* y *José Francisco Velázquez Navarro*.

El Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Aerohidrodinámica de Vehículos de la Universidad de Málaga se presenta como una infraestructura capaz de responder adecuadamente tanto a cuestiones fundamentales como aplicadas en las áreas de Mecánica de Fluidos, Aerodinámica Civil, Ingeniería Aeronáutica y Aeroespacial, Ingeniería del Transporte, Energías Renovables y Tecnología Medioambiental, entre otras. Dichas actividades pueden ser tan variadas como, por ejemplo, determinar el comportamiento aerodinámico de un coche de carreras, de un vehículo aéreo no tripulado o de un tren de alta velocidad, estudiar los vórtices que se generan en los extremos de los perfiles alares o visualizar inestabilidades y turbulencia cerca de superficies sólidas para su control, o incluso determinar la influencia de la orografía en los vientos dominantes en una zona con el fin de elegir la mejor ubicación de un parque eólico o un aeropuerto minimizando así su impacto medioambiental. Por otro lado, otra aplicación importante de los túneles de viento es la calibración de sensores que midan la velocidad del aire tales como anemómetros o tubos de Pitot, entre otros. Para realizar todo este tipo de tareas con alta precisión es necesario un túnel de viento con baja turbulencia y un perfil de velocidad uniforme en la sección de ensayo.

Ante la problemática logística de la instalación del Túnel de Viento en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Málaga, fue montado y configurado en una nave industrial que cumplía las características espaciales necesarias. En la primera instalación del citado túnel se realizó la puesta a punto y calibración de los componentes e instrumentación. Al realizarse el traslado a los ya adaptados talleres de la Escuela y realizar algunas modificaciones, se observa que los datos obtenidos en las pruebas del túnel de viento no se corresponden con los valores esperados y por lo tanto surge la necesidad de una nueva calibración.

1.1 Objetivo

El objetivo principal del presente proyecto será la calibración del Túnel Aerodinámico del Laboratorio de Aerodinámica de Vehículos de la Universidad de Málaga. Para ello se pondrán en funcionamiento los sistemas de Hilo Caliente de media y alta precisión y el Tubo de Pitot con el fin de poder medir velocidades con precisión y poder así caracterizar el flujo de aire en la zona de medida de los experimentos, obteniendo su perfil de velocidad y la intensidad de turbulencia, todo ello para distintas condiciones de funcionamiento. Para lograrlo, se calibrarán los equipos de medida y se estudiará la correlación entre la velocidad del aire y las consignas de funcionamiento de los ventiladores que impulsan al fluido.

2 TÚNELES DE VIENTO

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta de investigación desarrollada para medir y comprobar el efecto real que el viento ejerce sobre el objeto o modelo que se analiza. En el túnel de viento, el objeto o modelo permanece estacionario mientras se propulsa un flujo de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada alrededor de él, simulando así las condiciones que experimentará en una situación real. Al obtener unas características determinadas, con un nivel de fiabilidad aceptable, se pueden considerar unas condiciones de trabajo, impuestas por el usuario, de interés ingenieril.

2.1 Clasificación de los túneles de viento

Los túneles de viento se clasifican en función de varios aspectos:

- Por la circulación del aire en su interior:
 - Abierto: Se toma el aire directamente de la atmósfera y después de hacerlo pasar por la cámara de ensayo se devuelve nuevamente a ella.
 - Cerrado: El aire circula varias veces por la cámara, recuperando por medio de un difusor su energía.

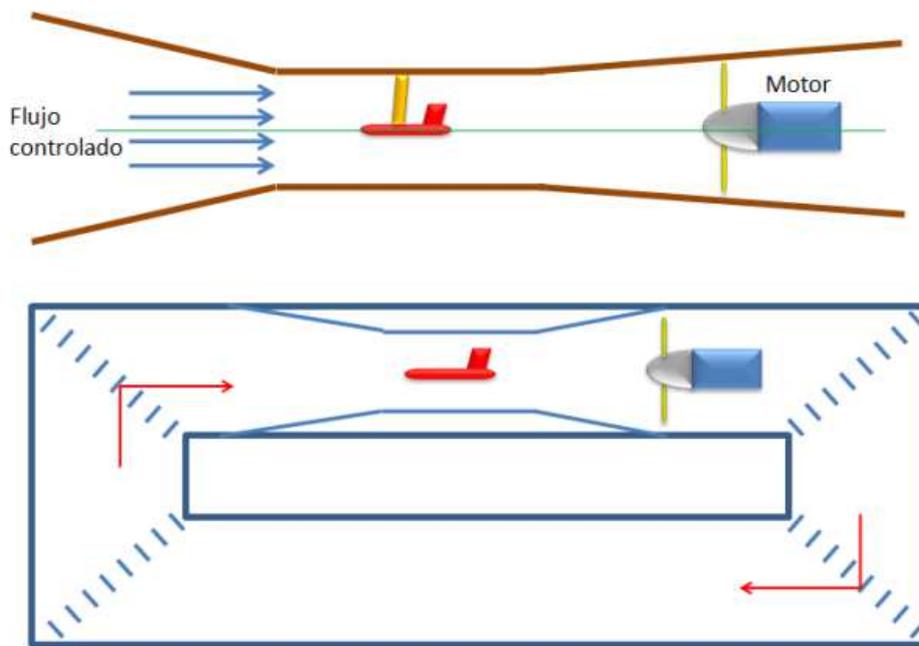


Figura 1 : Esquema de funcionamiento de un túnel de circuito abierto (a) y un túnel de circuito cerrado (b)

El tipo de túnel de viento de circuito abierto es el más simple, ocupa menos espacio y es más barato. Entre los principales inconvenientes se encuentran una menor velocidad del flujo, la posibilidad de obstrucciones por agentes externos y los posibles cambios en las condiciones del flujo de trabajo. Es de reseñar que pese a no necesitar tanto espacio en sí mismo, necesita estar en una estancia de gran tamaño para evitar que la calidad del aire de salida no afecte significativamente al de entrada. En un caso extremo, un túnel de circuito abierto se puede considerar como un túnel de circuito cerrado con un retorno de aire no conducido (ver Figura 1).

- Por la velocidad del flujo en su interior
 - Subsónico. Velocidades menores que la del sonido
 - Supersónico. Velocidades mayores que la del sonido.

La velocidad del sonido en la atmósfera terrestre (a 20 °C con 50% de humedad relativa y a nivel del mar) es de 343m/s. Dado que la velocidad del sonido varía según el medio, se suele utilizar el número de Mach 1 para indicarla. Así, un cuerpo que se mueve en el aire a Mach 2 avanza a dos veces la velocidad del sonido en esas condiciones.

2.2 Túnel de viento de la Universidad de Málaga

El elemento principal de soporte de los experimentos llevados a cabo que ha permitido la realización del presente proyecto es un Túnel de Viento propiedad de la Universidad de Málaga. El Túnel Aerodinámico presentado es de tipo subsónico de baja velocidad, de circuito cerrado, y su puesta a punto fue financiada por el Proyecto de Excelencia P08-TEP-3867 de la Consejería de Innovación Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía. A continuación se resumen las principales características de la instalación.

- Velocidad del Aire: 2-36 m/s
- Intensidad de turbulencia máxima: 5%
- Posicionamiento del modelo: 0-200°
- Valores Límite Balanza 6 componentes: $F_x = F_y = 32 \text{ N}$ $F_z = 100 \text{ N}$
 $M_x = M_y = M_z = 2.5 \text{ N}\cdot\text{m}$
- Técnicas de visualización: Smoke Wire y Difusor de Humo
- Otros recursos disponibles: LDA, PIV, CTA, Pitots
- Dimensiones principales: 19 x 6,4 x 2,8 m

2.2.1 Elementos principales

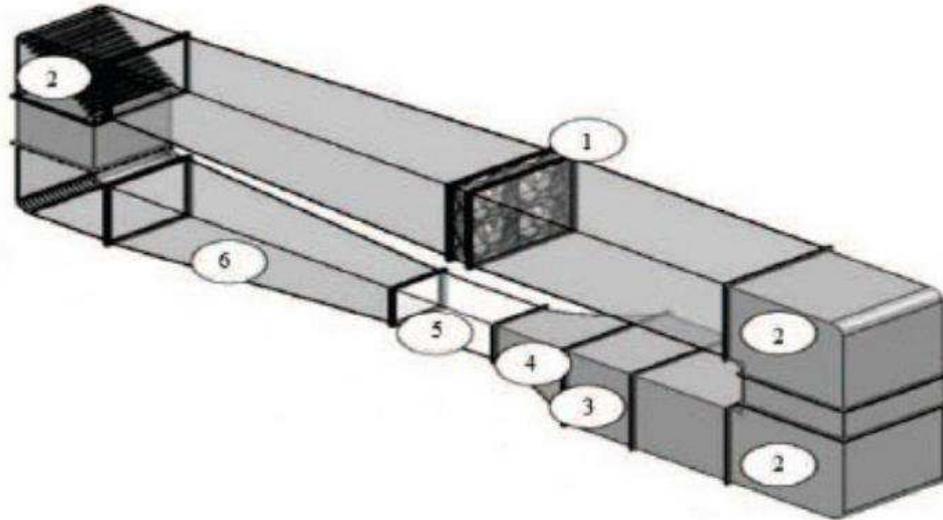


Figura 2 : Vista Isométrica del Túnel de Viento

En la Figura 2 se pueden distinguir las distintas partes que componen el túnel de viento.

1. Ventiladores.
2. Deflectores.
3. Cámara de acondicionamiento de flujo.
4. Contracción.
5. Cámara de ensayos o sección de prueba.
6. Difusor.

- El flujo de aire es impulsado por cuatro ventiladores axiales acoplados a cuatro motores eléctricos de velocidad variable (ver Figura 3).



Figura 3: Fotografía de los cuatro ventiladores instalados en el Túnel de Viento

Las características de la instalación de los ventiladores de potencia son las siguientes:

- Potencia instalada: 4x15 Kw.
- Caudal máximo: 4x72000 m³/h.
- Nivel presión sonora (por ventilador): 95dB(A).
- Máxima velocidad en la sección de prueba: 36 m/s

Los ventiladores están limitados a funcionar al 65% de la potencia máxima por restricciones de la red eléctrica.

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

- Los deflectores son codos con álabes guía que minimizan la pérdida de carga. Una fotografía de los deflectores se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Fotografía de los deflectores presentes en los codos del Túnel de Viento

- La cámara de acondicionamiento de flujo es una parte de vital importancia del túnel de viento y se compone de dos partes, el panel de abeja y la malla de acero inoxidable.

La combinación de estos dos elementos da uniformidad al flujo previamente acelerado y reduce las turbulencias.



Figura 5: Fotografía del panel de abeja interior de la cámara de acondicionamiento de flujo presente en el Túnel de Viento.

El panel de abeja (mostrado en la Figura 5) está formado por celdas muy pequeñas con una longitud mucho mayor que el diámetro de dichas celdas. Con esto se consigue

que el flujo vaya en una sola dirección. Por tanto, se eliminará toda componente de la velocidad que no sea la del flujo principal. Como la turbulencia es un movimiento caótico y en tres dimensiones, sólo existirán fluctuaciones del tamaño de dicho panel de abeja, siendo la componente de velocidad longitudinal la más importante.

Una de las modificaciones fundamentales que se realizaron en la cámara de acondicionamiento, que dieron pie a la necesidad de una nueva calibración, fue instalar una nueva malla de un tamaño de hueco libre mayor que la que había antes instalada. De la misma forma, antes se usó una malla metálica de 1m^2 , cosida para ocupar los 4m^2 , y ahora se usa una malla soldada por puntos. Esta malla tiene como finalidad tomar el flujo levemente fluctuante que sale del panel de abeja, y obligarle a pasar por un espacio mucho más pequeño, reduciendo considerablemente la turbulencia.

- La contracción es la parte del túnel de viento encargada de acelerar el flujo a la sección de ensayo. Para ello, toma el flujo casi sin turbulencia que sale de la malla metálica, que tiene una componente predominantemente longitudinal, y lo acelera a una velocidad proporcional a la relación de áreas. Esto favorece que la velocidad sea casi uniforme en la sección de ensayo y disminuye fuertemente la poca turbulencia que quedara. Un detalle de la contracción puede observarse en la Figura 6.



Figura 6: Fotografía de la contracción presente en el Túnel de Viento

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

- La cámara de ensayos es donde se sitúa el objeto de estudio y donde se llevan a cabo las mediciones de los experimentos. Se considera un volumen de control de régimen cuasiestacionario, donde se ven aseguradas las propiedades deseadas del fluido, y donde el perfil de velocidad del flujo se puede considerar uniforme. Tiene la forma de un paralelepípedo de longitud 4 m y consta de una compuerta de acceso frontal transparente, de manera que se pueda supervisar el correcto desarrollo de los experimentos. El objeto de estudio se sitúa en la mitad de la longitud de ésta, facilitando así que las mediciones no se ven afectadas por las irregularidades del flujo a la entrada de la cámara. Se muestra la cámara de ensayo del Túnel Aerodinámico de la Universidad de Málaga en la Figura 7



Figura 7: Fotografía de la cámara de ensayo presente en el Túnel de Viento

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se introducirán al lector las diversas técnicas de medición de la velocidad comúnmente usadas en los túneles aerodinámicos, así como la descripción del equipo con el que se han llevado a cabo los experimentos realizados.

3.1 Técnicas de medición de la velocidad

Uno de los apartados más relevantes a la hora de hacer una calibración viene dado por el método empleado en la medida de la velocidad. Existen una gran variedad de técnicas con las que llevar a cabo este fin. Dentro de las más importantes se encuentran las medidas mediante la presión, mediante el cambio de resistencia en hilos, mediante la técnica láser doppler y mediante imágenes de partículas. En las siguientes secciones se desarrollarán brevemente los principios de funcionamiento de cada una de ellas.

3.1.1 Medida de velocidad mediante la presión

Gracias a la ecuación de Bernouilli se puede obtener la velocidad por medio de la presión. Un claro ejemplo de equipo que funcione basándose en este principio son los tubos de Pitot (ver Figura 8) El Tubo de Pitot consiste en un tubo generalmente metálico, con una abertura enfrentada al flujo de aire. Se mide la presión entre dicha abertura y una superficie estática, de forma que se puede obtener de forma sencilla la velocidad del fluido:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

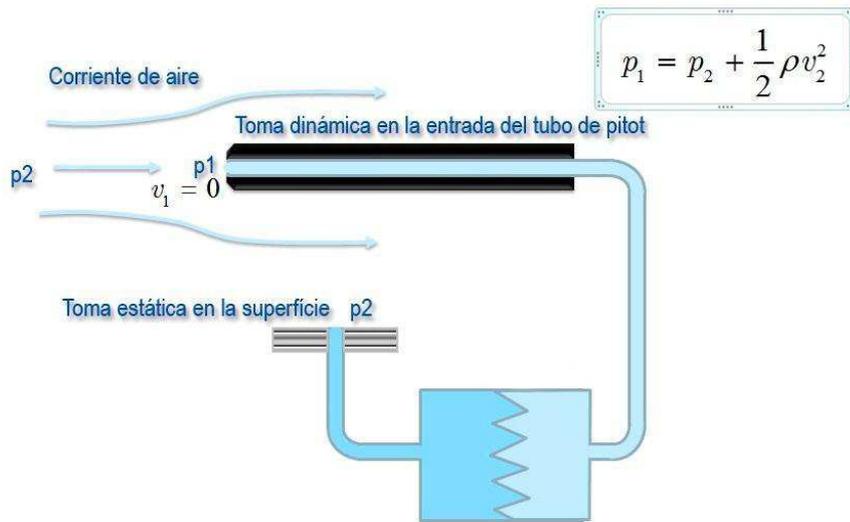


Figura 8: Funcionamiento Tubo de Pitot

Además de por la facilidad a la hora de obtener los resultados deseados, la principal ventaja de los Tubos de Pitot es que pueden trabajar en un rango amplísimo de velocidades sin que sus componentes sufran ningún deterioro. Por estos motivos, son muy utilizados en aviación.

3.1.2 Medida de velocidad mediante partículas

Entre los métodos basados en partículas se encuentran métodos basados en efectos ópticos como el *Laser Doppler Anemometry* (LDA). En este caso, se mide la intersección de las partículas. Los datos son analizados en un ordenador para obtener la velocidad (ver Figura 9).

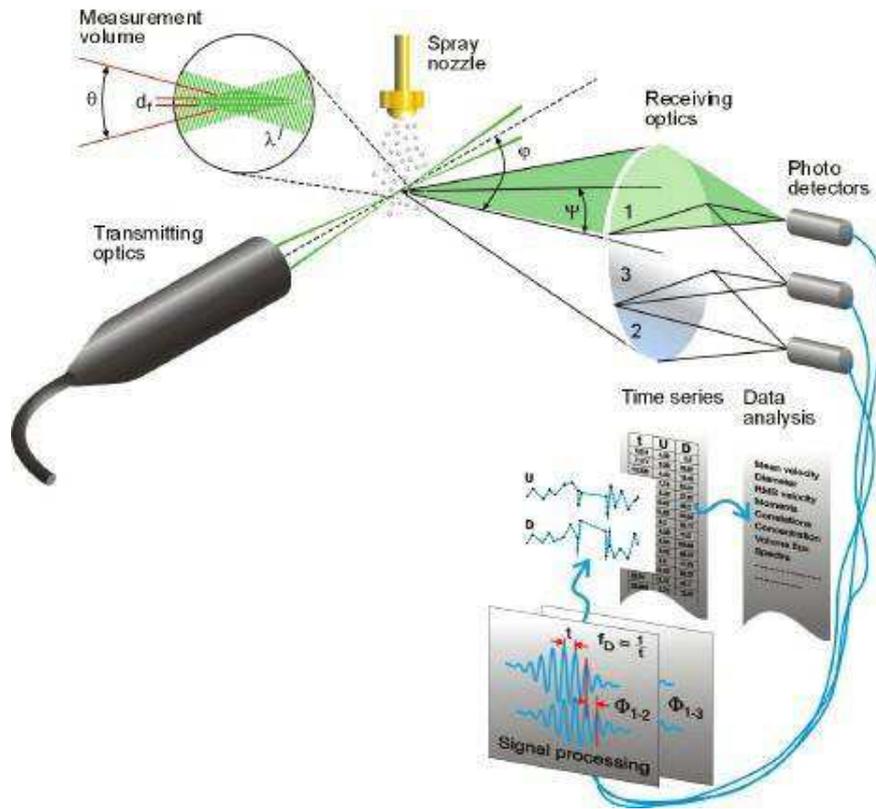


Figura 9: Esquema Anemometría Láser

El Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad de Málaga cuenta con un LDA con el que se han realizado numerosas mediciones gracias a su alta precisión.

Por otro lado existen métodos basados en imágenes de las propias partículas, que se conocen como *Particle Image Velocimetry* (PIV).

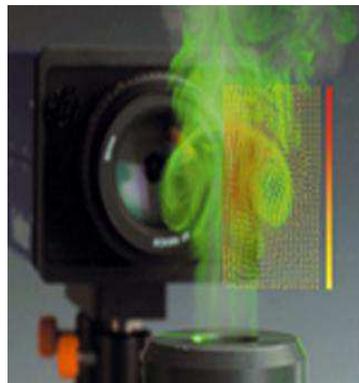


Figura 10: Medición de la velocidad por partículas

Se suelen tener una o varias cámaras enfocando al fluido, cuyas imágenes se procesan para obtener finalmente la velocidad (ver Figura 10).

3.1.3 Medida mediante Hilo Caliente

Otro método fundamental, en el que se centra el presente proyecto, es el método de la Anemometría de Hilo Caliente. Este método se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un pequeño hilo metálico por el que circula una corriente eléctrica (ver Figura 11). Dicha resistencia eléctrica varía con la temperatura a la que opera el hilo. Al ser atravesado por un fluido cambia su temperatura, modificando por tanto su resistencia. En la configuración más común, llamada CTA (*Constant Temperature Anemometry*), se mantiene constante la temperatura del hilo, midiendo la tensión necesaria para conseguir la intensidad que hace que el hilo opere a la temperatura constante.

Dicho hilo caliente es muy fino, logrando que su inercia térmica sea muy pequeña. Esto le permite tener una respuesta rápida en frecuencia y así detectar variaciones rápidas de la velocidad del fluido consiguiendo medir con precisión la turbulencia en el fluido.

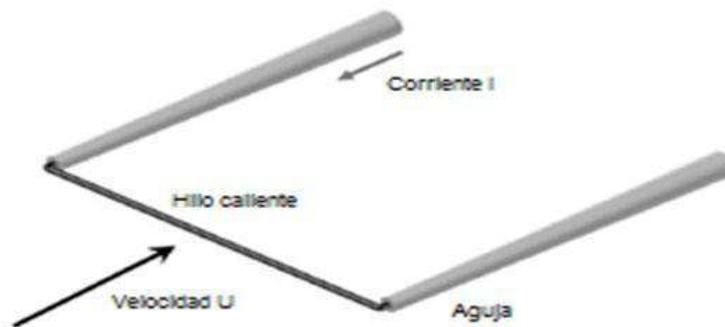


Figura 11: Esquema Hilo Caliente

Existen varias ventajas de la CTA sobre otros métodos de medida de la velocidad. Por un lado, cabe destacar que se puede obtener la salida como un voltaje analógico, lo que implica una pérdida de información mínima. Por otro lado, la altísima resolución temporal con la que cuenta hace de la CTA ideal para medir

variaciones. Por último pero a tener en cuenta, son sistemas de medida más económicos en comparación con los sistemas de medición mediante partículas.

Las sondas pueden estar formadas por uno o varios hilos, en función de las direcciones que son capaces de medir (ver Figura 12). Desde febrero de 2015 el Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad de Málaga cuenta con una sonda de tres hilos para medir simultáneamente en 3D, aunque debido al elevado coste y a la fragilidad de la sonda en el presente proyecto se trabajará con los hilos convencionales.

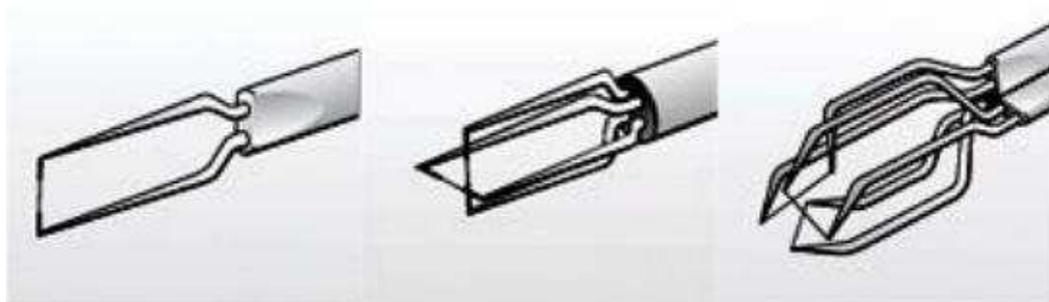


Figura 12: Diferentes tipos de Hilos Calientes según las direcciones posibles de medida

3.2 Turbulencia

En términos de dinámica de fluidos, turbulencia o flujo turbulento es un régimen de flujo caracterizado por cambios espacio-temporales rápidos de presión y velocidad. La turbulencia es una rápida fluctuación de suficiente frecuencia como para ser captada por manómetros y balanzas. De cara a entender el comportamiento del flujo de un fluido para diseñar y evaluar vehículos, motores, bombas, etc. el estudio de la turbulencia es esencial, por tanto, dentro de los experimentos realizados con el Túnel de Viento, la turbulencia cobra una gran importancia.

La intensidad de turbulencia es equivalente a la relación entre la desviación típica de la velocidad media respecto a dicha velocidad media (en porcentaje). Por tanto variará en función del punto de trabajo en el que nos encontremos (ver Figura 13). La no uniformidad de la velocidad media suele estar relacionada con un mal diseño de las partes internas, ya sea en los álabes deflectores de las esquinas o en un ángulo excesivo del difusor o simplemente al mal funcionamiento de alguno de los ventiladores.

Los Túneles con perfiles de velocidad uniformes y baja turbulencia son idóneos para calibrar sensores de velocidad como anemómetros y tubos de Pitot entre otros. Dichas calibraciones, se hacen preferiblemente en túneles con una intensidad de turbulencia muy baja, normalmente por debajo del 0.4%. Además, un túnel que presente excesiva turbulencia puede dar pie a que los resultados obtenidos en un experimento estén desvirtuados y no se correspondan con la realidad.



Figura 13: Fotografía ejemplo de Turbulencia

En el presente proyecto se estudiará la turbulencia con un equipo de anemometría de hilo caliente de alta precisión. Los resultados determinarán el nivel de turbulencia para distintas velocidades en el punto medio de la sección de la cámara de ensayos, así como a distintas profundidades, teniendo una caracterización muy precisa del comportamiento del flujo obtenido.

3.3 Descripción del equipo experimental

Para la realización de los experimentos se ha utilizado una serie de instrumentación técnica con las que cuenta el Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad de Málaga. A continuación se describen las principales.

- **Air velocity/Airflow Transmitter - CTV200**



Figura 14: Air Velocity/airflow Transmitter – CTV 200

El dispositivo CTV 200 de KIMO[®] Instruments mostrado en la Figura 14 incluye una sonda con un hilo caliente que proporcionará los datos de entrada a nuestro dispositivo. Es un hilo de características estándar, de inferior calidad de los hilos de precisión y que junto al dispositivo CTV200 alcanzan un rango de medición de 0-20 m/s. Dispone de dos salidas digitales que se muestran simultáneamente en el display de nuestra unidad, pudiendo elegir entre velocidad del aire, temperatura y caudal. Además, dispone de dos salidas analógicas que proporcionan la intensidad y el voltaje correspondientes a los datos mostrados en el display.

Las características de la sonda con la que trabajamos son las siguientes:

- Material de la sonda : acero inoxidable 316-L
- Diámetro de la sonda: 8 mm
- Temperatura de trabajo: de 0 a +50 °C
- Cable: PVC de 4,8 mm de diámetro, longitud 2 m.

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

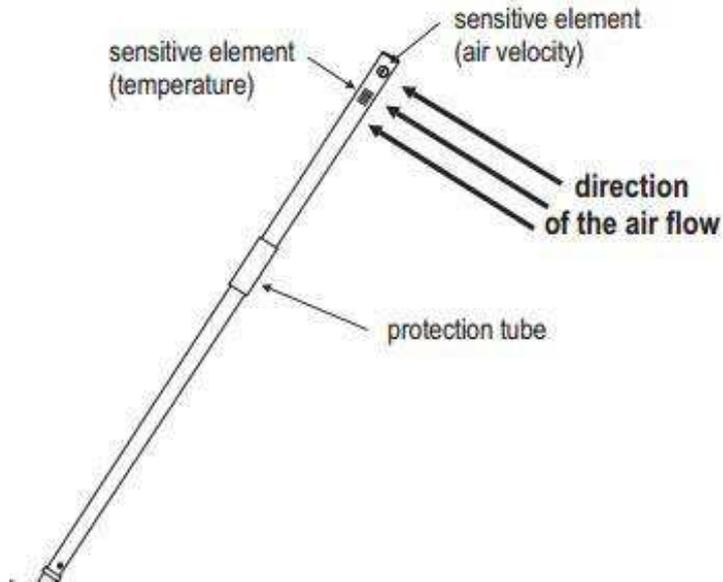


Figura 15: Esquema de la sonda de hilo caliente proporcionada por KIMO® Instruments

Es fundamental que el hilo quede perpendicular al flujo de aire para obtener los resultados deseados. Un detalle de la sonda utilizada se muestra en la Figura 15

- **Pressure Transmitter CP200**

La unidad CP200 de KIMO® Instruments mostrada en la Figura 16 nos muestra la diferencia de presión medida entre sus dos terminales.



Figura 16: Pressure Transmitter CP200

Funciona con aire y gases nobles. Se utilizarán los tubos de silicona de 8 mm diámetro proporcionados por el fabricante para interconectar los terminales con la zona de medida.

- **Sistema de Presión**

Se utilizará un tanque de aire comprimido (ver Figura 17) para suministrar el fluido al calibrador de hilo caliente con las siguientes características:

- Capacidad: 100L
- Contenido: Aire/agua
- Temperatura: -10/+60 C
- Presión máxima: 10 BAR
- Presión test: 15 BAR



Figura 17: Fotografía del sistema de presión utilizado

- **Calibrador de Hilo Caliente 54H10**



Figura 18: Fotografía del Calibrador de Hilo Caliente 54H10 de DANTEC°

El calibrador 54H10 (ver Figura 18) nos proporciona un flujo de aire en forma de chorro libre fácilmente accesible para las sondas. Con este equipo se obtendrán las funciones de transferencia de los hilos calientes que se utilicen para las mediciones.

- **Hilo Caliente de alta precisión**

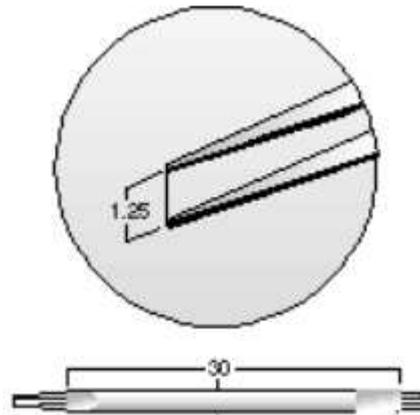


Figura 19: Esquema del Hilo Caliente de alta precisión

Se trata de un hilo caliente de $5\ \mu\text{m}$ de diámetro, de 1.25 mm de longitud de tungsteno recubierto de platino. El hilo está soldado directamente a la clavija y toda la longitud del hilo funciona como sensor. Son probetas recomendadas para todas las medidas con flujo unidimensional de baja o media intensidad de turbulencia. Un ejemplo del tipo de sonda utilizada se muestra en la Figura 19.

- **Tubo de Pitot**

Se utilizará un Tubo de Pitot de 59 cm de longitud y 60 mm de diámetro. Dispone de dos salidas externas convencionales que conectaremos a nuestra unidad CP200 para medir las correspondientes diferencias de presión. La sonda de presión quedará instalada a través de una abertura realizada en la superficie inferior del túnel de viento y con su orificio enfrentado al flujo como se muestra en la Figura 20



Figura 20: Fotografía del Tubo de Pitot instalado en el Túnel de Viento.

3.4 Características generales de la calibración

Para llevar a cabo la calibración se utilizará el calibrador 54H10 de DANTEC[®]. Este calibrador nos proporciona un flujo de aire en forma de chorro libre, fácilmente accesible para las sondas. Puede trabajar en dos modos diferentes: Modo Dos-Puntos y Modo Continuo.

El modo Dos-Puntos se basa en el hecho de que hilos similares tienen funciones de transferencias parecidas. En este modo, se establece la velocidad del chorro libre en dos velocidades preestablecidas, una ‘baja’ y otra ‘alta’. Introduciendo los datos obtenidos en el software proporcionado por el fabricante nos muestra la función de transferencia actual. Tiene como principal limitación que se dispone únicamente de dos puntos para mostrar la función de transferencia, lo que implica menor precisión que en el modo Continuo.

El modo Continuo permite trabajar en cualquier velocidad entre 0,5 y 60 m/s, pudiendo de este modo añadir más puntos para realizar una calibración más fina. El

principal inconveniente es que se necesita realizar una modificación en las conexiones internas de nuestro calibrador –que previamente habían sido llevadas a cabo siguiendo el manual proporcionado por el fabricante-.

Por todo lo citado anteriormente, se trabajará con el modo Continuo para calibrar los hilos calientes que utilicemos.

Un factor interesante que hay que tener en cuenta son las evoluciones temporales de la velocidad del chorro libre. Por supuesto las variaciones dependerán del valor de la velocidad que se establezca en cada punto y siempre existirá un error intrínseco en la medición, pero se recuerda que la Anemometría de Hilo Caliente que se lleva a cabo necesita que el parámetro de velocidad sea constante y estable. Esto lleva implícito que el equipo de presión que suministre el aire al calibrador debe garantizar que la variación de velocidad obtenida sea mínima.

3.4.1 Función de transferencia

El cambio en la velocidad del flujo que atraviesa la sonda, implica un cambio en el voltaje en el hilo caliente de trabajo. La función de transferencia usada para convertir la señal de la sonda en velocidad es de la siguiente forma:

$$V = D0 + D1 \cdot E + D2 \cdot E^2 + D3 \cdot E^3 + D4 \cdot E^4 + D5 \cdot E^5 \quad (3.1)$$

Donde los coeficientes polinómicos van desde D0 a D5 y la E [V] hace referencia a la señal que aporta la sonda y la V [m/s] a la velocidad del aire.

Una función de transferencia para un hilo caliente necesita al menos la obtención de diez puntos de trabajo para hacer un buen ajuste. El fabricante del calibrador facilita una hoja de cálculo, que se explicará con más detalle en los siguientes apartados, que proporciona una función de transferencia de quinto orden a partir de los datos medidos.

Con esto se obtendría el valor de la velocidad del aire en función del voltaje proporcionado por el hilo caliente con el que se trabaja. Esto lleva a un problema, ya que no siempre tenemos acceso a la lectura del voltaje a no ser que tengamos constantemente conectado un voltímetro a la salida analógica que llega a nuestro CTV200. Como vimos en el apartado de instrumentación, este mismo dispositivo nos

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

permite mostrar por pantalla la velocidad del aire, pues internamente realiza el cálculo siguiendo la (3.1) en función del voltaje que recibe con unos parámetros preestablecidos de fábrica. Estudiaremos más adelante la fiabilidad de los resultados mostrados por pantalla.

En la bibliografía actual también es habitual encontrar la función de transferencia con el parámetro de tensión como variable dependiente de la velocidad, ya que te permite estudiar qué voltaje de salida te proporcionaría el hilo para un valor conocido de velocidad y caracterizar de una manera más intuitiva cada sonda.

3.4.2 Funcionamiento del software de DANTEC®

El calibrador de DANTEC® 54H10 viene acompañado de una hoja de cálculo (ver Figura 21) por medio de la que podemos conocer la función de transferencia del hilo que vayamos a utilizar. Se inserta la presión barométrica [kPa], la temperatura exterior [°C] y la resistencia interna en el equipo de calibración [Ohm].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Hot-Wire Calibrator 54H10.											
2	Continuous mode											
3												
4	In this mode the Hot-Wire Calibrator operates at any velocity that can be set with the needle valve. Please refer to											
5	manual for details preparing for this mode. After every point please copy the contents of the frame to the next page.											
6												
7	Insert values											
8	Calibration date	01. nov. 2015				Nozzle		1 -				
9	Barometric pressure	101.3 kPa				Nominal size		120 mm ²				
10	Thermistor resistance	10,000 Ω				Reset Standard Values		Clear Table				
17	Actual temperature	25.0 °C										
19	Probe type	55P11		Paste Values								
20	Probe ID	#1				Transfer function					Add more points!	
22	Differential pressure	0.598 Pa		Next point ~0.6 Pa		Constant D0					+3.000000E+00	
24	Velocity	1.001 m/s		Next point 1 m/s		D1					+4.000000E+00	
26	Bridge voltage,	E1 1.4000 V		Test: --- m/s		E2 1.4000		E3 1.4000			D2	+5.000000E+00
											D3	+6.000000E+00
											D4	+7.000000E+00
											D5	+8.000000E+00

Figura 21: Vista de la Hoja de Cálculo proporcionada por DANTEC®

Cabe destacar que la resistencia interna del calibrador es el valor que toma como referencia la hoja de cálculo DANTEC® para calcular la temperatura a la que se encuentra el flujo en el interior del depósito.

Se abre la entrada de aire al calibrador, creando así una diferencia de presión y la consiguiente circulación del aire que saldrá al exterior en forma de chorro libre, donde tenemos situado nuestro hilo caliente. Se deja unos segundos hasta que el sistema se estabilice y se introducen en la hoja de cálculo los valores de velocidad, resistencia, temperatura, presión diferencial y voltaje que proporciona el equipo de lectura CTV200 y CP200. Este proceso se repite con seis puntos o más, incrementando los valores de presión diferencial en el rango establecido para completar nuestra función de transferencia. Con este procedimiento, el software de DANTEC® muestra el valor de la velocidad real a la que llega el flujo a nuestro hilo caliente para cada punto ensayado.

3.4.3 Velocidad real del flujo

Gracias a la experimentación realizada en el laboratorio, se han llegado a dos conclusiones. La primera de ellas corresponde a cómo DANTEC® mide la temperatura de remanso en el interior del calibrador. Después de un análisis interno del software y la correspondiente comprobación en diversos ensayos, se llega a la conclusión de que la temperatura es obtenida mediante la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{c1 + c2 * \ln(R) + c3 * \ln(R)^3} - 273,15 \quad (3.2)$$

Siendo:

Con:

C1= 1,12822E-03

R en Ohm

C2= 2,34289E-04

T en °C

C3= 8,69243E-08

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

La segunda conclusión importante es que la velocidad del chorro libre que muestra el software de DANTEC[®] no es más que la aplicación del problema teórico de la salida de aire a través de una tobera convergente perfectamente diseñada, coincidiendo con estos resultados hasta la tercera cifra decimal calculando la velocidad en m/s (ver Figura 22).

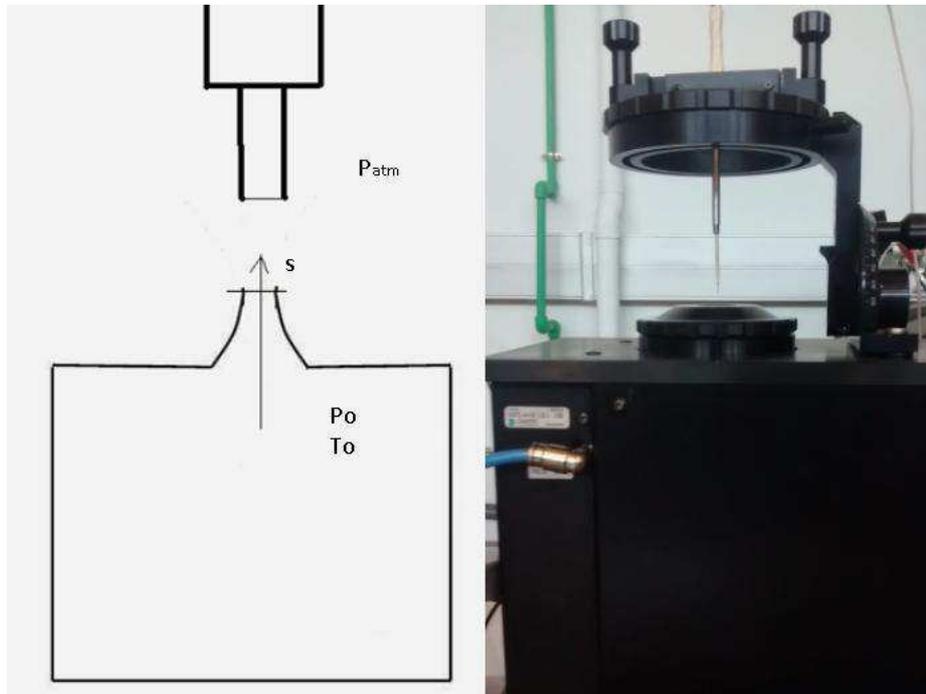


Figura 22: Esquema de tobera convergente y fotografía del Calibrador

Por este motivo, se decide continuar con la obtención de datos dejando al margen el software de DANTEC[®] y calculando los valores de velocidad de manera independiente resolviendo las ecuaciones que gobiernan el problema de una tobera convergente para un flujo isoentrópico que la atraviesa:

$$\frac{p_0}{p_s} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_s^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (3.3)$$

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_s^2, \quad (3.4)$$

Siendo:

T_0 : Temperatura en el interior del depósito.

P_0 : Presión en el interior del depósito.

T_s : Temperatura a la salida.

P_s : Presión a la salida.

M_s : Número de Mach.

γ : coeficiente de dilatación adiabática de valor 1.4.

Se supone que el sistema va a funcionar en modo estacionario, es decir, la presión se va a mantener constante en el interior del depósito. Además conocemos que la presión a la salida de la tobera es la presión atmosférica ($p_s = p_{atm}$) podemos obtener de la ecuación (3.3) el valor numérico de Mach a la salida, para posteriormente introducirlo en la ecuación (3.4). De este modo, obtenemos la temperatura a la salida. Además conocemos las siguientes relaciones:

$$M_s = \frac{v_s}{c_s}, \quad (3.5)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma p_{atm}}{\rho}}, \quad (3.6)$$

$$\rho = \frac{p_{atm}}{R_g T_s}, \quad (3.7)$$

Siendo:

c_s : velocidad del sonido en la sección de salida.

R_g : constante del aire de valor 287 (J/KgK).

Si se despeja el valor de la velocidad que se desea obtener:

$$V_s = M_s \sqrt{\gamma R_g T_s} \quad (3.8)$$

Cabe destacar que lo que podemos regular es la presión interior del depósito, ya que la temperatura interior será la que se tenga en función del aire aspirado. Con este procedimiento, podemos conocer la velocidad del chorro libre a la salida del difusor, lo que a partir de ahora llamaremos ‘velocidad real’.

En la Figura 23: Comparación del modelo utilizado con respecto al software de DANTEC° Figura 23 se representa el modelo utilizado respecto a los cálculos obtenidos con la hoja de cálculo del software de DANTEC®. Tal y como se observa, coinciden perfectamente con los resultados de utilizar las ecuaciones para una tobera convergente, por lo que el modelo presentado es muy fiable.

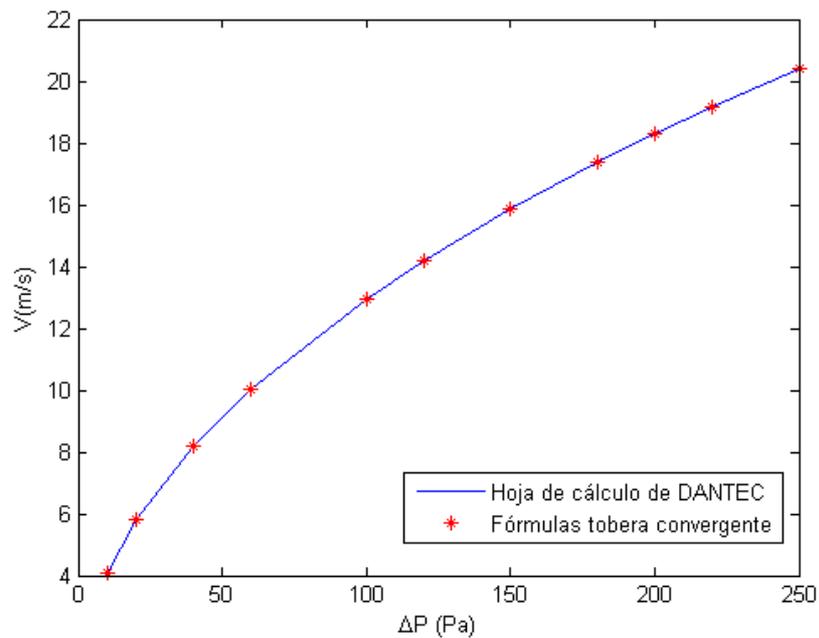


Figura 23: Comparación del modelo utilizado con respecto al software de DANTEC°

4 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la experimentación llevada a cabo en el presente proyecto. La primera parte corresponde a la calibración del equipo de medida utilizado. Posteriormente, con el equipo ya calibrado se procederá a realizar las pertinentes mediciones para caracterizar el flujo en la cámara de ensayo y establecer la relación entre la velocidad obtenida y la consigna dada a los ventiladores del túnel.

4.1 Calibración del equipo de medida

El equipo de medida con el que se realiza la experimentación en el presente proyecto serán dos Hilos Calientes con diferentes rangos de precisión y un Tubo de Pitot. Como objetivo de primer orden se busca la relación entre la respuesta de los hilos calientes ante los cambios de velocidad del flujo que los atraviesa, es decir, la función de transferencia propia para cada hilo. En algunos casos esta relación es dada por el fabricante a la hora de la adquisición del equipo, pero el deterioro de los materiales y el cambio de condiciones generales alteran dichos valores iniciales. Igualmente, se calibrará el Tubo de Pitot para poder realizar ensayos en el túnel a grandes velocidades. Se recomienda hacer una nueva calibración antes de llevar a cabo un experimento que necesite una alta precisión o que los factores externos, como la presión o la temperatura, difieran en exceso con los valores de la calibración en uso.

El Laboratorio de Aerodinámica de la UMA cuenta con varios hilos calientes, de diferentes características. En primer lugar se llevará a cabo la calibración del hilo montado en el terminal de entrada del equipo CTV200, equipo con el que normalmente se realizan las mediciones experimentales en el Túnel de Viento. Es un hilo de características estándar, de ahí a que reciba sobrenombre de ‘industrial’ para diferenciarlo de los de alta precisión. Tiene una limitación importante, ya que sólo funciona hasta los 20 m/s. El segundo Hilo Caliente que se va a analizar es un hilo con mejores prestaciones cuya señal no llega a un medidor visual de velocidad directamente, sino que sus datos son procesados por una tarjeta externa de adquisición y sus resultados se pueden observar por ordenador.

4.1.1.1 Velocidad mostrada por KIMO® CTV 200

Analizamos la fiabilidad de los datos obtenidos por pantalla de nuestro KIMO® CTV 200, en el caso de no tener un voltímetro a la salida analógica del terminal, pero sí tener acceso visual a lo mostrado por pantalla. Para ello, se decide trabajar con una función que nos permita obtener la velocidad del flujo de aire que atraviesa la sonda en relación a la lectura por pantalla de la velocidad que muestra la CTV200. En el caso ideal, los parámetros de fábrica y los valores de nuestra función coincidirían y no sería necesario ningún ajuste, el valor que leeríamos por pantalla sería la velocidad real del aire.

Desgraciadamente, los coeficientes se establecieron en una primera calibración en fábrica, y no son accesibles para el usuario. El deterioro de los componentes, tanto del equipo de medida como de la sonda en sí, debido al uso y al paso del tiempo hacen que esos parámetros no tengan la precisión que se desea, exigiendo una nueva calibración para el hilo industrial del que disponemos.

Se muestra a continuación un ejemplo de las tablas realizadas:

v_h [m/s]	ΔP [Pa]	T_0 [°C]	R [10^3 Ohm]	M	T_s [°C]	V_s [m/s]
19	162	18.39	13.44	0.0477837	18.266991	16.34
17	127	18.26	13.52	0.04231077	18.1957402	14.47
15	101	18.13	13.60	0.03773372	18.2170711	12.90
11.7	58	17.97	13.70	0.02859670	18.1523808	9.78
9	32	17.96	13.71	0.02124207	18.073732	7.26
6.8	21	17.94	13.72	0.01720837	18.0827604	5.88
5	12	17.92	13.73	0.01300851	18.0901483	4.44
3.6	5	17.91	13.74	0.00839706	18.0958949	2.87
2.5	2	17.91	13.74	0.00531080	18.0983579	1.81
1.6	1	17.89	13.75	0.00375531	18.1991787	1.28
0	0	17.83	13.77	0	18.2	0

Tabla 1: Ejemplo de tabla de realizada para calcular la velocidad de salida

Siendo:

v_h : Velocidad leída por pantalla para el hilo caliente.

ΔP : Diferencia de presión entre la salida del chorro libre y el ambiente.

T_0 : Temperatura de remanso en el interior del calibrador.

R: Resistencia interna del equipo calibrador.

M: Número de Mach.

T_s : Temperatura calculada a la salida del chorro libre.

v_s : Velocidad real del flujo a la salida.

Recordamos que nuestro primer objetivo es relacionar directamente la velocidad que nos muestra por pantalla el lector CTV200, con la velocidad real a la que llega el flujo del aire, pudiendo de este modo relacionar las velocidades medidas entre sí sin pasar por una previa lectura del voltaje de manera manual.

Se han realizado doce ensayos, con medición de diez puntos cada uno en el rango de velocidad leída de 0- 19 m/s. Se decide descartar los seis primeros ensayos debido a ciertas trabas con la estabilización del proceso por problemas en el tanque de suministro de aire comprimido y el equipo de calibración. Con los siete ensayos restantes, se realiza la media de los valores obtenidos. Los valores medios se muestran en la siguiente tabla:

Vh [m/s]	Vreal [m/s]	Error[%]
1.6	1.57	1.875
2.5	2.31	7.60
3.6	3.17	11.94
5	4.50	10.00
6.8	5.88	13.53
9	7.66	14.88
11.7	9.75	16.66
15	12.89	14.06
17	14.65	13.82
19	16.37	13.84

Tabla 2: Relación entre la velocidad que muestra por pantalla el lector CTV200 respecto a la velocidad real a la que llega el flujo del aire.

Como se puede observar, a medida que aumenta la velocidad, aumenta considerablemente el error. Se pretenden ajustar estos puntos a una recta que haga fácil su conversión como se muestra en la Figura 24.

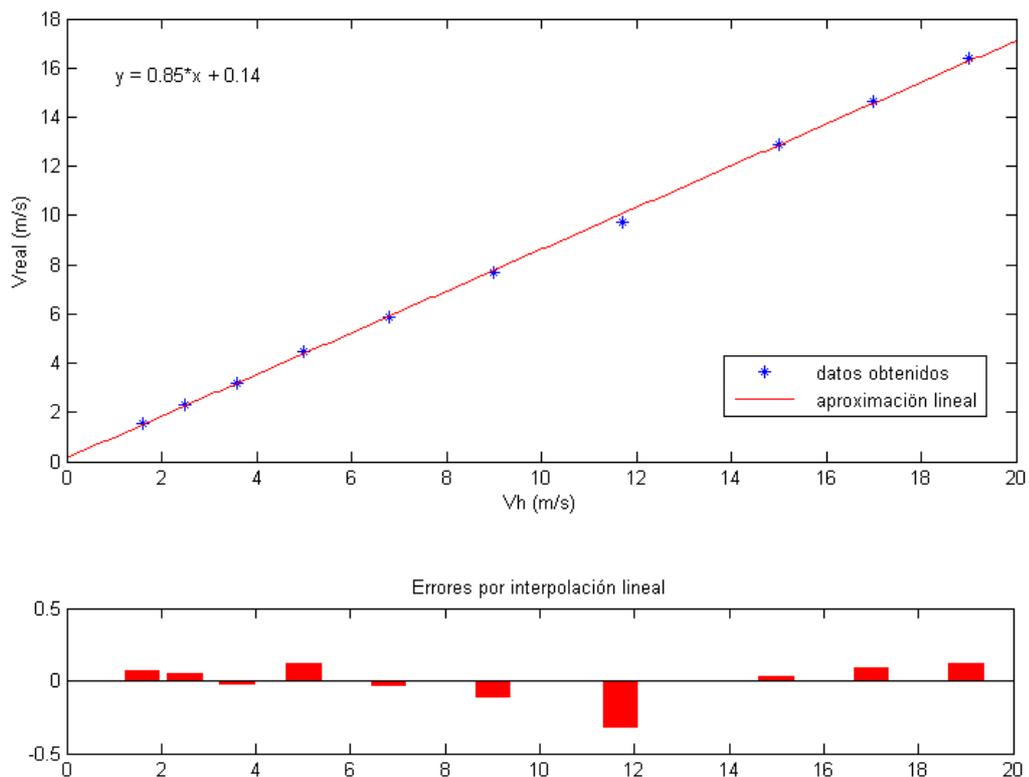


Figura 24: Relación velocidad mostrada por pantalla por CTV200 respecto a la velocidad real

El resultado obtenido es la curva:

$$f(V_{real}) = 0.85 * V_h + 0.14 \quad (4.1)$$

Cabe destacar la importancia de estos datos obtenidos, ya que en este punto podemos decir que tenemos a nuestra disposición el valor real de la velocidad del flujo que llegue a nuestra sonda industrial.

Así mismo, en la Figura 25 se muestra la variación de la velocidad real del flujo de aire con respecto a la variación en la diferencia de presión, útil en el supuesto caso de no disponer de un lector de velocidad pero sí de un lector de presiones diferenciales como el CP200.

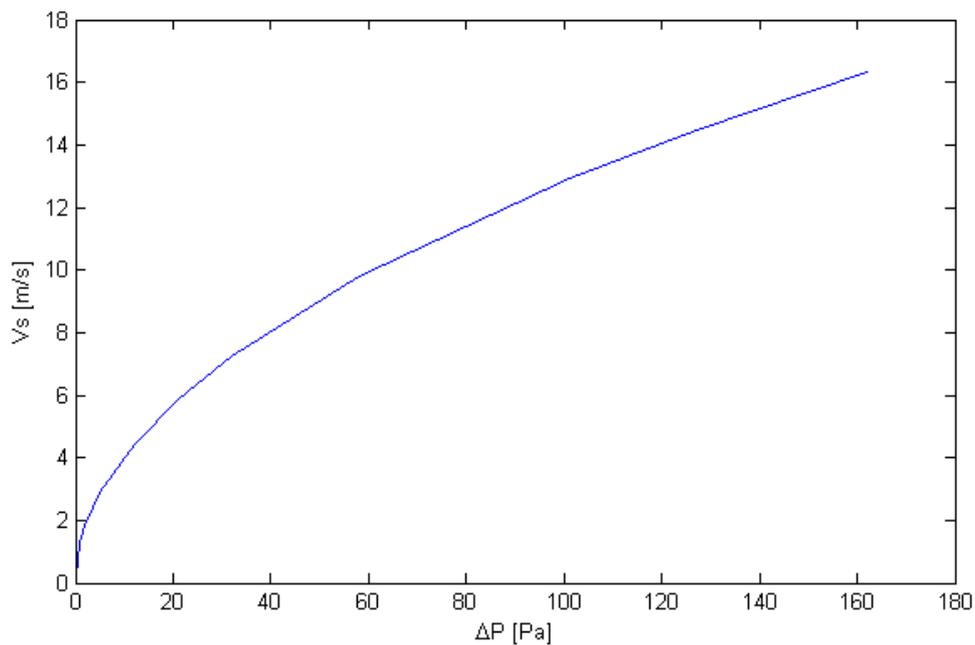


Figura 25: Relación entre la presión diferencial y la velocidad real a la salida del calibrador

4.1.2 Calibración Hilo Industrial

En este punto de la experimentación, se realizaron diversos cambios en el Túnel Aerodinámico de la Universidad de Málaga. Gracias a los proyectos (en desarrollo actualmente) '*Adquisición y adecuación de señales multicanal de los sensores del Túnel de Viento de Aerohidrodinámica de Vehículos de la Universidad de Málaga*' y '*Desarrollo de un sistema de anemometría de hilo caliente para medida simultánea de velocidad y temperatura con un hilo único*' realizados por los alumnos *Enrique Iglesias Melo* y *Antón Gotsulenko Gotsulenko* respectivamente, se ha modificado tanto la electrónica de los dispositivos como la adquisición de datos directa entre el túnel y un nuevo software de control, permitiendo entre otras funciones obtener con facilidad el voltaje de salida de los dispositivos KIMO[®] y hacer mediciones precisas en tiempo real, siguiendo la línea del presente proyecto de independizarse del hardware y software de fabricantes externos.

Para conseguir la relación deseada entre la velocidad medida por la sonda y el voltaje de salida del equipo CTV200, se realizan nuevamente los ensayos necesarios. Siguiendo el mismo procedimiento detallado en el apartado *3.4.3 Velocidad real del flujo*, se calcula la velocidad real del flujo de aire para así conocer con exactitud su función de transferencia. La ventaja fundamental de conocer el voltaje de salida reside en que se conocen los datos puros sin una previa conversión por pantalla (sin pasar por una función interna con los correspondientes parámetros de fábrica), perdiendo de este modo el mínimo de información. Esta información puede ser enviada al ordenador donde se lleva a cabo un control de mayor calidad del flujo que atraviesa la cámara de ensayo.

Se realiza la calibración del Hilo Caliente Industrial tomando diez puntos con sus correspondientes diferencias de presión. Aplicando las ecuaciones (3.3), (3.4) (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8) podemos conseguir la velocidad real para cada punto (ver Figura 26). Simultáneamente, adquirimos los valores del voltaje que se generan en el Hilo Caliente.

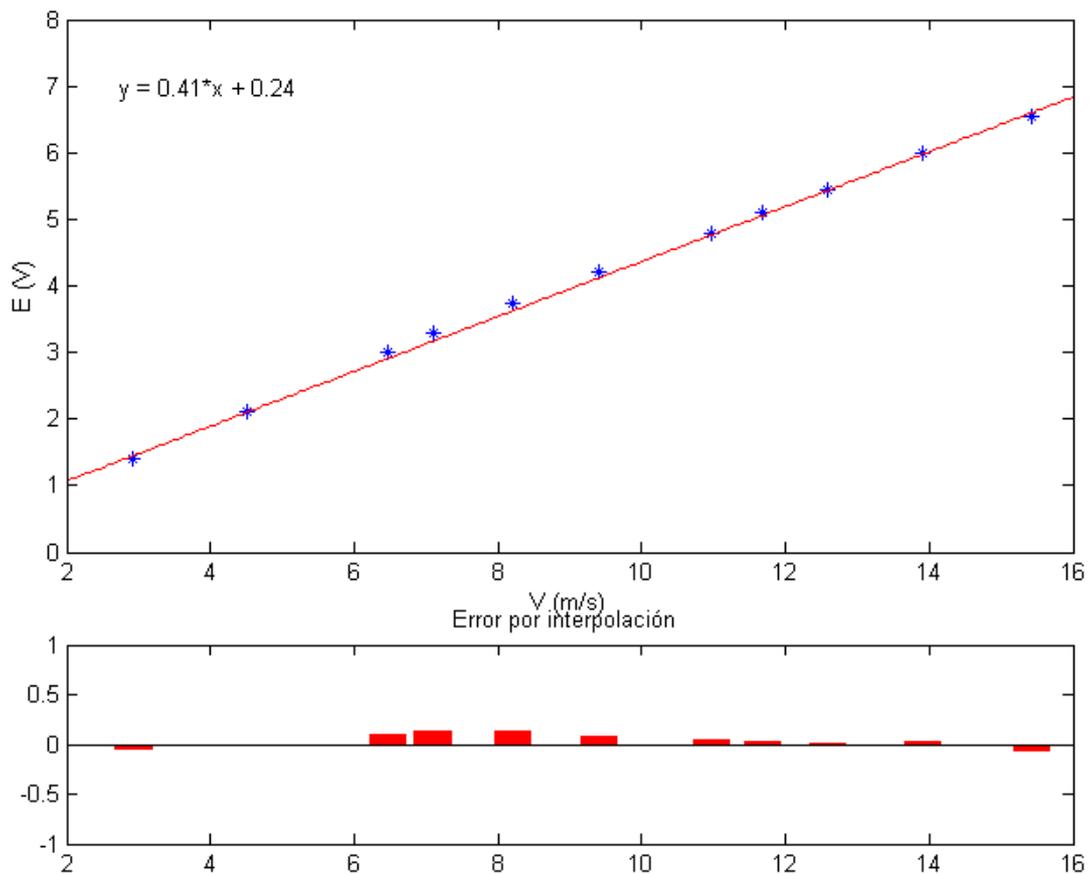


Figura 26: Calibración del Hilo Caliente Industrial

Este hilo según el fabricante tiene un comportamiento lineal, por lo que vamos a hacer una interpolación lineal, dando como resultado la siguiente recta:

$$E=0,41*V +0.24 \tag{4.2}$$

Se analizan las variaciones temporales del voltaje medido según la velocidad que obtenemos a la salida del calibrador. La Figura 27 muestra un detalle de un punto correspondiente a la velocidad en el calibrador de 9.7 m/s:

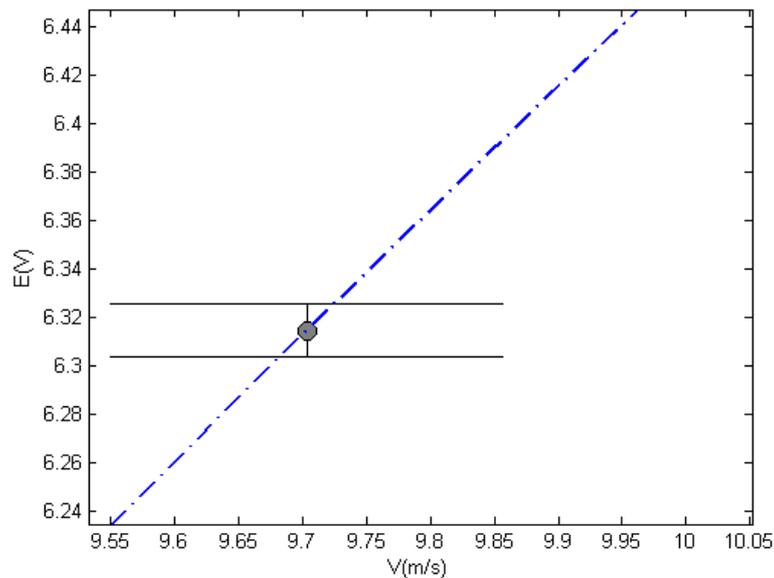


Figura 27: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Hilo Caliente Industrial.

Como se puede observar, la calibración se realiza bajo condiciones de cambio mínimo. La respuesta del hilo caliente oscila con un valor de amplitud del orden de 0,32% sobre el valor de tensión en un punto con una velocidad dada. Esto nos indica las pequeñas variaciones de velocidad que pueda experimentar el chorro libre obtenido y por consiguiente los cambios en el hilo.

4.1.3 Calibración Hilo de alta precisión

La precisión de los valores medidos y por consiguiente de la calibración en sí misma, cobran mayor relevancia en una sonda de alta precisión. En primer lugar hay que detallar que se va a utilizar el Hilo Caliente 55P11 de DANTEC[®]. En concreto, este sensor tiene una resistencia a 20 °C de 3.25 Ohm. Por tanto, en caso de usar un sensor con una resistencia diferente, no serán válidos los resultados aquí obtenidos y será necesario realizar una nueva calibración. La calibración se realizará montando el citado hilo en una sonda de la misma dirección que éste, para que pueda medir el flujo en perpendicular (ver Figura 28).

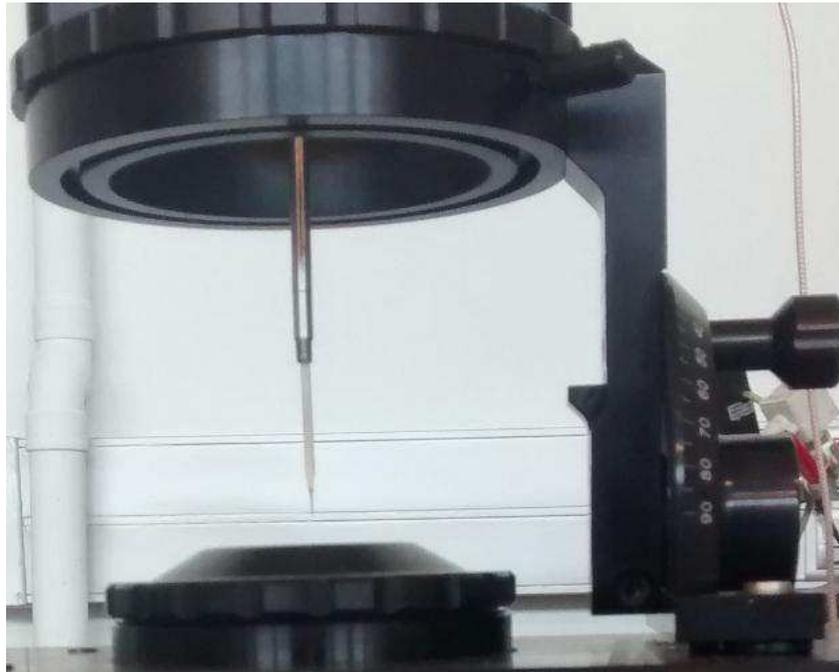


Figura 28: Fotografía de la sonda recta instalada en el calibrador

Cabe destacar que las mediciones en el túnel, se llevarán a cabo con una sonda que forma 90° con la dirección del hilo, para que el flujo incida sobre él de manera perpendicular igual que en la calibración (ver Figura 29). Este cambio de sonda es apto debido a que ambas están fabricadas para que en la conexión exista la misma resistencia ($4,6 \Omega$).



Figura 29: Fotografía de la sonda perpendicular instalada para las mediciones en el Túnel de Viento

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

Se medirán dieciocho puntos según vamos abriendo la válvula del calibrador para provocar una diferencia de presión y por consiguiente un cambio de velocidad en el chorro libre que se obtiene a la salida del calibrador. Aplicando las ecuaciones (3.3), (3.4) (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8) podemos obtener la velocidad real del flujo. Al mismo tiempo, adquirimos los voltios correspondientes para cada velocidad. El resultado obtenido es mostrado en la Figura 30:

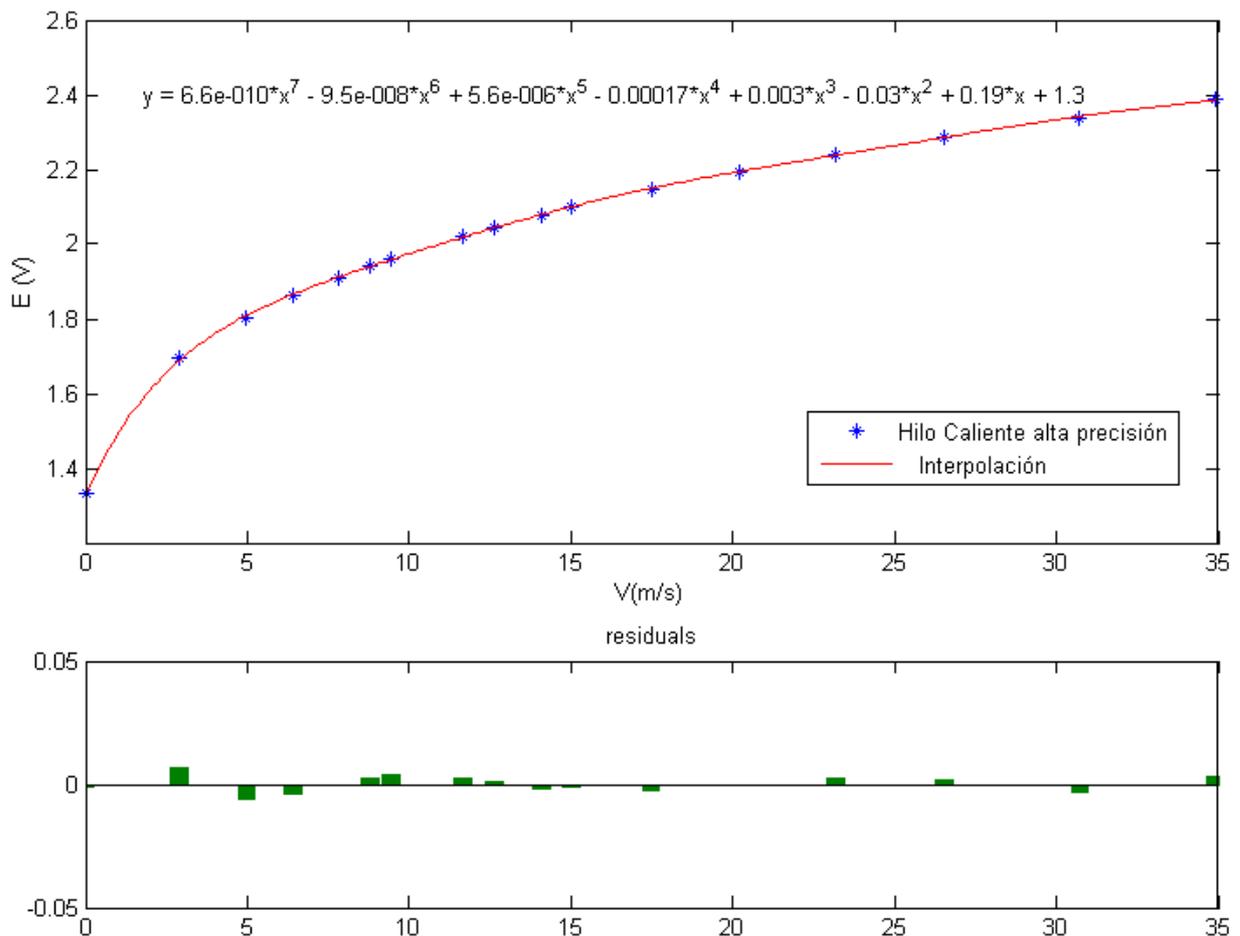


Figura 30: Calibración del Hilo Caliente de alta precisión

Como se puede observar hemos realizado una interpolación a la curva con los de la siguiente forma:

$$E = p1*V^7 + p2*V^6 + p3*V^5 + p4*V^4 + p5*V^3 + p6*V^2 + p7*V + p8$$

Coefficientes:

$$p1 = 6.5516e-010$$

$$p2 = -9.4508e-008$$

$$p3 = 5.5502e-006$$

$$p4 = -0.0001708$$

$$p5 = 0.0029641$$

$$p6 = -0.029567$$

$$p7 = 0.18752$$

$$p8 = 1.3321 \tag{4.3}$$

Un ajuste de quinto orden presenta un error del orden de 4 veces el obtenido con este polinomio, debido a este hecho se ha decidido aumentar el grado de ajuste. Siendo el error máximo cometido debido a la interpolación actual del 0,62%.

El error cometido en cada punto debido a las variaciones temporales del propio calibrador es inapreciable en la imagen anterior debido a su tamaño. La Figura 31 muestra un detalle de un punto correspondiente a la velocidad en el calibrador de 4,08 m/s:

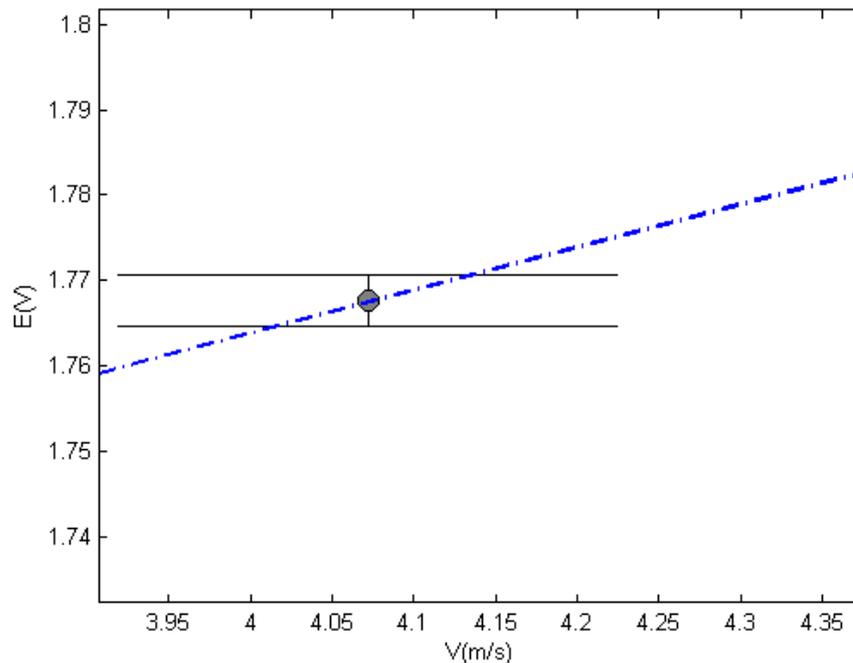


Figura 31: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Hilo Caliente de alta precisión

Como se puede observar en la Figura 31 el error cometido es del orden del 0,62% respecto al valor correspondiente de tensión, en concreto éste a 4,06 m/s. Nuevamente este dato nos aporta fiabilidad acerca de la medición.

4.1.4 Calibración Tubo de Pitot

Para calibrar el Tubo de Pitot vamos a utilizar veinte puntos. La ventaja fundamental es que con el Tubo de Pitot no tenemos limitación en cuanto a la velocidad, por lo que haremos una calibración muy amplia. Además, es un equipo económico y con un funcionamiento mucho más sencillo que el de los hilos. Volvemos a realizar el mismo proceso que con los hilos calientes, pero esta vez la salida del Pitot llega al KIMO[®] CP200, encargado de medir la diferencia de presión entre sus dos terminales. Se comparará el voltaje de salida con las variaciones de velocidad (ver Figura 32).

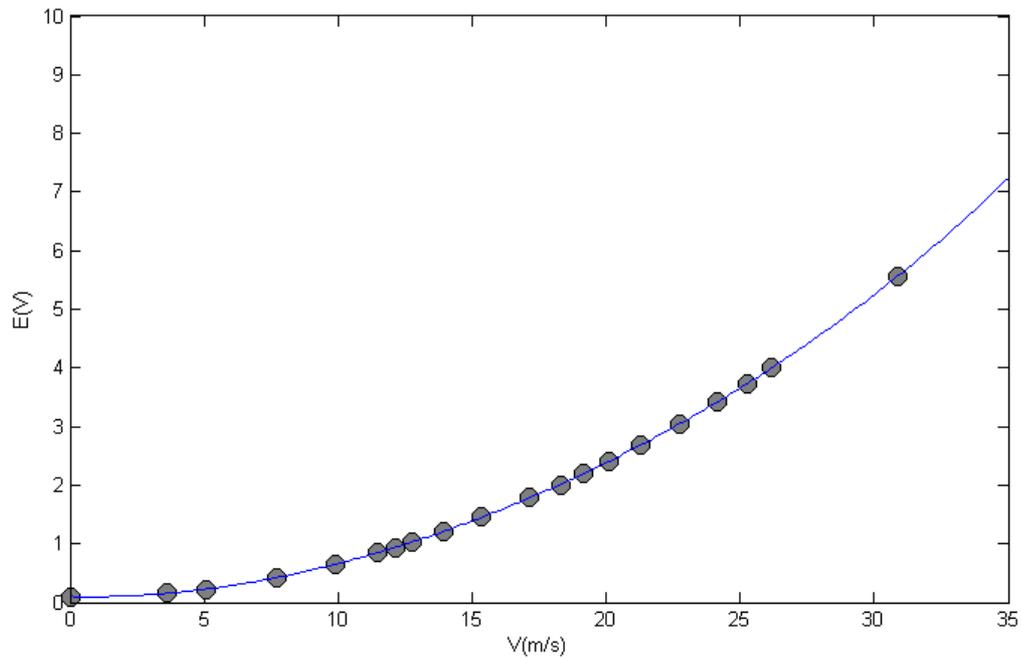


Figura 32: Calibración del Tubo de Pitot

Podemos ver en la gráfica los puntos del experimento. Se ha ajustado una curva de quinto orden para conocer la función que aproxima la relación entre la tensión y la velocidad.

$$E = p1 * V^5 + p2 * V^4 + p3 * V^3 + p4 * V^2 + p5 * V + p6$$

Coefficientes:

$$p1 = 1.8574e-008$$

$$p2 = 1.8568e-007$$

$$p3 = -6.0579e-005$$

$$p4 = 0.0072242$$

$$p5 = -0.010724$$

$$p6 = 0.10227 \tag{4.4}$$

Los errores cometidos en cada punto debido a las variaciones temporales del propio calibrador están dibujados sobre la figura anterior, pero son inapreciables debido

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

a su tamaño. La Figura 33 muestra un detalle de un punto correspondiente a la velocidad en el calibrador de 13,96 m/s.

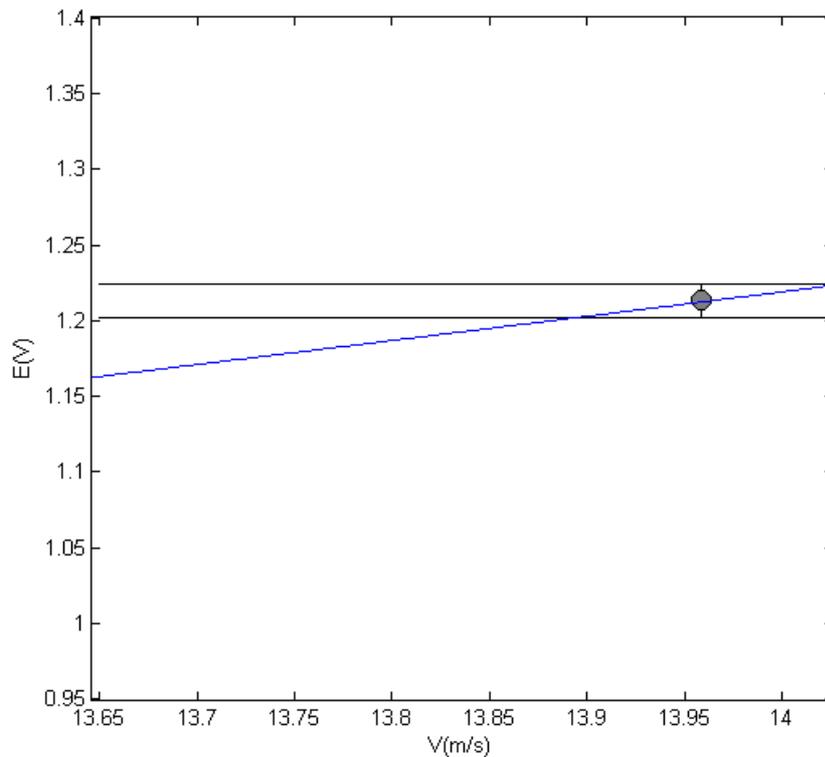


Figura 33: Error del voltaje medido debido a las variaciones temporales para el Tubo de Pitot

El error cometido por la aproximación de un polinomio de quinto grado tiene como valor máximo el 0,79% del valor de tensión para el punto correspondiente a 26,15 m/s. Este error se considera lo suficientemente pequeño como para dar por bueno el ajuste.

4.2 Lecturas y calibración del túnel

Una vez realizada la calibración del equipo de medida es posible comenzar con la toma de datos en el interior del túnel. Existe una abertura en uno de los laterales de la cámara de ensayo por donde se puede introducir y fijar el hilo caliente. Dicha abertura está situada en el punto medio en cuanto al eje vertical se refiere. Como se citó en el apartado de instrumentación, es fundamental que la lectura sea perpendicular al flujo para obtener unos datos válidos. Una vez fijada la profundidad a la que se desea realizar la medición se puede comenzar con el ensayo. En la Figura 34 se observa la disposición del hilo caliente de KIMO® Instruments y el parámetro d , que indica la distancia a la pared desde la que se mide la velocidad del flujo de aire.

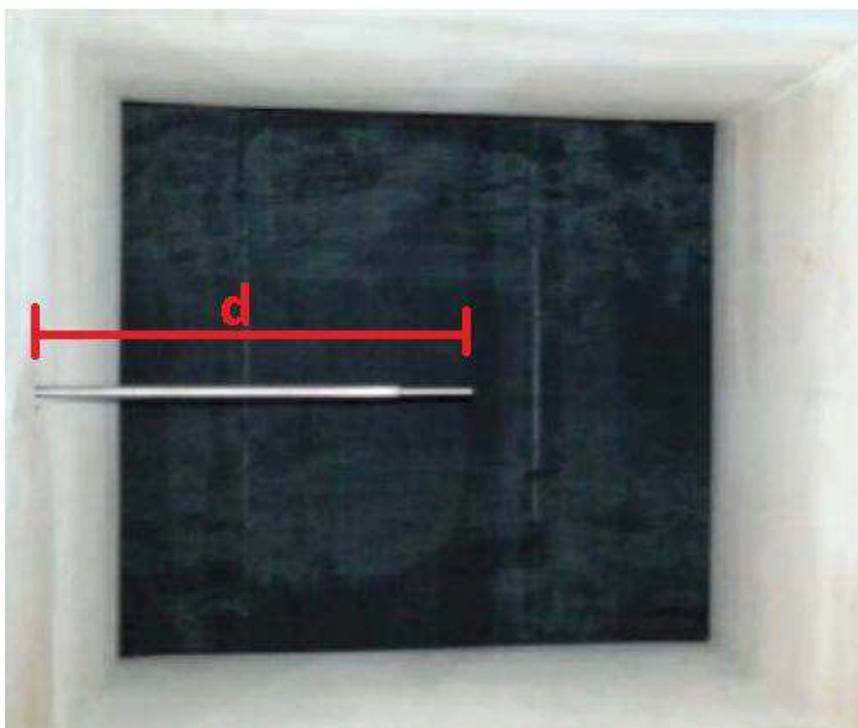


Figura 34: Fotografía de la disposición del hilo caliente de KIMO® Instruments y el parámetro d , que indica la distancia a la pared desde la que se mide la velocidad del flujo de aire.

Se realizarán los ensayos en el punto medio situado a 50 cm de la pared. Se pretende establecer una relación entre la consigna dada a los ventiladores y la velocidad que tiene el flujo para dichos valores. Simultáneamente, se obtendrán los datos que nos facilitarán el estudio de la intensidad de turbulencia dentro del túnel. Para ello, se realiza

un muestreo con el que se obtiene el valor del voltaje de salida de las sondas, y por consiguiente de la velocidad, cada milésima de segundo. La intensidad de turbulencia se calcula como la desviación típica de la distribución de velocidades con respecto a la velocidad media. Por último, se analizarán los puntos a distintas profundidades para tener la caracterización a lo largo de toda la sección.

4.2.1 Relación Consigna-Velocidad

El objetivo de este experimento será obtener la velocidad correspondiente a una consigna dada a los ventiladores desde el software de control de Labview. Para ello, Se introducirá el equipo de medida previamente calibrado y se analizará su respuesta según los cambios de consigna. Gracias a la calibración previamente realizada, podemos obtener la velocidad real dentro del túnel.

Se recuerda que es muy importante realizar los ensayos dentro del túnel a la misma temperatura que la calibración, ya que de otro modo no se garantiza que la respuesta del hilo sea la misma. Se estima que una diferencia de tres grados entre la temperatura de la calibración y del ensayo desacredita por completo las mediciones.

Para este análisis se toma el valor medio de la velocidad de todos los leídos para cada punto como indicamos en el apartado anterior. Los resultados obtenidos para cada equipo de medida son los siguientes:

- Hilo Caliente Industrial

Variando el porcentaje de la consigna dada a los ventiladores, obtenemos los valores correspondientes de velocidad para cada punto. El rango de medición será para una consigna máxima del 30%, con variaciones de 5% en cada ensayo (ver Figura 35).

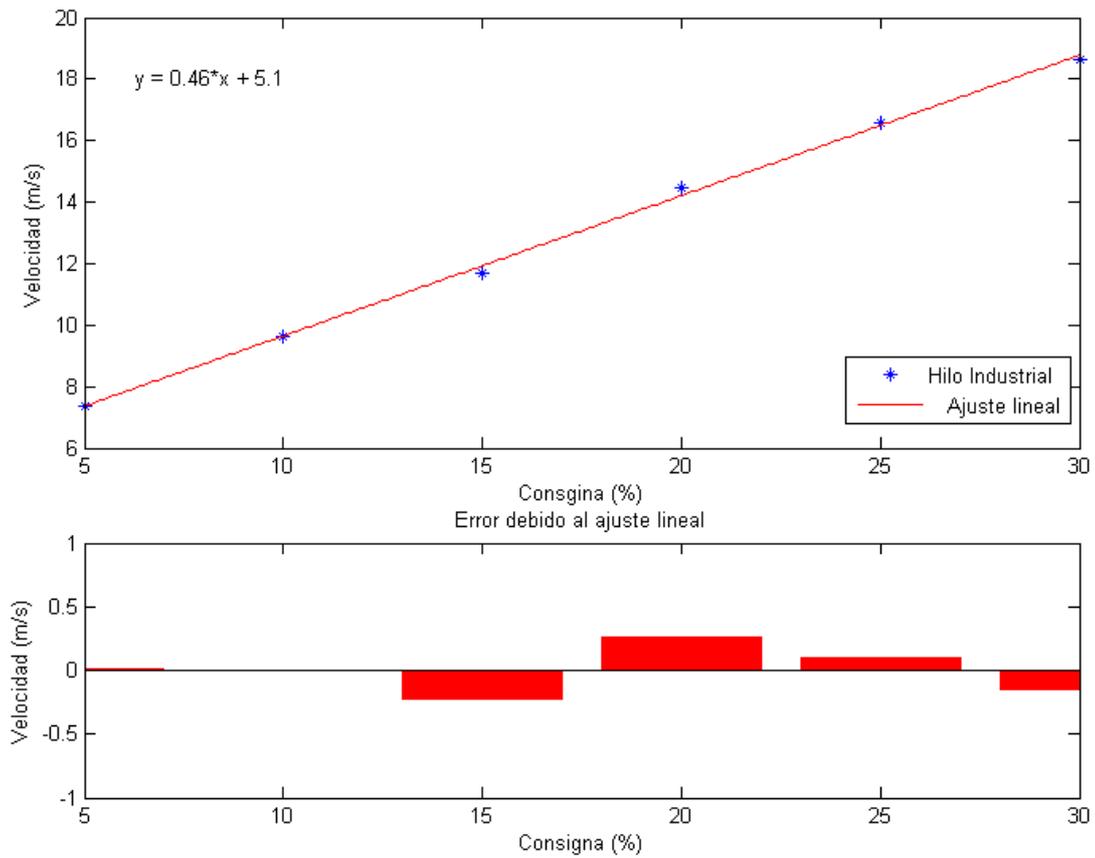


Figura 35: Relación Consigna-Velocidad para el Hilo Caliente industrial

La recta obtenida es:

$$V = 0,46 * C + 5.1$$

(4.5)

Y la intensidad de turbulencia alcanza los siguientes valores en cada punto (ver Figura 36):

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

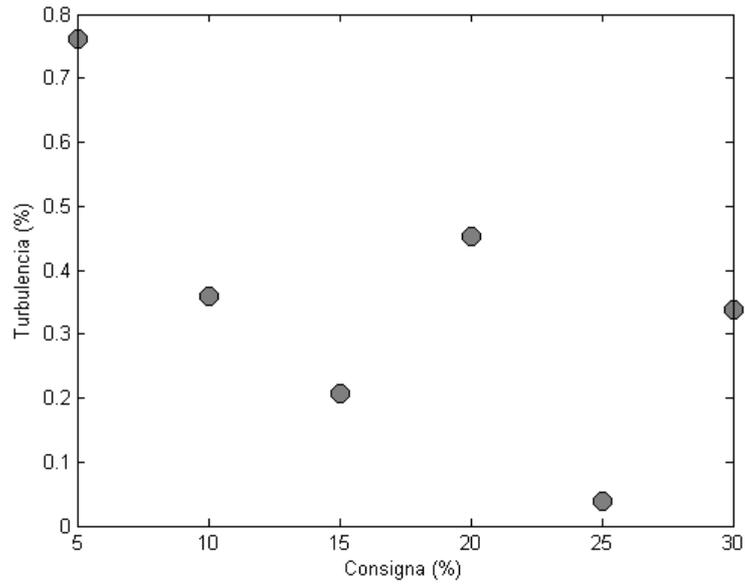


Figura 36: Relación Consigna-Turbulencia para el Hilo Caliente Industrial

Una turbulencia medida de menos del 1% nos sugiere que los cambios de velocidad leídos son muy pequeños. Comprobamos en un análisis temporal de adquisición de datos (ver Figura 37).

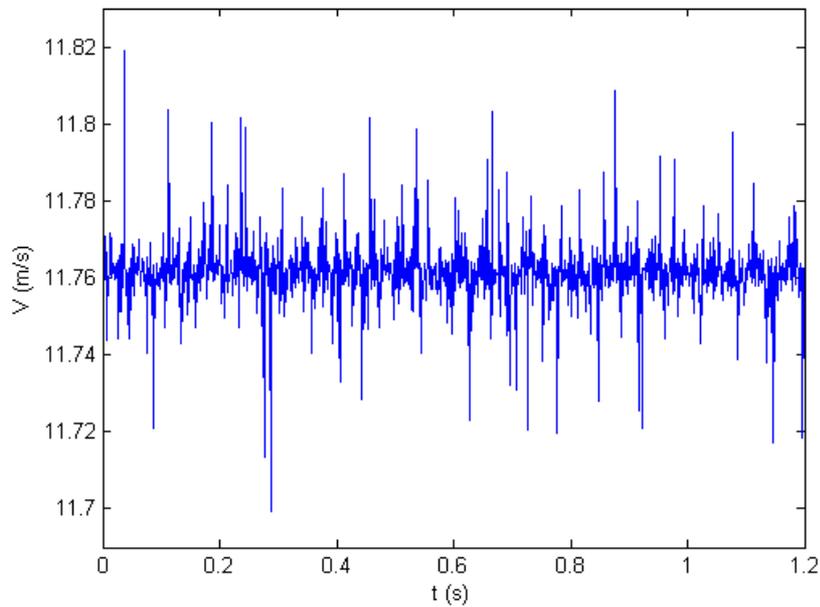


Figura 37: Análisis temporal en el Hilo Caliente Industrial para una consigna del 15%

- Hilo Caliente de alta precisión

El rango de medición será para una consigna máxima del 65%, con variaciones de 5% en cada ensayo (ver Figura 38).

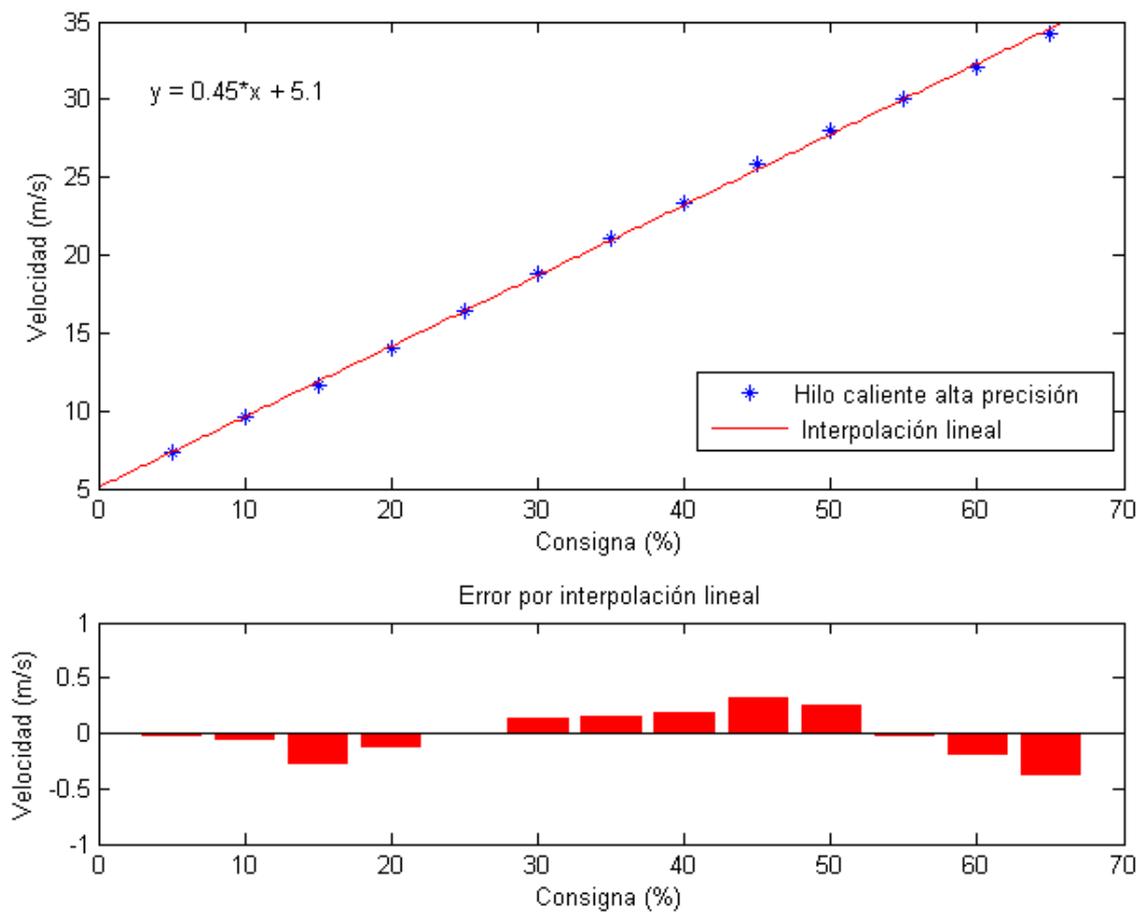


Figura 38: Relación Consigna-Velocidad para el Hilo Caliente de alta precisión

La recta obtenida es:

$$V = 0,45 \cdot C + 5.1$$

(4.6)

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

Y la intensidad de turbulencia alcanza los siguientes valores en cada punto (ver Figura 39):

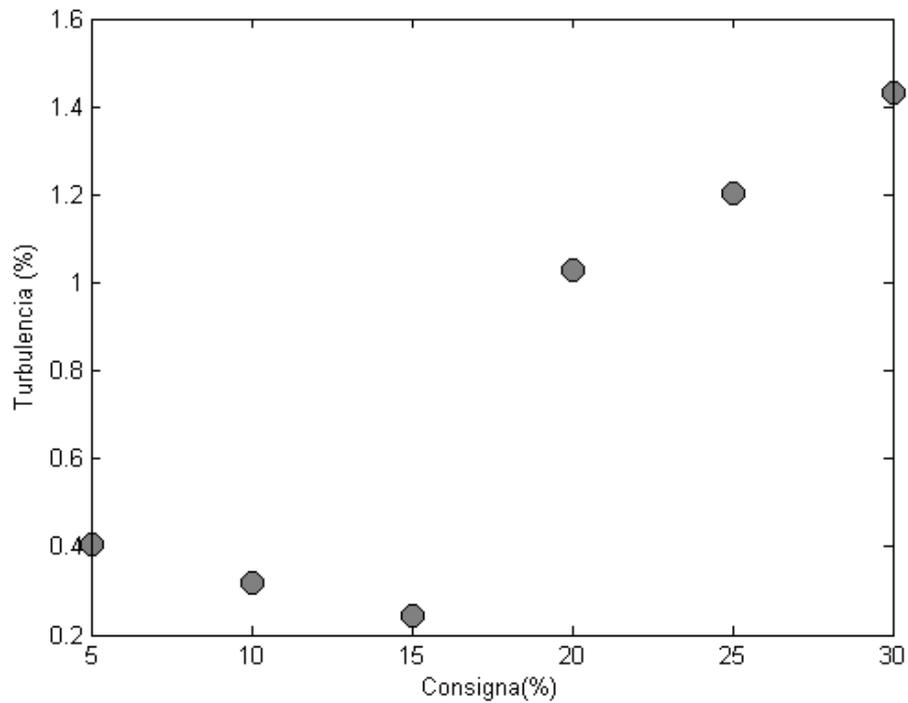


Figura 39: Relación Consigna-Turbulencia para el Hilo Caliente de alta precisión

Es coherente que los datos obtenidos arrojen un valor mayor de turbulencia para el caso del Hilo Caliente de alta precisión, ya que funciona muchísimo mejor a los cambios que el Hilo Caliente Industrial. Un análisis temporal muestra dichas variaciones en la Figura 40:

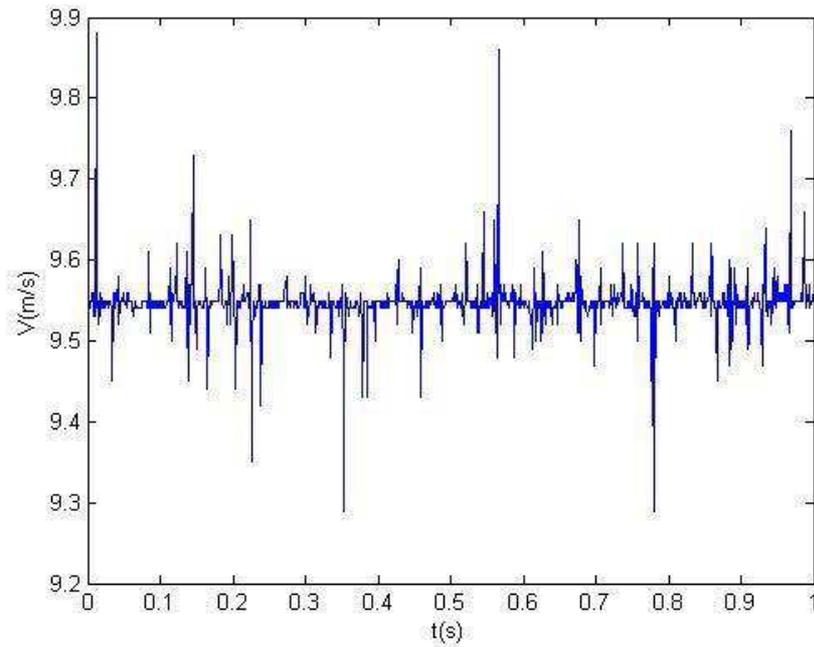


Figura 40: Análisis temporal del Hilo Caliente de alta precisión para una consigna del 10%

- Tubo de Pitot

El rango de medición será para una consigna máxima del 70%, con variaciones de 5% en cada ensayo (ver Figura 41).

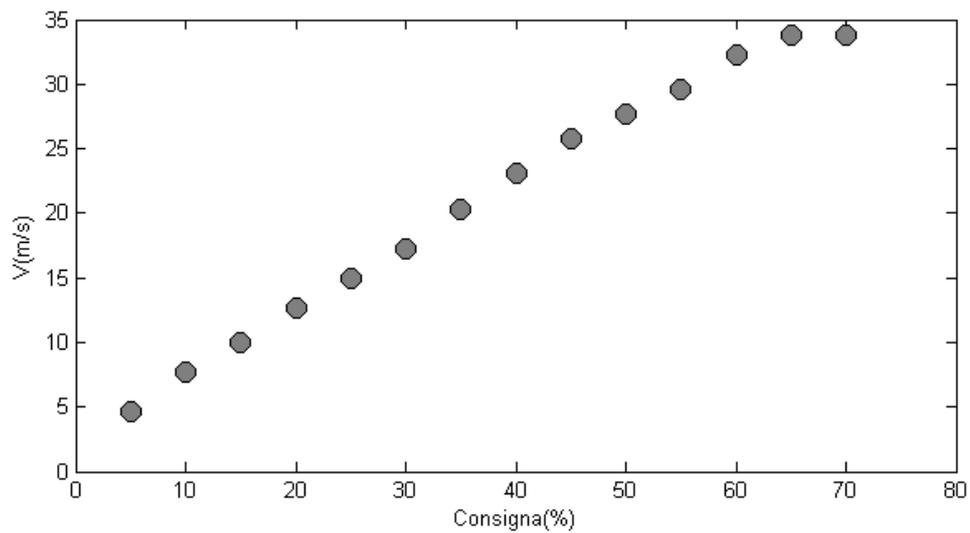


Figura 41: Relación Consigna-Velocidad para el Tubo de Pitot

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

Se observa una tendencia creciente hasta un valor de la consigna del 65%. Esta zona puede aproximarse por una recta de las siguientes características:

$$V = 0,49 * C + 2,8 \quad (4.7)$$

Un análisis detallado, nos revela que el error cometido por aproximar esta sucesión de valores desde una consigna para los ventiladores del 5% hasta una del 65% por una recta tiene un error que llega hasta 1 m/s. Se puede observar que el comportamiento es lineal a tramos, ya que sigue una tendencia hasta 20 m/s y otra ligeramente diferente a partir de ese valor. Esto provoca grandes errores en la aproximación. En las Figuras 42 y 43 se pueden observar dichos tramos.

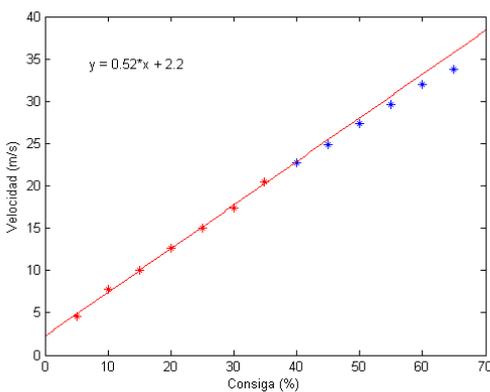


Figura 42: Interpolación de Pitot a bajas velocidades

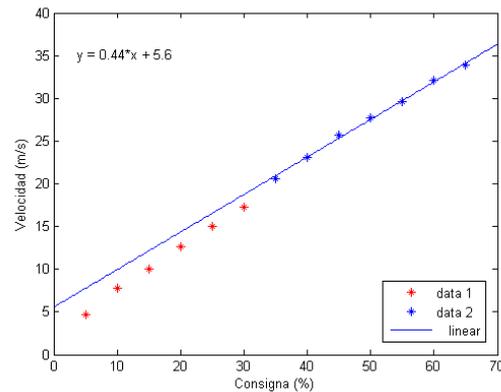


Figura 43: Interpolación de Pitot a altas velocidades

Se pueden aproximar los tramos lineales por las siguientes rectas:

$$V = 0,52 * C + 2,2 \quad \text{para } C \leq 35 \% \quad (4.8)$$

$$V = 0,44 * C + 5,6 \quad \text{para } C \geq 35 \% \quad (4.9)$$

Más adelante se analizará la fiabilidad de los datos obtenidos.

Se recuerda que el hecho de que al 70% de consigna dada a los ventiladores se mida el mismo valor de velocidad que a 65% es completamente lógico ya que los

ventiladores están limitados para no trabajar por encima del 65% de su potencia máxima.

La intensidad de turbulencia medida es la siguiente (ver Figura 44):

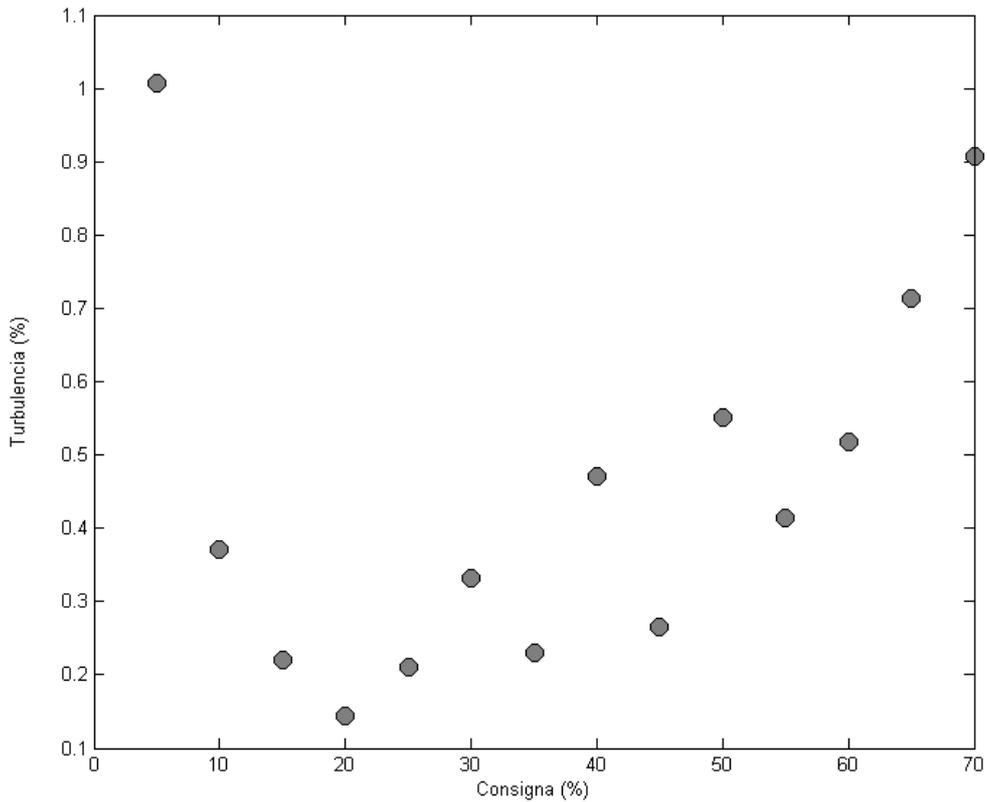


Figura 44: Relación Consigna- Turbulencia para el Tubo de Pitot

Que muestra valores menores a los de los hilos en sus respectivos rangos de medida. Es algo coherente ya que los Tubos de Pitot reaccionan mucho más lentamente a los cambios en velocidad.

El motivo de realizar la calibración del túnel por medio de varios dispositivos tiene la ventaja de que se pueden comparar sus resultados. Para ello se superponen las gráficas de velocidad obtenidas (ver Figura 45):

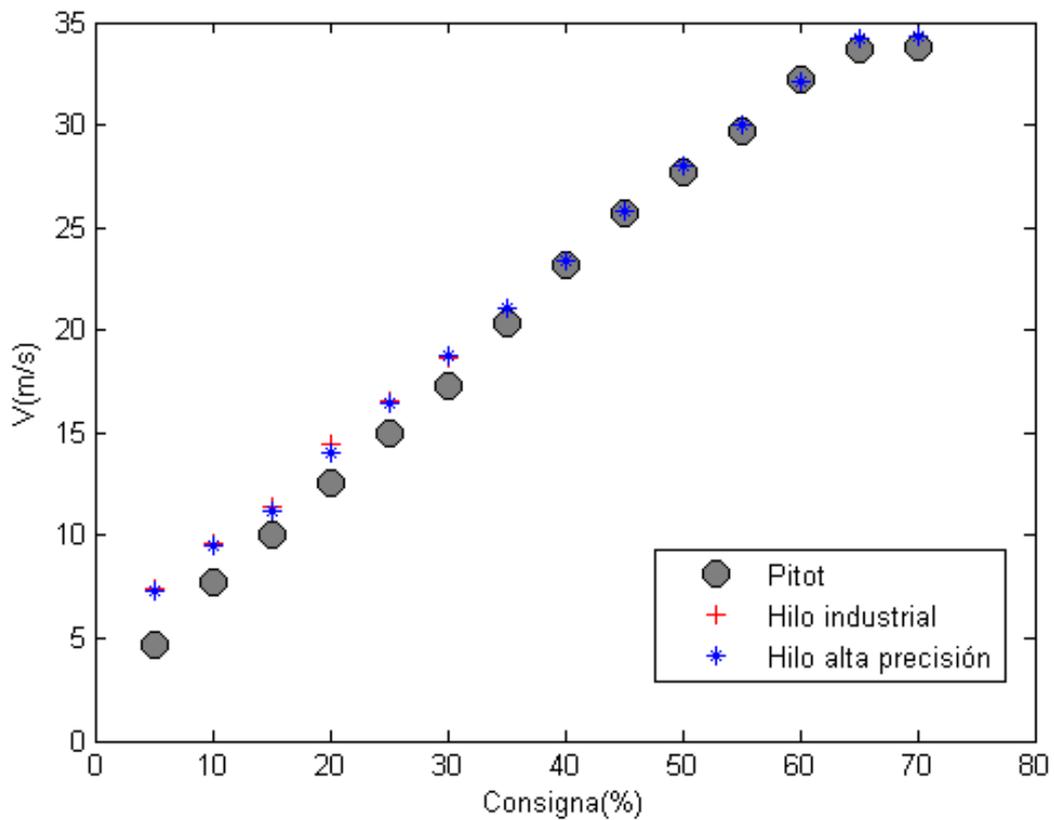


Figura 45: Representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.

Los resultados se discutirán en las conclusiones, apartado 5 del presente documento.

4.2.2 Variaciones a lo largo de la sección

Una vez obtenidos los datos en el punto medio cabe preguntarse qué ocurre a distintas profundidades ya que se presupone el flujo uniforme en la sección de ensayo perpendicular a la velocidad del aire. Se divide el recorrido de las mediciones en 7 puntos, desde una distancia a 5 cm de la pared hasta el punto medio situado a 50 cm. Cabe destacar la imposibilidad de medir en un punto más cercano a la pared, ya que el grosor de la propia instrumentación interfiere en la capa límite, desvirtuando los resultados obtenidos. Se realizarán los ensayos variando la consigna de los ventiladores

para obtener datos en un rango de velocidades entre 5-20 m/s. En un primer análisis se tomarán las medidas fijas sin tener en cuenta las oscilaciones debidas a las turbulencias, que se estudiarán con más detalle posteriormente.

Se recopilan los valores en la siguiente tabla.

		distancia [cm]						
		5	10	20	30	40	45	50
consigna [%]	5	6.99	7.04	7.12	7.12	7.18	7.24	7.3
	10	9.13	9.28	9.33	9.39	9.45	9.51	9.55
	15	11.03	11.28	11.29	11.33	11.34	11.336	11.4
	20	13.56	13.61	13.71	13.81	13.81	13.91	14.01
	25	15.8	15.9	16.0	16.1	16.1	16.3	16.4
	30	18.21	18.3	18.3	18.5	18.5	18.6	18.8

Tabla 3: Velocidad a diferentes profundidades

A continuación (ver Figura 46) se representan los valores obtenidos que relacionan la velocidad del perfil con respecto a la profundidad expresada en centímetros desde la pared hasta el punto medio de la sección.

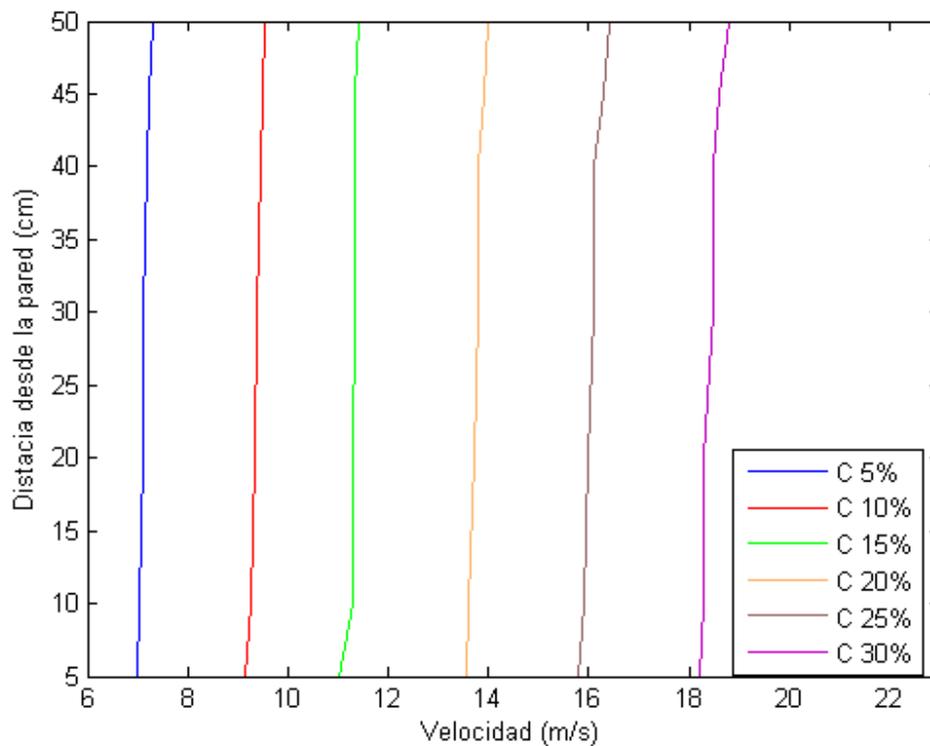


Figura 46: Velocidad en el túnel respecto a la profundidad del ensayo

Los resultados obtenidos muestran puntos de gran interés. Vemos que la velocidad es ligeramente superior en el punto medio y los valores mínimos de velocidad los encontramos cerca de la pared, como era de esperar. Se observa como el perfil es en gran medida uniforme a lo largo de la sección.

Recordamos que estos datos han sido obtenidos utilizando como parámetro la velocidad media en un intervalo de tiempo una vez estabilizado el túnel para el valor asignado de la consigna. Como es lógico, no es lo mismo que tomemos como absolutos estos valores hasta que no comprobemos las oscilaciones que sufren a diferentes profundidades. Se realizan las mediciones con el Hilo Caliente de alta precisión.

En la siguiente tabla podemos apreciar cómo afectan dichas oscilaciones a los valores para una velocidad elevada, a consigna 30%.

Profundidad (cm)	Velocidad Media (m/s)	Desviación típica	Turbulencia (%)
50	18.81	0.269706362	1.433674056
45	18.66	0.208584627	1.11781505
40	18.47	0.241273605	1.306454081
30	18.51	0.251039139	1.355939342
20	18.31	0.229308242	1.252127402
10	18.31	0.254649768	1.390989513

Tabla 4: Influencia de las oscilaciones temporales a distinta profundidad para una consigna del 30%

Debido a que se presupone que los cuatro ventiladores se comportan igual, podemos suponer el flujo simétrico, siendo el eje de simetría la mitad de la sección, situado a 50 cm de la pared de la cámara de ensayo (ver Figura 47).

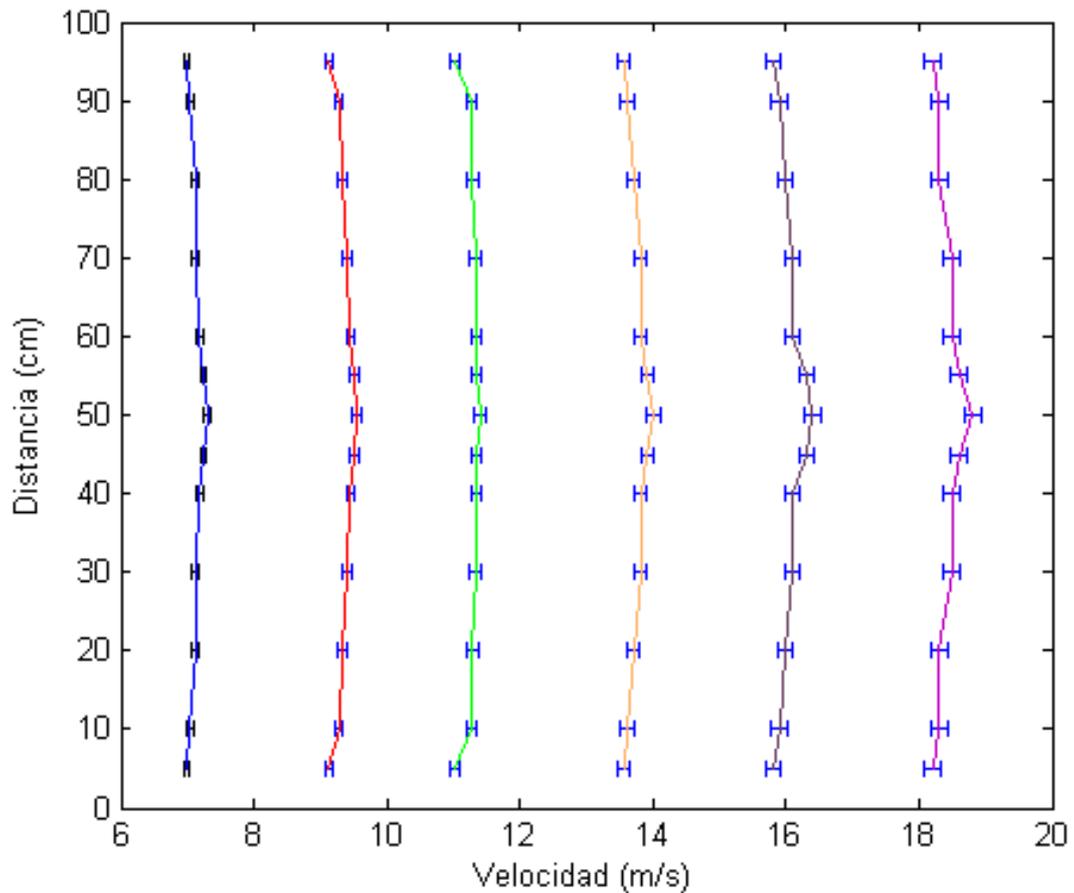


Figura 47: Velocidad en el Túnel respecto a la profundidad del ensayo. Variaciones temporales incluidas.

De lo anterior se deduce que para pequeñas velocidades el flujo es prácticamente uniforme, no siéndolo tanto conforme aumenta la velocidad. Por tanto en caso de realizar ensayos de precisión la profundidad a la que se encuentre el modelo u objeto de ensayo será relevante a la hora de estudiar la velocidad que incide sobre él.

Otra perspectiva interesante es ver cómo varía la velocidad, con su respectiva desviación típica, en relación a la consigna para distintas profundidades. Esto se representa en la Figura 48.

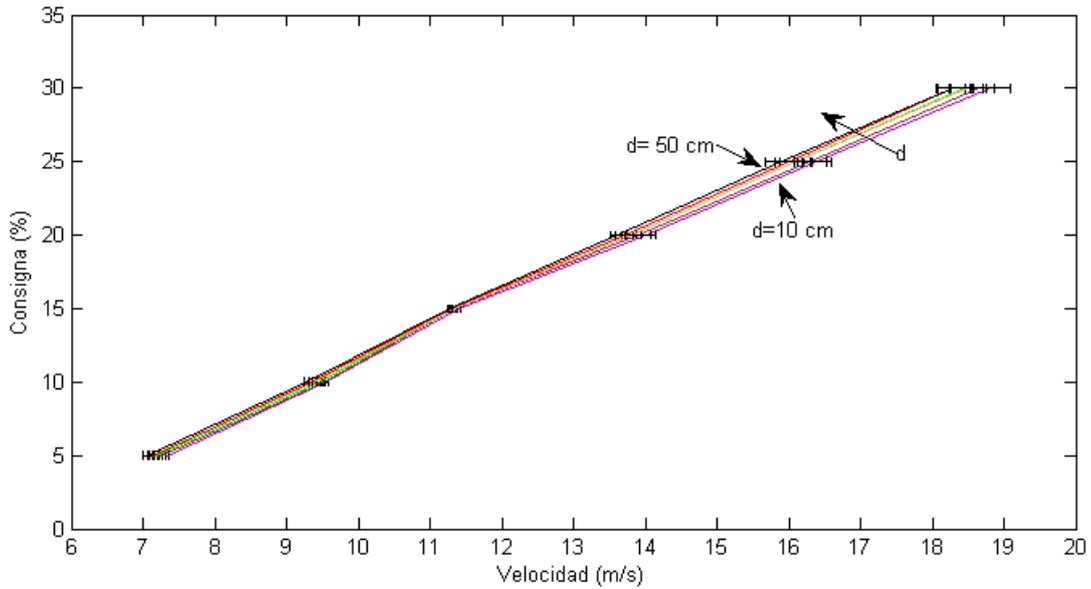


Figura 48: Variación de la velocidad con respecto a la consigna para cada profundidad

Así mismo, en la Figura 49 se representa cuánto varía en tanto por ciento la velocidad al cambiar la consigna para cada distancia. Esto es equivalente a representar la turbulencia en cada punto con respecto a la consigna.

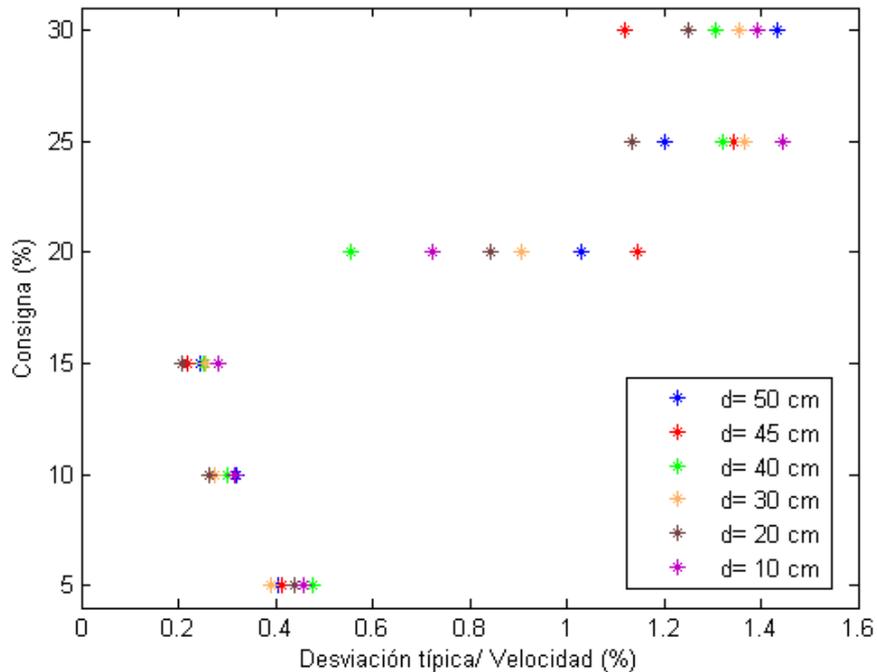


Figura 49: Variación en tanto por ciento de la velocidad para cada distancia

5 CONCLUSIONES

Presentados los resultados obtenidos hasta este punto del proyecto, tanto para la calibración del equipo de medida como para las lecturas y calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga, comprendidos en los apartados 4.2 y 4.3 respectivamente, se procede a analizar dichos resultados.

En primer lugar, no se recomienda leer por el *display* de la unidad KIMO[®] CTV200 los valores obtenidos de velocidad ya que se han observado considerables diferencias respecto a la velocidad real. En caso de usar el actual Hilo Industrial conectado a esta unidad, se recomienda obtener el voltaje de salida de la sonda y procesar los datos por medio de otro dispositivo.

En cuanto a los resultados obtenidos con los diversos dispositivos de medición, cabe destacar las diferencias obtenidas en el túnel mostradas en la Figura 50.

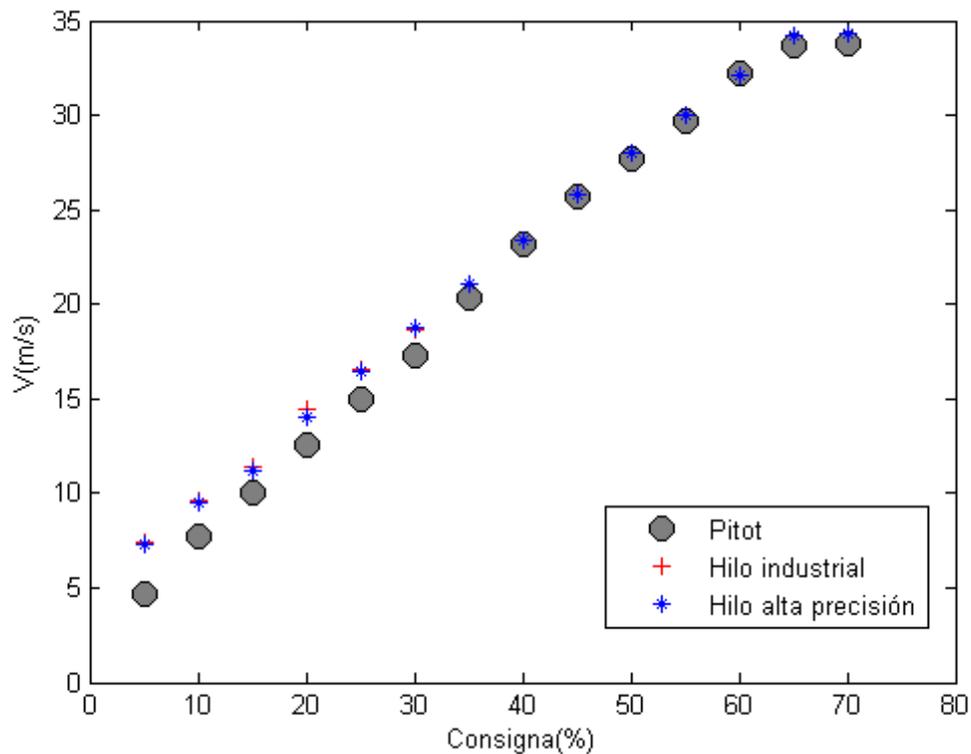


Figura 50: Representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.

-Calibración del Túnel de Viento de la Universidad de Málaga-

Se toman como referencia los datos obtenidos con el Hilo Caliente de alta precisión. Se observa que el Hilo Caliente Industrial, pese a su bajo coste y peores características, funciona muy bien en su rango de medición (0-20 m/s), mientras que para este mismo rango el Tubo de Pitot presenta errores sustanciales (ver Figura 51).

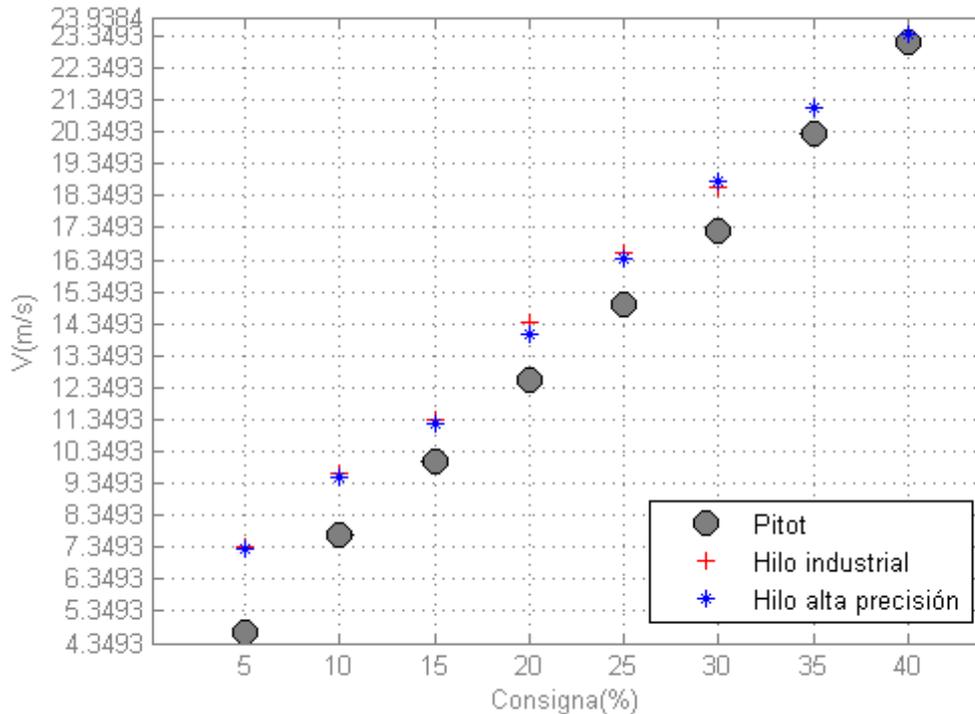


Figura 51: Imagen ampliada de la representación conjunta de la relación Consigna-Velocidad para todos los dispositivos de medida de velocidad.

Sin embargo, a partir de la franja de los 20 m/s el Tubo de Pitot cumple su función de manera notable hasta llegar a la velocidad máxima del túnel. Por todo esto, se recomienda que para el cálculo de la velocidad a cierta consigna dada, se utilice la siguiente relación:

$$V = 0,46 * C + 5,1 \quad \text{para } C \leq 35 \% \quad (5.1)$$

$$V = 0,44 * C + 5,6 \quad \text{para } C > 35\% \quad (5.2)$$

Siendo V la velocidad en m/s obtenida dentro del túnel y C el valor de la consigna a los ventiladores en tanto por ciento.

La velocidad varía moderadamente a lo largo de la sección del túnel, siendo máxima en el punto medio de la sección. La relevancia de la profundidad aumenta conforme aumenta la consigna dada a los ventiladores. Esto puede ser debido a cómo está instalado el panal de abeja. Se usaron cuatro placas de panal de abeja de 1m^2 , pegadas por el centro. Puede ocurrir que al aumentar la velocidad, la unión central se deforme y sea la responsable de las diferencias de velocidad.

En cuanto a las oscilaciones intrínsecas al propio túnel existe un dato a destacar. La instalación en la cámara de acondicionamiento de la malla soldada punto a punto ha permitido reducir la turbulencia de manera considerable. Se observa como en ninguno de los experimentos realizados el valor de la turbulencia es mayor al 1.5%, siendo este valor un dato fabuloso.

6 LÍNEAS FUTURAS

Gracias a la calibración realizada, se podrán llevar a cabo todo tipo de ensayos en el Túnel Aerodinámico de la Universidad de Málaga conociendo los valores precisos de velocidad y turbulencia presentes en él. Con estos datos conocidos, se propone la calibración de la balanza de esfuerzos con la que cuenta el túnel utilizando dinamómetros y midiendo las características aerodinámicas de un perfil NACA 0012 y comparando los resultados con los de la bibliografía. Por otro lado, se propone el estudio de la capa límite utilizando técnicas de medición de la velocidad por medio de partículas.

En cuanto a cambios infraestructurales, se propone unificar el sistema de medida DANTEC® Hilo Caliente de alta precisión con el sistema locomotor 3D controlado por ordenador, DANTEC® Traverse System.

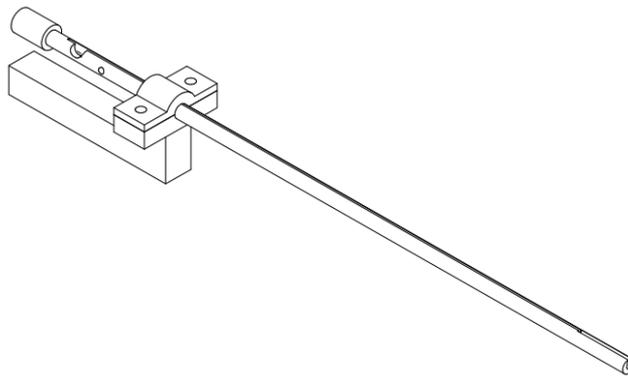


Figura 52: Fotografía DANTEC® Traverse System

53: Esquema de pieza para anclaje Traverse-Hilo

Esto permitiría de una manera más precisa realizar las mediciones a distintas alturas y profundidades sin tener que anclar y desanclar el Hilo Caliente a un punto fijo de manera manual para cada medición. Este cambio haría posible medir a distintas profundidades y distintas alturas, caracterizando el flujo en toda la sección de la cámara de ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barlow J.B, Rae W.H. y Pope A. (1999), "Low-speed wind tunnel testing", Jhon Wiley and sons, Nueva York (EEUU).
- [2] P.Bradshaw, R.C. Pankhurst (1964). "The design of low-speed wind tunnels." Progress in Aerospace Sciences, Volumen 5.
- [3] Fuh-min Fang, J.C. Chen, Y.T. Hong (2001). "Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square wind tunnel contraction". Journal of Wind Engineering and Industrial Aetodynamics, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University, Taiwan.
- [4] R.D. Metha, P. Bradshaw (1979). "Rules for small low speed wind tunnels", The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society
- [5] R. Fernández Feria (2005). "Mecánica de Fluidos". Universidad de Málaga/ Manuales.
- [6] James Scheiman (1981). "Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens o Reduce Wind-Tunnel Turbulence" NASA Technical Memorandum 81868