

Capítulo 1

Descripción del equipo experimental. Métodos de medida

1.1. El equipo experimental

Todos los experimentos se realizaron en un túnel de viento, al que se acopló, a través de una tobera, un ventilador axial responsable de generar la corriente fluida mediante aspiración, y cuya velocidad se controló con un variador de frecuencia.

Para la generación de turbulencia se utilizaron distintos dispositivos consistentes en matrices de chorros enfrentados, así como su combinación con rejillas metálicas.

Para la calibración de la sonda de hilo caliente, se utilizó una tobera convergente de madera, conectada al extremo opuesto al ventilador, para obtener corrientes con bajas intensidades turbulentas.

Por otro lado para la toma de medidas se contó con un equipo de anemometría de hilo caliente y de una tarjeta de adquisición de datos conectada a un PC. El tratamiento de los datos obtenidos, para obtener los valores de las magnitudes que nos permitieran describir la turbulencia, se realizó íntegramente con Matlab.

Describimos ahora en detalle cada uno de estos equipos.

Túnel: El túnel consiste en un conducto de sección cuadrada de 120mm x 120mm

y 1,5 m de longitud. Sus caras laterales son de vidrio, para mejorar la óptica de la instalación de cara a la toma de fotografías o medidas con laser. El resto de las caras son de metacrilato.

En su cara superior tiene varios taladros para permitir la fijación del soporte de la sonda de hilo caliente y de un tubo de Pitot.

Dispositivos generadores de turbulencia: Se utilizaron dos dispositivos distintos para la generación de la turbulencia.

1. **DISPOSITIVO 1:** Consiste en un pequeño conducto de metacrilato, de sección cuadrada de 120mm x 120mm de sección interior, 250mm de longitud y 8mm de espesor (figuras 4.1 y 4.2).

En sus caras laterales se realizaron dos matrices cuadradas de 64 agujeros de 8mm de diámetro con una separación de 16mm entre sus centros. Cada una de las dos matrices está rodeada por un conducto cúbico de 138mm de lado, atornillado al dispositivo por sus caras laterales. En la boca de cada cubo, puede colocarse una rejilla metálica cuadrada de 130 mm de lado.



Figura 1.1: Dispositivo generador de turbulencia con matriz de chorros



Figura 1.2: Dispositivo generador de turbulencia con malla metálica

2. **DISPOSITIVO 2 (FRACTAL):** Es un dispositivo parecido al anterior de misma sección y longitud, y de 4mm de espesor. En las dos caras laterales se han realizado taladros de distintos tamaños (8mm, 5mm, 2.5mm y 1.5mm de diámetro) dispuestos en una configuración fractal, como se puede ver la figura. Además este dispositivo ha sido cerrado por su cara posterior, para que todo el flujo entre a través de los agujeros (figura 4.3).

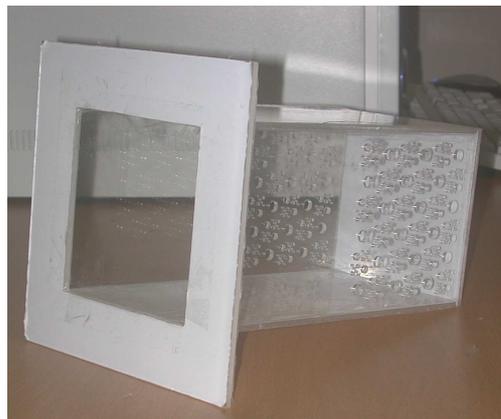


Figura 1.3: Dispositivo con configuración fractal de chorros

Ventilador y variador: El aire que entra en el túnel es aspirado mediante un ventilador axial, de la marca S&P modelo TBT2/400, con motor trifásico de

2 polos y 1.5 Kw de potencia.

La velocidad del motor se ha controlado mediante el uso de un variador modelo VTN2-4002 de Varta con una potencia máxima de 1,5 KW. La máxima frecuencia de trabajo ha sido de 60 Hz.



Figura 1.4: Variador de velocidad



Figura 1.5: Ventilador con tobera metálica, conectado a variador

Equipo de anemometría de hilo caliente: El anemómetro utilizado fue el modelo AN-1005 de la casa AA.LAB SYSTEMS, con tres canales. Este equipo es

bastante fiable y puede alcanzar tiempos de respuesta de 1.2 microsegundos. Por otro lado, este modelo incorpora su propio sistema de acondicionamiento de la señal de salida, a través de una función de amplificación de la señal (GAIN) y otra que permite la suma de una tensión constante (OFFSET), lo que permite adaptar su salida al rango de tensiones que admite la tarjeta de adquisición de datos utilizada (DAS 1402), de cara a aprovechar al máximo su resolución. Además incorpora una serie de filtros, que nos permitió obtener señales bastante libres de ruido.

Finalmente comentar que el AN-1005 posee un potente sistema de adquisición de datos capaz de muestrear a frecuencias de 500 kHz y 16 bits de resolución. Por desgracia problemas con el software suministrado por el fabricante hicieron imposible su uso.



Figura 1.6: Equipo de anemometría de hilo caliente

Tarjeta de adquisición de datos: La tarjeta empleada para digitalizar la señal analógica proveniente del anemómetro fue el modelo DAS-1402 de KEITHLEY-METRABYTE. La tarjeta se configuró en modo unipolar, con un rango de tensiones de 0 a 8 V, para aprovechar al máximo su resolución. Admite frecuencias de muestreo de hasta 100 kHz, aunque el programa que se suministra con la misma limita el número de muestras a 10.000.

1.2. Ajustes en el equipo de anemometría

1.2.1. Elección del tipo de sonda

En la elección del tipo de sonda ha sido importante tener en cuenta algunas consideraciones sobre el tipo de estudios que queríamos realizar. Dado que el fluido a estudiar ha sido aire y no había partículas en suspensión ni estábamos en entornos agresivos, la elección de una sonda de hilo caliente y no la lámina de hilo caliente, pareció la más obvia. Respecto al tamaño de la sonda, los factores a considerar fueron por un lado la resolución espacial requerida para la misma y por otro minimizar el flujo de calor que se transmite a través de los soportes por conducción.

La resolución espacial mejora conforme disminuimos la longitud de la sonda, pues ésta será capaz de captar torbellinos más pequeños. De todas las sondas que había disponibles la de menor tamaño era el modelo de Dantec TP 55P11 de 1,25mm de longitud y 5 micras de diámetro (figura 4.7). Este modelo se comportará bien para medida de los torbellinos más grandes, sin embargo podría perder eficacia al medir los torbellinos más cercanos al rango disipativo. Este problema se evidenciará en la atenuación del espectro de energía. Como se recoge en el trabajo realizado por Wyngaard (1968) para sondas simples y en X, la atenuación aumenta con el incremento del número de ondas relativo a la longitud del hilo ($k_1 l$) y con el decremento de la relación η/l (figura 4.8). Estos son los llamados errores de resolución espacial y que para valores de $k_1 l$, cercanos a uno son pequeños. Dado que en nuestro caso $k_1 l \sim 1$



Figura 1.7: Sonda simple SN, modelo TP 55P11 de Dantec

se tendrán errores menores del 10 %

En relación a minimizar el efecto de la conducción hacia los soportes del hilo, se tiene, que una relación entre la longitud y el diámetro del mismo de 200, es suficientemente buena (en nuestro caso es $1,25 \text{ mm}/5\mu\text{m} = 250$).

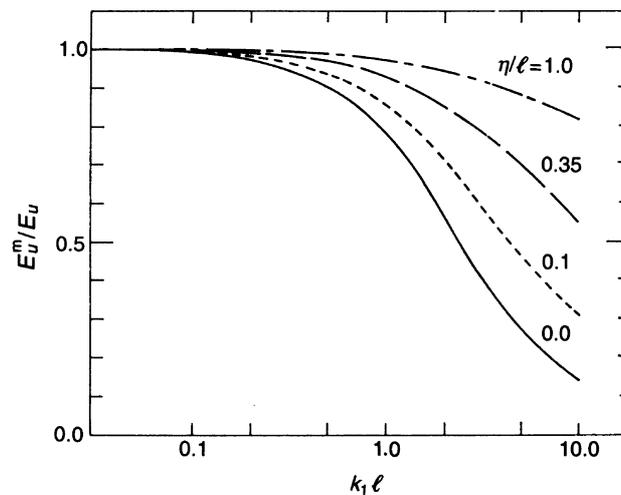


Figura 1.8: Atenuación del espectro E_m/E en función de $K_1 l$

1.2.2. Ajustes en el anemómetro

Antes de realizar medidas con el anemómetro, es necesario realizar unos ajustes en el mismo encaminados a equilibrar el puente de Wheastone, fijar la temperatura de operación del hilo, ajustar la velocidad de respuesta del mismo (respuesta en frecuencia) y a obtener una señal de salida libre de ruidos. Los pasos a seguir con el AN-1005 son los descritos en el manual de usuario que proporciona el fabricante, aquí se tratarán brevemente:

1. **Obtención de la resistencia del cableado:** El cable apantallado y las conexiones tipo BNC que unen la sonda al equipo de anemometría poseen una

resistencia que se sumará a la propia del hilo, al estar en serie con ella . Por tanto hay que tenerla en cuenta a la hora de equilibrar el puente. Para ello se sustituye la sonda, en la conexión al cable, por un conector que funciona como un cortocircuito y posteriormente se equilibra el puente.

2. **Obtención de la resistencia de la sonda a $T_{ambiente}$:** Aunque el fabricante proporciona un valor para la resistencia del hilo, esta puede variar debido a que se oxida y ensucia con el uso, lo que hace necesario obtener de nuevo su valor ($R_{sonda20^\circ}$). Por eso, una vez que se ha ajustado el equipo a la resistencia del cableado, se sustituye el cortocircuito por la sonda. Luego se procede a equilibrar de nuevo el puente, variando el valor de las resistencias en el equipo. De esta forma se obtiene un valor R_{decade} . Este valor no es exactamente el de la resistencia del hilo, pues incluye además el valor de la resistencia de los soportes (R_{lead}) y un tramo de cable de unos 25 cm que no se ha considerado en el apartado anterior. El valor de R_{lead} lo suministra el fabricante y el del tramo del cable puede considerarse nulo.

A continuación se muestran los valores que se obtuvieron para la sonda TP 55P11:

$$R_{sonda}(fabricante) = 3,5\Omega$$

$$R_{lead} = 0,5\Omega$$

$$R_{decade} = 4,24\Omega$$

$$R_{sonda20^\circ} = R_{decade} - R_{lead} = 3,74\Omega$$

3. **Valor de la resistencia de la sonda a la temperatura de operación (R_w):** La resistencia del hilo estará afectada por la temperatura del mismo. El grado de sobrecalentamiento ($a = R_w/R_{sonda20^\circ}$) es la relación entre las resistencias del hilo a la temperatura de operación y a la temperatura ambiente. Un grado de sobrecalentamiento muy elevado, puede provocar la oxidación del hilo y por su puesto su rotura. Nosotros elegimos una temperatura de operación de unos 200 °C, que es la recomendada por H.H.Bruun(1995).

Una vez fijada la temperatura de operación, se obtiene el valor de la resistencia R_w , usando las siguientes ecuaciones (4.1)

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{R_w}{R_{20}}, \\ R_w = R_{20}(1 + \alpha_{20}(T_w - T_{20})). \end{array} \right. \quad (1.1)$$

En estas ecuaciones, α_{20} es el coeficiente de variación de la resistencia eléctrica con la temperatura. Dicho coeficiente es suministrado por el fabricante y se supone constante con la temperatura.

Una vez se obtiene R_w , se calcula el valor final de la resistencia $R_{decade-final}$, a la que hay que ajustar el equipo de anemometría, sumándole R_{lead} , que se supone no afectada por la temperatura.

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 1,648 \\ R_w = 6,1635\Omega \\ R_{decade-final} = R_w + R_{lead} = 6,663\Omega \end{array} \right. \quad (1.2)$$

4. **Respuesta en frecuencia:** Para ajustar de forma adecuada la velocidad de respuesta de nuestro sistema a los cambios en las condiciones del flujo, se usó el procedimiento habitual. En éste, se simulan los cambios mencionados a través de un tren de pulsos a alta frecuencia . Así se visualizó, utilizando el software que suministra el fabricante, la forma de la respuesta a pulsos de 5000 Hz. Se fueron ajustando los mando adecuados (Damping y Filtre) hasta obtener una respuesta con la forma aconsejada por el fabricante (fig 4.9).
5. **Acondicionamiento de la señal de salida:** Una vez realizados los ajustes anteriores, es necesario tratar la señal de salida para aprovechar al máximo la resolución de nuestra tarjeta de adquisición de datos. Para realizar estas operaciones, nuestro equipo cuenta con dos funciones básicas: Voffset, que resta una tensión negativa a la tensión de salida y Gain, que se multiplica a la señal resultante.

A modo de ejemplo, supongamos que los valores de tensión de salida medidos están en el intervalo (-5V,-4V), y nuestra tarjeta de adquisición datos admite

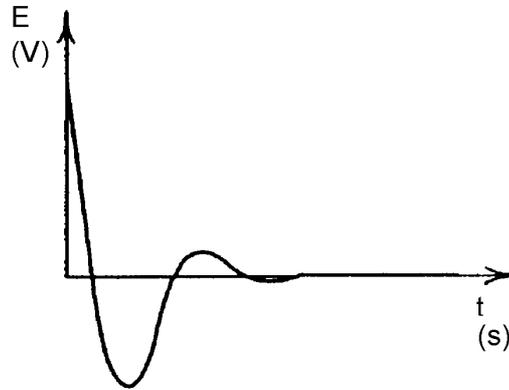


Figura 1.9: Respuesta al pulso aconsejada por fabricante

un rango de valores de 0V a 10V. Pues bien, si ajusto $\text{Gain} = 8$ y $\text{Voffset} = -5,125$ V, entonces mi nuevo rango de tensiones será (1V,9V), que supone un buen aprovechamiento de la tarjeta de adquisición de datos.

1.2.3. Calibración de la sonda

Se describe a continuación, el proceso seguido para la obtención de la curva de calibración de la sonda utilizada, que permite obtener los valores de velocidad a partir de las tensiones generadas, por el equipo de anemometría.

El valor de tensión depende de la velocidad del fluido en el que se encuentra inmerso la sonda. Por tanto existirá una relación de la forma:

$$E = f(U_1, U_2, U_3). \quad (1.3)$$

E es la tensión y U_1, U_2, U_3 son los valores de las tres componentes de la velocidad, en el punto de medida. Dado que los coeficientes de transferencia de calor no son los mismos en las tres direcciones del espacio, tanto por la naturaleza del flujo como por la geometría del hilo, se tendrá, que cada una de las componentes de la velocidad, contribuye de forma distinta al valor de la tensión E .

En el caso de utilizar una sonda simple, se puede considerar que únicamente la velocidad en la dirección del flujo contribuye a la refrigeración del hilo. Esto puede verse en el siguiente desarrollo.

Tomemos \bar{U}_1 como el valor de la velocidad media en la dirección longitudinal del túnel, y sean u_1, u_2, u_3 las fluctuaciones en las tres direcciones, entonces el valor de la velocidad será

$$V = \sqrt{(\bar{U}_1 + u_1)^2 + u_2^2 + u_3^2} = \bar{U}_1 \sqrt{1 + \frac{2u_1}{\bar{U}_1} + \frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}{\bar{U}_1^2}}. \quad (1.4)$$

Para intensidades turbulentas moderadas (T_u pequeños), se tendrá que $U_1 \gg u_1, u_2, u_3$ y por tanto se cumplirá

$$V \simeq \bar{U}_1 + u_1. \quad (1.5)$$

De esta forma se puede simplificar la ecuación (4.3) quedando

$$E = f(U_1). \quad (1.6)$$

Se pueden utilizar distintos tipos de funciones para modelar la relación (4.6), leyes potenciales, polinómicas, etc. Entre estas destaca la Ley de King, obtenida en el capítulo anterior. De todas estas se optó por una ley polinómica, por ser la que mejor correlación ofrece para nuestras medidas. De esta forma expresamos la relación en la siguiente forma

$$E = C_0 + C_1 U + C_2 U^2. \quad (1.7)$$

Los valores de las constantes C_0, C_1 y C_2 se deben obtener mediante experimentación.

El método para la obtención de la curva de calibración, se basa en la obtención de varios pares de valores (E,U). Por tanto, para poder calibrar la sonda, es necesario conocer el valor de la velocidad en el punto el que está situada la misma. Además es necesario que esta velocidad sea uniforme, por lo que se procuraran intensidades turbulentas bajas.

Para conocer la velocidad del fluido, se hizo uso de un tubo de Pitot, del que se hablará más adelante. Puesto que no fue posible situar en el mismo punto, el tubo de Pitot y la sonda de hilo caliente, se situó el Pitot en una sección del túnel anterior a la ocupada por la sonda. Esto no introduce errores, ya que se comprobó que los perfiles de velocidad eran prácticamente iguales en las dos secciones. Esto se debe a que si bien, los perfiles no están totalmente desarrollados, dada la corta longitud del túnel, la capa límite se modifica lentamente.

Para mejorar la uniformidad del flujo en el túnel, se utilizó una tobera convergente, de madera, unida al túnel por el extremo de entrada del aire.

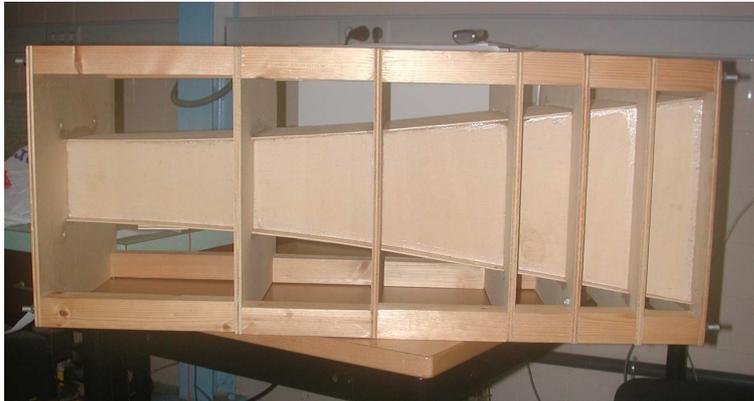


Figura 1.10: Tobera convergente de madera

1. **Medidas con tubo de Pitot:** En el trabajo realizado por Daniel Polo (2000), se hace una descripción del tubo de Pitot, que transcribimos aquí. 'El tubo de Pitot, es un conducto delgado, a fin de no perturbar mucho la corriente, que se introduce paralelo a la dirección de la velocidad media. El tubo presenta dos orificios, uno lateral por el que se capta la presión estática en la corriente, y otro en la punta, donde se pretende medir la presión de remanso. Para alcanzar dicho punto de remanso, la deceleración se hace lo más isentrópica posible, por lo que el tubo presenta una forma más o menos redondeada. Ambos orificios se conectan mediante tubos a los extremos de una columna de líquido, por lo que ésta queda sometida, a la diferencia entre la presión dinámica y la estática. Esta diferencia representa la energía cinética del fluido por unidad de volumen.'



Figura 1.11: Tubo de Pitot

Así, si no se tienen en cuenta pérdidas (isentropía) se puede escribir

$$\begin{cases} P_0 = P + \frac{1}{2}\rho_{aire}v^2 \\ P_0 - P = \Delta P = \frac{1}{2}\rho_{aire}v^2. \end{cases} \quad (1.8)$$

Aplicando fluidoestática en la columna de líquido se obtiene

$$\Delta P = \rho_{liq}gh, \quad (1.9)$$

e igualando las ecuaciones (4.8) y (4.9) se llega a

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\rho_{aire}v^2 &= \rho_{liq}gh \\ v &= \sqrt{2\frac{\rho_{liq}}{\rho_{aire}}gh}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Esta ecuación representa la relación de la velocidad con la altura de la columna de líquido. Si derivamos esta expresión respecto a la altura h , obtendremos una expresión de la sensibilidad del tubo de Pitot

$$\left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2h}} \sqrt{\frac{\rho_{liq}}{\rho_{aire}}} g. \quad (1.11)$$

Como se puede observar, la sensibilidad depende de la altura de la columna y de la densidad del líquido. Para obtener buenas sensibilidades a bajas velocidades, tendremos que utilizar un fluido de baja densidad. Aunque en trabajos anteriores (ver Daniel Polo 2000), se hizo uso del etanol ($\rho = 802 \text{ Kg/m}^3$), en este trabajo se utilizó hexano ($\rho = 675 \text{ Kg/m}^3$). Cabría pensar que el hexano podría dar problemas por su volatilidad, pero se comprobó que al ser el tiempo de toma de muestras, para cada velocidad, suficientemente pequeño (10 s), este efecto es totalmente inapreciable y no introduce errores significativos.

Para mejorar aun más la sensibilidad del Pitot, se inclinó el tubo de vidrio, que contenía la columna de hexano, un ángulo $\alpha=15^\circ$ respecto al plano que lo contiene, y un ángulo $\beta=60^\circ$ respecto al plano horizontal. Para esto se construyó un soporte de madera (figuras 4.12 y 4.13). De esta forma, la relación entre la altura de la columna (h) y la longitud real que recorre el líquido en el interior del tubo (l) es:

$$h = l \sin \alpha \sin \beta \quad (1.12)$$

Las ecuaciones que proporcionan la velocidad y la sensibilidad pasan a ser



Figura 1.12: Soporte para la columna de líquido del Pitot

$$v = \sqrt{2 \frac{\rho_{liq}}{\rho_{aire}} g l \sin \alpha \sin \beta}, \quad (1.13)$$

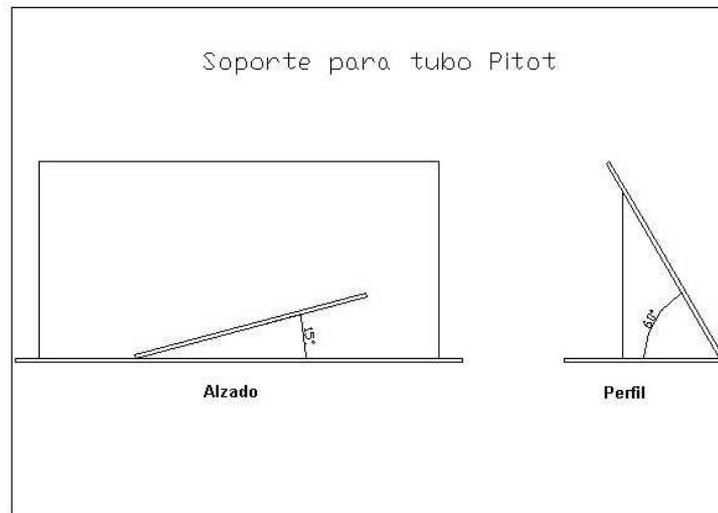


Figura 1.13: Ángulos del soporte

$$\left(\frac{\partial v}{\partial l}\right)^{-1} = \frac{\sqrt{2}l}{\sqrt{\frac{\rho_{liq}}{\rho_{aire}} g \sin \alpha \sin \beta}}. \quad (1.14)$$

Las mejoras obtenidas se pueden observar analizando las tablas (ver Tabla 4.1, 4.2 y 4.3) en las que se muestran las velocidades y sensibilidades para distintas alturas, correspondientes a distintos líquidos.

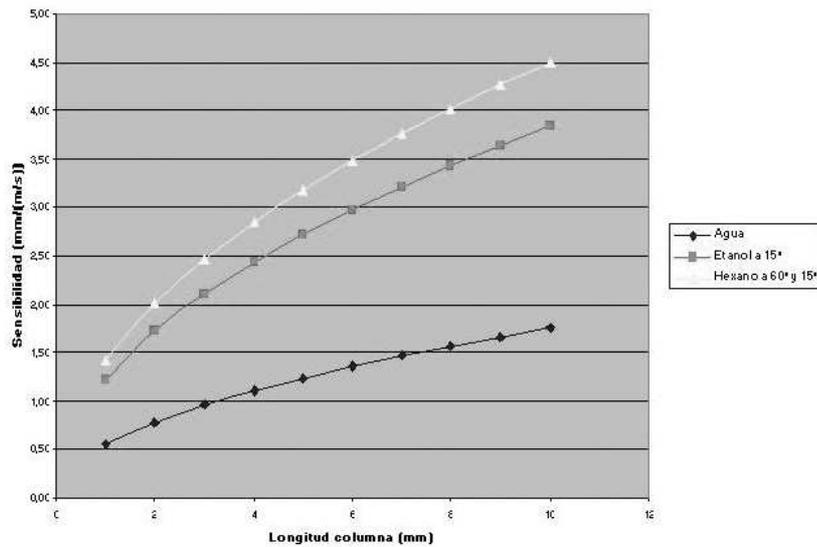
Altura (mm)	Velocidad (m/s)	Derivada ([m/s]/mm)	Sensibilidad (mm/[m/s])
1	3,61	1,81	0,55
2	5,11	1,28	0,78
3	6,26	1,04	0,96
4	7,23	0,90	1,11
5	8,08	0,81	1,24
6	8,85	0,74	1,36
7	9,56	0,68	1,46
8	10,22	0,64	1,56
9	10,84	0,60	1,66

Tabla 4.1 Para agua

Altura (mm)	Velocidad (m/s)	Derivada ([m/s]/mm)	Sensibilidad (mm/[m/s])
1	1,65	0,82	1,21
2	2,33	0,58	1,72
3	2,85	0,48	2,10
4	3,29	0,41	2,43
5	3,68	0,37	2,72
6	4,03	0,34	2,97
7	4,36	0,31	3,21
8	4,66	0,29	3,43
9	4,94	0,27	3,64

Tabla 4.2 Para etanol $\alpha=15^\circ$

Altura (mm)	Velocidad (m/s)	Derivada ([m/s]/mm)	Sensibilidad (mm/[m/s])
1	1,41	0,70	1,42
2	1,99	0,50	2,01
3	2,44	0,41	2,46
4	2,81	0,35	2,84
5	3,14	0,31	3,18
6	3,44	0,29	3,48
7	3,72	0,27	3,76
8	3,98	0,25	4,02
9	4,22	0,23	4,27

Tabla 4.3 Para hexano $\alpha=60^\circ$ $\beta=15^\circ$ 

2. **Realización de la calibración:** Para la obtención de los coeficientes de la ecuación polinómica (4.7) se obtuvieron medidas de parejas de valores (E,U). Para ello se utilizó el montaje descrito anteriormente, formado por el túnel, la tobera, el tubo de Pitot y el sistema de anemometría.



Figura 1.14: Montaje para la calibración de la sonda

Para minimizar las posibles perturbaciones en la corriente debidas al Pitot y que podrían afectar a las medidas tomadas en la sonda; se colocaron éstos con una pequeña diferencia de altura de aproximadamente 1cm.

Una vez realizado el montaje se procedió a la toma de medidas. Se realizaron mediciones para distintas velocidades medias del fluido, controladas mediante el variador de frecuencia. Se realizaron medidas para 20 velocidades medias, tomándose para cada una de ellas muestras de 10.000 datos recogidas con una frecuencia de muestreo de 1.000 Hz.

Se muestra en la gráfica (ver figura 4.15) la curva de calibración obtenida, para la sonda tipo TP 55P11, junto con el coeficiente de correlación.

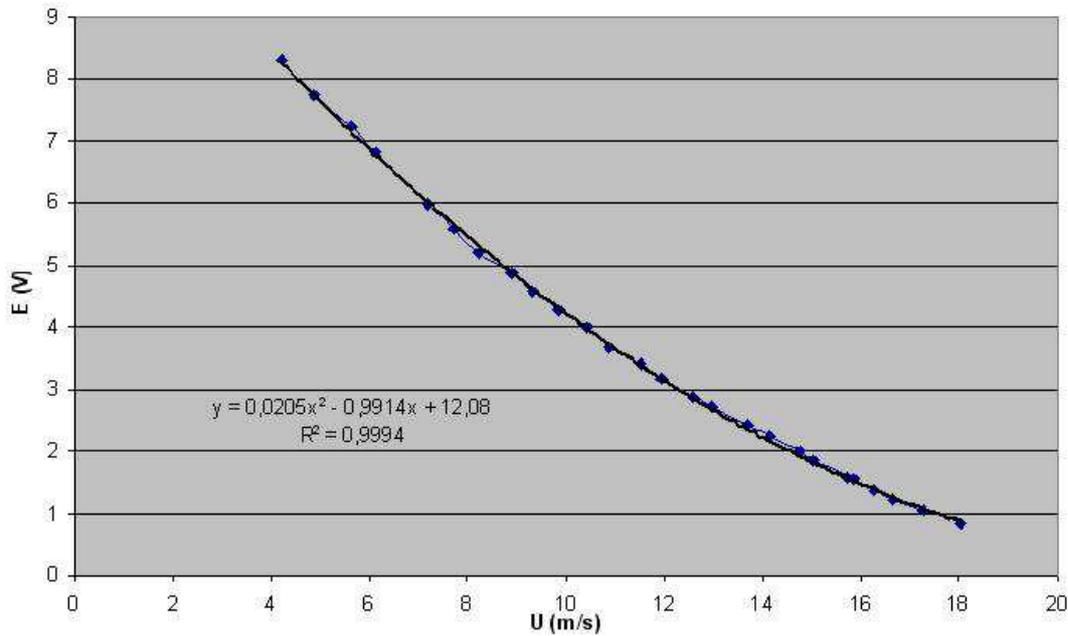


Figura 1.15: Curva de calibración para la sonda 55P11

1.3. Adquisición y tratamiento de datos

Si bien el equipo de anemometría tiene su propio sistema de adquisición de datos, en el desarrollo de este trabajo no se ha podido hacer uso del mismo. Tras realizar varias pruebas durante el proceso de puesta a punto de dicho equipo, nos encontramos con que el software suministrado por el fabricante no funcionaba correctamente. En el momento de escribir este documento ya se ha resuelto parte del problema pues el equipo ya adquiere datos de forma correcta, pero existen todavía problemas con el formato del archivo en el que se almacenan que no se han podido resolver, aunque se espera su resolución en un futuro próximo.

Debido a estas incidencias, ha sido necesario utilizar una tarjeta de adquisición de datos instalada en un PC.

De esta forma, el sistema de adquisición de datos está formado por el equipo de anemometría, la tarjeta de adquisición de datos y el PC. La tarjeta de adquisición usada, fue el modelo DAS-1402 de KEITHLEY-METRABYTE. Su función consiste en convertir la señal analógica, proveniente de la salida BNC del anemóme-

tro, en una señal digital que el ordenador pueda procesar. Si bien este modelo es algo antiguo, es suficientemente potente para las necesidades de este trabajo.

Para su correcto uso, la tarjeta de adquisición de datos, debe ser configurada. La forma de hacerlo está explicada en el manual de la misma, y no se va a tratar aquí. Para la adquisición de datos, se utilizó el software que se suministra con la misma. Éste, permite muestrear a frecuencias de muestreo bastante altas, hasta 100KHz, pero presenta importantes limitaciones en cuanto al tamaño de las muestras, ya que no permite tomar más de 10.000 muestras cada vez. Por tanto fue necesario muestrear varias veces en cada experimento, para poder tomar muestras de 500.000 datos, lo que supuso un coste de tiempo importante. Como se verá, esta limitación tuvo consecuencias a la hora de realizar los experimentos encaminados a obtener valores de la longitud integral, que no se realizaron con éxito dado el excesivo tiempo requerido.

1.4. Experimentos realizados

La turbulencia homogénea se caracteriza por la inexistencia de direcciones preferentes para los torbellinos que se generan. Por tanto, para que se genere este tipo de turbulencia, sería necesario que no existiesen contornos rígidos o gradientes de presión, que de alguna manera den lugar a estas direcciones preferentes, como en el caso de las corrientes atmosféricas.

En el laboratorio se utilizan métodos experimentales, que si bien producen una turbulencia anisótropa en las zona cercana a la generación de la misma, conforme nos alejamos de esta se hace isotropa. Entre estos métodos están los métodos pasivos basados en el uso de rejillas.

En el presente trabajo se pretendía caracterizar los regímenes turbulentos obtenidos, haciendo uso de un dispositivo con matrices de agujeros enfrentados, bajo diferentes topologías y configuraciones.

En este sentido, se realizaron los siguientes experimentos, con la intención de generar turbulencia y obtener números de R_λ altos:

1. **Generación de turbulencia mediante parrillas de chorros enfrentados e inyectados en una corriente principal:** En este caso se utilizó el disposi-

tivo 1 (figuras 4.1 y 4.2), descrito al comienzo de este capítulo. Se acopló dicho dispositivo a la entrada del túnel, dejando libre la entrada de aire paralela a la sección transversal del túnel. De esta forma los chorros se inyectan dentro de una corriente principal que sigue la dirección del túnel.

2. **Generación de turbulencia mediante parrillas de chorros enfrentados sin entrada de corriente principal:** Se utilizó el dispositivo anterior, pero en este caso se tapó la entrada paralela a la sección transversal del túnel. De esta forma todo el caudal entraba a través de los chorros. Se buscaba una mayor intensidad turbulenta. Este ensayo se realizó para distintas velocidades medias. Además se tomaron datos en dos puntos distintos del túnel, a la distancia de 620mm de la parrilla y a 1500mm de la misma. Se pudo observar la atenuación de la turbulencia conforme recorría el túnel



Figura 1.16: Montaje con dispositivo generador de turbulencia

3. **Generación de turbulencia mediante parrillas de chorros enfrentados y malla metálica sin entrada de corriente principal:** Se ensayó, como método para mejorar el rango de escalas de turbulencia, la colocación de mallas metálicas antes de los agujeros que generaban los chorros. De esta forma se intentaba generar las escalas pequeñas artificialmente y aumentar su proporción. Se realizó este experimento a distintas velocidades medias.



Figura 1.17: Montaje con dispositivo y mallas

4. **Generación de turbulencia mediante fractal:** Se realizaron ensayos con el dispositivo 2 descrito al comienzo de este capítulo (figura 4.3). Se realizaron ensayos para distintas velocidades medias.



Figura 1.18: Montaje con dispositivo fractal