

Capítulo 1

Resultados experimentales.

1.1. El espectro de energía.

Como se vio en el capítulo 2, el espectro de energía nos muestra la contribución a la energía cinética turbulenta que realizan los torbellinos de distintos tamaños. Además es una herramienta fundamental para obtener una serie de magnitudes, como la velocidad de disipación de energía turbulenta (ϵ), la escala de Kolmogorov (η), el número de Reynolds correspondiente a la escala de Taylor (R_λ) y la longitud integral(L).

Para la obtención del espectro se recurrió a un método basado en la transformada de Fourier de la fluctuación de velocidad obtenida experimentalmente, que a continuación describimos.

Partiendo de una muestra $u[n]$ de N valores de la fluctuación de velocidad tomados a una frecuencia (f_s), se puede obtener el espectro en frecuencias de dicha muestra a través de la transformada discreta de Fourier (DFT ver anexoA), dada por

$$U(f) = \sum_{n=0}^{N-1} u[n]e^{-j2\pi nt_s f} \quad f = 0, \frac{f_s}{N}, \frac{2f_s}{N}, \dots, \frac{f_s}{2} \quad (1.1)$$

donde $t_s = 1/f_s$.

Teniendo en cuenta la definición del espectro de energía dada por la ecuación

(2.15), podemos relacionarlo con el espectro de las fluctuaciones

$$E_{11}(f) = \frac{2}{T} U(f)U^*(f), \quad (1.2)$$

donde T es el tiempo que dura el muestreo ($T = N/f_s = Nt_s$)

En cada experimento realizado, se tomaron 50 muestras ($M=50$) de 10.000 datos. El espectro correspondiente se obtuvo haciendo la media para cada uno de 50 espectros resultantes.

$$E_{medio}(f) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^M E_k(f). \quad (1.3)$$

En el Anexo A se describe en detalle el programa en Matlab que nos permite obtener el espectro de energía.

1.1.1. Resultados obtenidos.

En los espectros obtenidos, se pueden distinguir tres zonas o rangos, tal y como predice la teoría de Kolmogorov (figura 5.1).

- El primer rango corresponde a las escalas grandes.
- El rango inercial es el correspondiente a la zona paralela a la recta de pendiente $-5/3$.
- Por último aparece el rango disipativo, en el que los esfuerzos viscosos transforman la energía cinética en calor.

Dado que uno de los objetivos de este trabajo era obtener rangos inerciales anchos, comparamos a continuación los espectros obtenidos con los diferentes experimentos realizados.

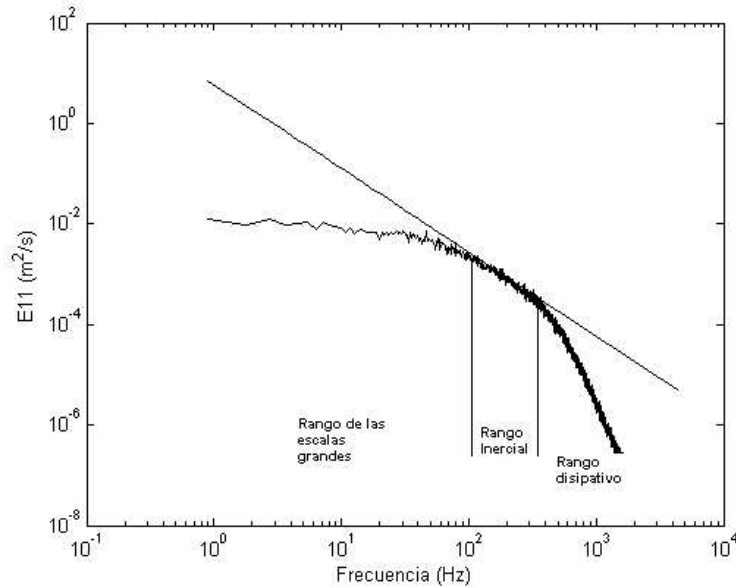


Figura 1.1: Distintas zonas del espectro.

1. **Espectro para dispositivo 1 sin malla y abierto:** Corresponde a los experimentos realizados con el dispositivo de matriz de chorros enfrentados, 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. Se muestra el espectro para una velocidad media $\bar{U} = 14,9 \text{ m/s}$ (ver figura 5.2).
2. **Espectros para dispositivo 1 sin malla y tapado:** Corresponden a los experimentos realizados con el dispositivo de matriz de chorros enfrentados, tapando la entrada de aire paralela a la sección transversal del túnel. De esta forma toda la corriente entraba por los chorros laterales. Se muestran los espectros para distintas velocidades medias (ver figura 5.3). Se puede ver que conforme disminuye la velocidad media, baja el área bajo el espectro. Esto es debido a que cuando disminuye $\bar{U}$, la intensidad turbulenta decae y por tanto la energía cinética turbulenta, ya que los gradientes de velocidad son mucho menores.
3. **Espectros para dispositivo 1 con malla y tapado:** Corresponden a los experimentos realizados con el dispositivo de matriz de chorros enfrentados, al que se le añadieron dos mallas metálicas frente a los chorros. Además se tapó la entrada de aire paralela a la sección transversal del túnel. Se muestran los espectros para distintas velocidades medias (ver figura 5.4).

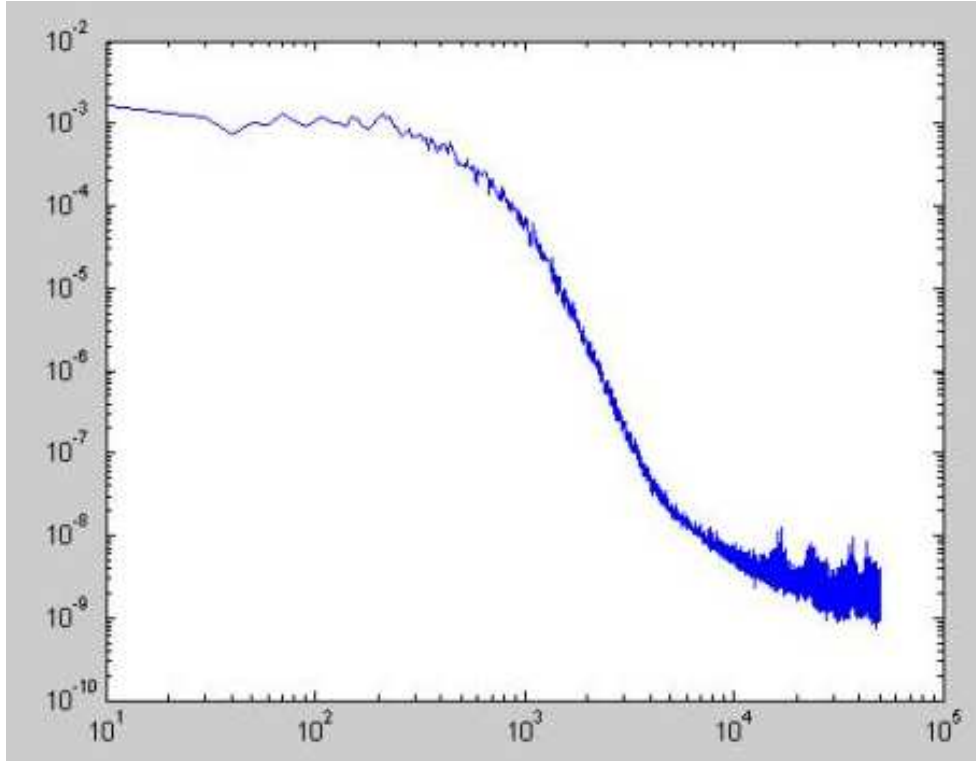


Figura 1.2: Espectro a $U=14.9$ m/s para dispositivo 1 sin malla y abierto.

4. **Espectros para dispositivo 2 (fractal):** Corresponden a los experimentos realizados con el dispositivo de matriz de chorros de distintos tamaños con configuración fractal enfrentados. Se muestran los espectros para distintas velocidades medias(ver figura 5.5). En este experimento se puede apreciar una atenuación del valor del espectro respecto a los anteriores, ya que el nivel de fluctuaciones (u') es muy bajo. Esto es debido a que el ventilador utilizado es axial y por tanto no es el apropiado para vencer las elevadas pérdidas de carga que se producen en las entradas a este dispositivo. Por otro lado, es posible que al haber agujeros de distinto tamaño, los chorros finos suavicen el perfil de velocidades de la corriente cercana a los mayores, lo que provoca una disminución de la turbulencia al ser menor la cortadura generada.

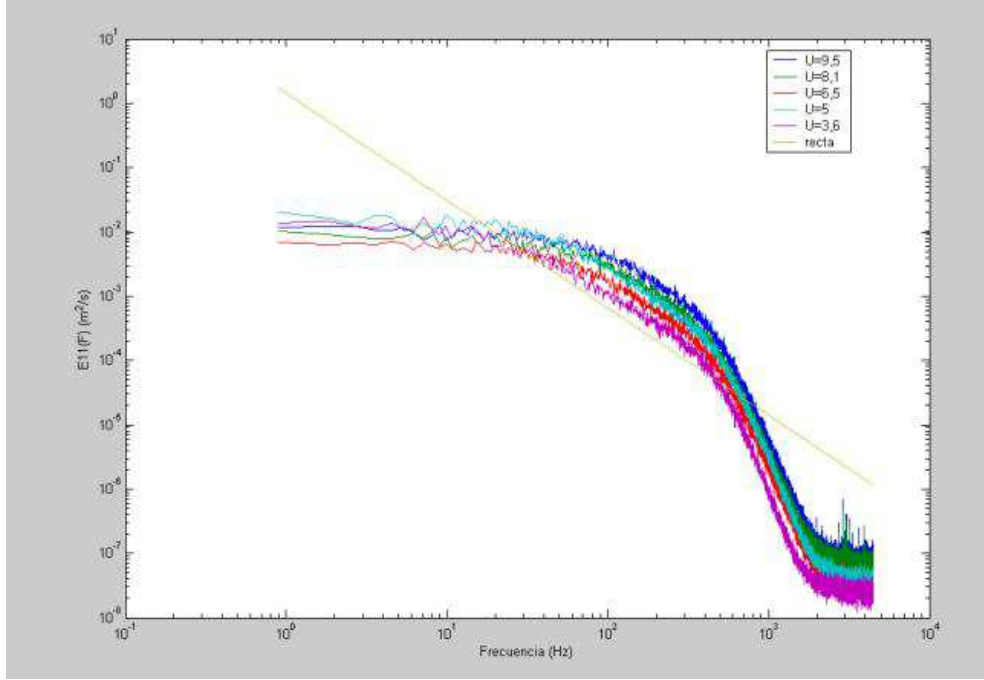


Figura 1.3: Comparación de espectros para dispositivo 1 sin malla a distintas $\bar{U}$ (m/s).

1.2. La disipación de energía cinética turbulenta.

Se muestra a continuación el método seguido para la obtención de ϵ en los experimentos realizados.

En primer lugar, se puede obtener una aproximación inicial, que nos permita tener una idea de los resultados esperados. Para ello basta tener en cuenta, que la energía cinética por unidad de masa en la turbulencia será del orden de u'^2 . Por otro lado, la tasa a la que los torbellinos grandes suministran energía es proporcional a la frecuencia característica de los mismos, es decir u'/L . Como la energía disipada debe ser igual a la suministrada por las escalas grandes, se tendrá entonces que

$$\epsilon \sim \frac{u'^3}{L}. \quad (1.4)$$

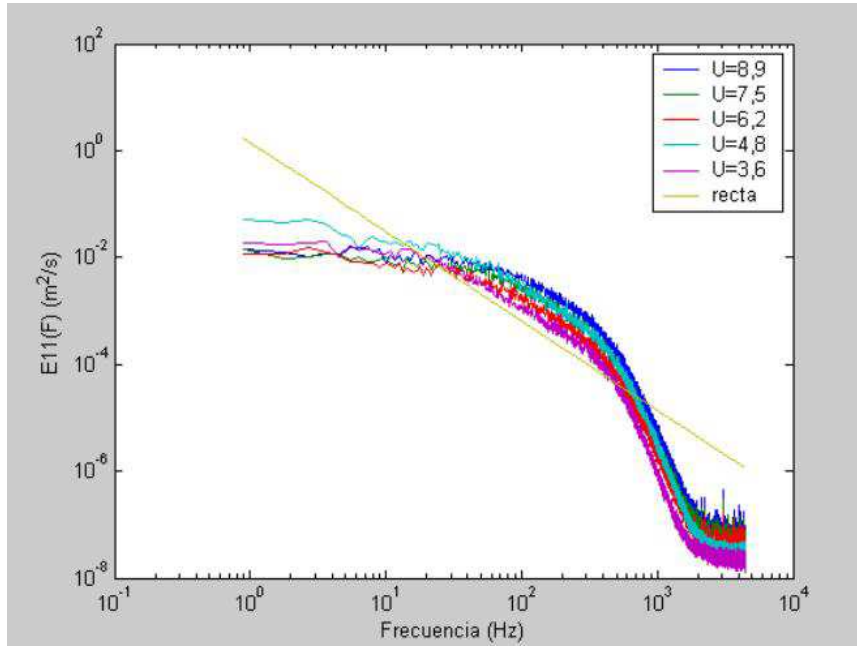


Figura 1.4: Comparación de espectros para dispositivo 1 con mallas a distintas $\bar{U}$ (m/s).

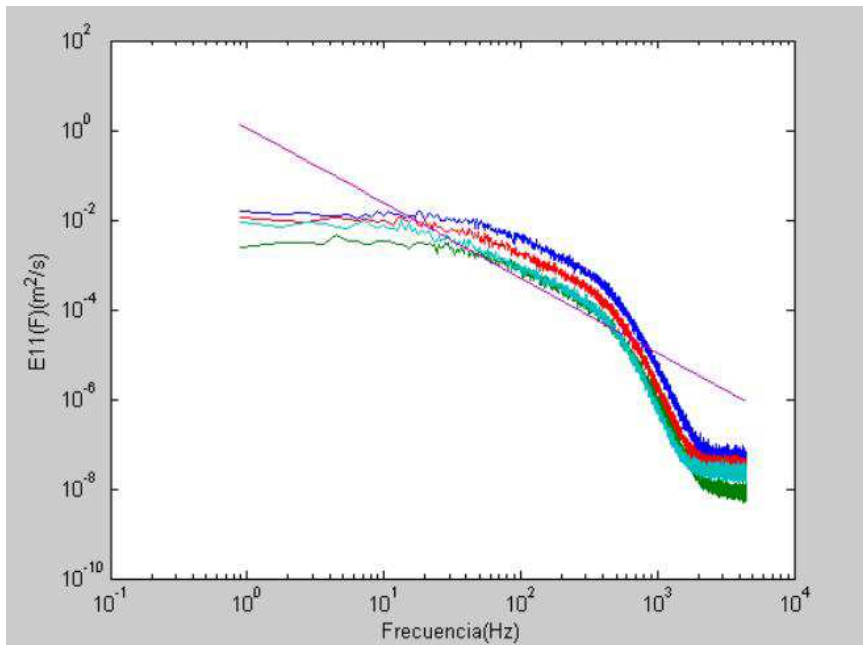


Figura 1.5: Comparación de espectros para dispositivo fractal a distintas $\bar{U}$ (m/s).

Así para nuestro sistema, se tendrá una primera aproximación para ϵ dada por

$$\left\{ \begin{array}{l} u' \sim 1\text{m/s} \\ L \sim 0,01\text{m} \end{array} \right. \Rightarrow \epsilon \sim 100\text{m}^2/\text{s}^3 \quad (1.5)$$

De los posibles métodos que existen, el utilizado en este trabajo para obtener la velocidad de disipación, ha sido el método basado en la función $k_1^2 E_{11}(k_1)$. Dado que este método es bastante exacto y presenta poca dispersión en los datos. Además es un método muy cómodo, a la hora de implementarlo, si se cuenta con una herramienta numérica adecuada, como en nuestro caso.

Como se vió en el capítulo 2, existe una ecuación que relaciona la velocidad de disipación con el espectro unidimensional de energía

$$\epsilon = 15\nu \int_0^\infty k_1^2 E_{11}(k_1) dk_1. \quad (1.6)$$

En el apartado anterior describimos cómo se obtuvo el espectro. A partir de $E_{11}(f)$, podemos obtener el espectro en función del número de ondas, si más que realizar las siguientes transformaciones, en virtud de la hipótesis de Taylor,

$$k_1 = \frac{2\pi f}{\bar{U}}, \quad (1.7)$$

$$E_{11}(k_1) = \frac{\bar{U}}{2\pi} E_{11}(f). \quad (1.8)$$

A partir de cierta frecuencia la señal representada corresponde a un ruido y por tanto no se corresponde con el verdadero valor del espectro. Para poder integrar, habrá que eliminar ese rango (a partir de unos 1.000 Hz). Se sustituirá por una función potencial que se obtiene extrapolando el intervalo correspondiente al rango disipativo de la función $k_1^2 E_{11}(k_1)$ hasta una frecuencia suficientemente grande para poder completar la integración. Dicha función potencial resulta una recta cuando se representa en coordenadas logarítmicas. En la figura (5.6) se muestra la función resultante.

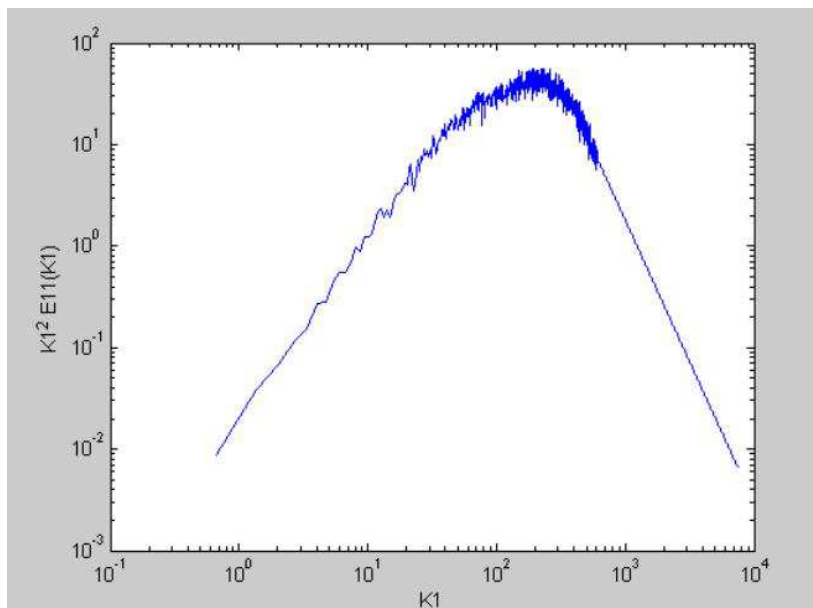


Figura 1.6: Extrapolación de la función $k_1^2 E_{11}(k_1)$.

En el apéndice A se describe el programa realizado en Matlab, para implementar el método explicado anteriormente. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de ϵ , para los distintos experimentos realizados (tablas 5.2, 5.3 y 5.4).

En los resultados mostrados, podemos apreciar que los valores obtenidos para ϵ , están lejos de los esperados según la estimación realizada en (5.5). Dado que los valores de u' son del orden de 1 m/s, la explicación estaría en que la longitud asociada a las fluctuaciones de menor frecuencia son mayores de lo esperado. Analizando el dispositivo y el montaje utilizado, hemos llegado a la conclusión de que existe una inestabilidad importante en la turbulencia que la hace no homogénea. Así, después de entrar lateralmente los chorros en el dispositivo a través de los agujeros, el fluido es obligado por la corriente que atraviesa el túnel a realizar un cambio de dirección en su trayectoria consistente en un giro de 90° . Esto provoca que se genere un chorro a la salida del dispositivo y entrada del túnel, resultado de la fusión de los generados por el dispositivo, que además podría presentar variaciones de dirección (fluctuaciones laterales). Estas fluctuaciones serían de baja frecuencia, siendo la longitud característica del orden de las dimensiones de la sección transversal del túnel. Estas se reflejarán por tanto en el espectro de energía, en la zona de bajos números de onda. La aparición de estas fluctuaciones asociadas al tamaño de la sección del túnel ($L=0,1$ m), explicarían que la velocidad de disipación ϵ tome valores tan bajos.

$U(m/s)$	$u'(m/s)$	$\epsilon(m^2/s^3)$
9,44	1,10	3,6100
8,81	1,01	3,4897
8,10	0,94	3,2843
7,36	0,85	3,0445
6,58	0,75	2,7899
5,81	0,65	2,4651
5,06	0,55	2,0543
4,31	0,43	1,5673
3,63	0,30	0,9411

Tabla 1.1: Velocidades de disipación para el dispositivo sin mallas laterales

$U(m/s)$	$u'(m/s)$	$\epsilon(m^2/s^3)$
8,94	1,10	3,7963
8,38	1,03	3,5707
7,49	0,93	3,4153
6,97	0,87	3,2134
6,23	0,79	3,0729
5,54	0,70	2,6812
4,81	0,60	2,2962
4,16	0,47	1,6641
3,61	0,32	0,9699

Tabla 1.2: Velocidades de disipación para el dispositivo con mallas laterales

$U(m/s)$	$u'(m/s)$	$\epsilon(m^2/s^3)$
5,31	0,61	3,1210
5,11	0,59	2,9645
4,61	0,52	2,6661
4,21	0,44	2,1282
3,90	0,37	1,7343
3,61	0,31	1,3009

Tabla 1.3: Velocidades de disipación para el dispositivo fractal



Figura 1.7: Dispositivo y túnel con malla transversal.

En un intento de homogeneizar el flujo entrante en el túnel, se realizó el experimento introduciendo una malla metálica entre la sección transversal de entrada al túnel y la salida del dispositivo generador de turbulencia (con matriz de chorros). Además se permitió la entrada de una pequeña corriente paralela a los laterales de la pared del túnel, con la intención de suavizar el perfil de velocidades y minimizar el movimiento lateral del chorro central. Para ello se practicaron dos filas de taladros a la tapa de madera que impedía la entrada de corriente según la dirección longitudinal del túnel (ver figura 5.7). Sin embargo estos intentos fueron infructuosos, consiguiéndose únicamente disminuir la intensidad turbulenta y el R_λ , sin conseguir una mejora en los valores de ϵ .

Por otro lado, queremos hacer referencia a otro método para la obtención de ϵ basado en el espectro de Kolmogorov, usado en otros trabajos (ver Daniel Polo 2000).

En este método, se parte de las hipótesis de Kolmogorov que permiten describir el rango inercial a través de la ecuación

$$E_{11} = C_k \epsilon^{2/3} k_1^{-5/3}, \quad (1.9)$$

en la que C_k es la constante de Kolmogorov. Tomándose de los valores de C_k recopilados por Sreenivasan (1995), el obtenido por Gad-el-Hak y Corrsin (1974) $C_k = 0,57$. Luego se ajusta la region correspondiente al rango inercial del espectro obtenido ex-

perimentalmente, mediante la función

$$E_{11} = Ak_1^{-5/3}. \quad (1.10)$$

Así a partir del valor de A obtenido, se puede calcular ϵ

$$A = C_k \epsilon^{2/3}. \quad (1.11)$$

En el presente trabajo no se utilizó este método debido a que el basado en la integral de la función $k_1^2 E_{11}(k_1)$, es más exacto y da lugar a menos dispersión en los datos. Como puede verse en el trabajo realizado por Daniel Polo (2000), en el método de Kolmogorov aparecían mayores dispersiones, debido a que al ceñirnos únicamente al rango inercial, el número de puntos utilizados para extrapolar la curva que describe el rango inercial, es pequeño, en comparación con el número de puntos que intervienen en el método de la integral.

1.3. Obtención de Re_λ y η .

A partir de los valores de ϵ , se obtienen los correspondientes al resto de las magnitudes que nos van a servir para describir la turbulencia. Para ello basta con aplicar las ecuaciones vistas en el capítulo 2. Así para el número Re_λ se tendrá

$$\lambda = u' \left(\frac{15\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.12)$$

$$Re_\lambda = \frac{u'\lambda}{\nu}. \quad (1.13)$$

Y para la escala de Kolmogorov

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (1.14)$$

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en los distintos experimentos realizados (tablas 5.5, 5.6 y 5.7).

$\overline{U}(m/s)$	T_u	$\lambda(m)$	Re_λ	$\eta(m)$
9,44	0,1169	0,0087	641,48	0,0001748
8,81	0,1158	0,0082	556,83	0,0001735
8,10	0,1160	0,0078	487,88	0,0001790
7,36	0,1155	0,0073	414,37	0,0001824
6,58	0,1139	0,0067	336,77	0,0001865
5,81	0,1124	0,0062	271,59	0,0001923
5,06	0,1081	0,0057	208,68	0,0002013
4,31	0,0992	0,0051	146,25	0,0002154
3,63	0,0831	0,0047	93,83	0,0002447

Tabla 1.4: Resultados para el dispositivo con matriz de chorros sin mallas laterales

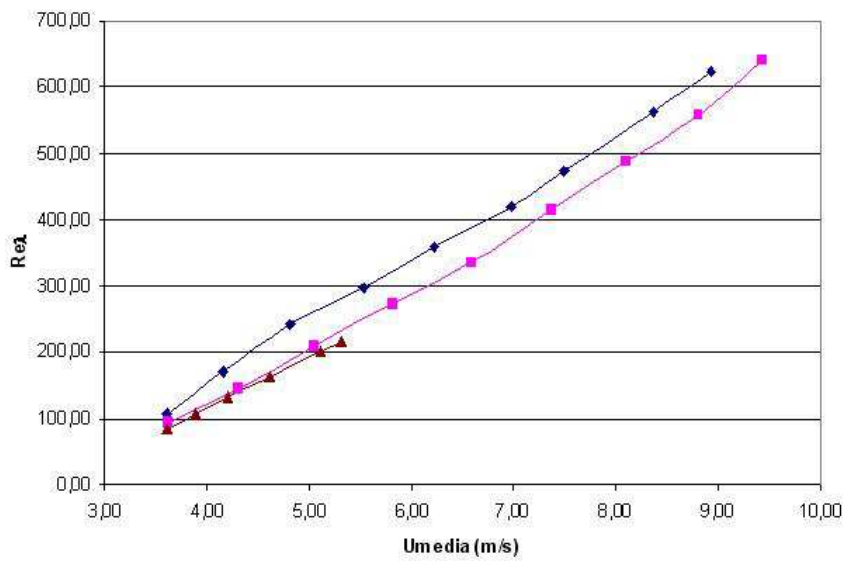
$\overline{U}(m/s)$	T_u	$\lambda(m)$	Re_λ	$\eta(m)$
8,94	0,1232	0,0085	622,71	0,0001726
8,38	0,1230	0,0082	562,31	0,0001753
7,49	0,1248	0,0076	472,85	0,0001773
6,98	0,1245	0,0073	420,88	0,0001800
6,23	0,1271	0,0068	357,83	0,0001820
5,54	0,1263	0,0064	299,08	0,0001883
4,81	0,1256	0,0060	241,31	0,0001958
4,16	0,1124	0,0054	169,79	0,0002122
3,62	0,0898	0,0049	107,12	0,0002428

Tabla 1.5: Resultados para dispositivo con mallas laterales

Analizando estos datos se puede observar que se obtienen números de Re_λ bastante altos. Comparando con los resultados obtenidos por Daniel Polo (2000) mediante la parrilla de chorros en la dirección del flujo principal ($Re_\lambda \sim 150$), con los obtenidos por Gad-el-Hak y Corrsin (1973) inyectando chorros a una corriente principal ($Re_\lambda \sim 150$) o con los publicados por Mydlarsky y Warhaft (1996) que usaron un complejo sistema formado por una malla con placas triangulares que rotaban ($Re_\lambda < 450$); se evidencia que nuestro sistema es un sistema muy eficaz para generar turbulencia, obteniéndose intensidades turbulentas elevadas, para velocidades medias moderadas. Además hay que resaltar la simplicidad de los dispositivos utilizados para la generación de la turbulencia y el pequeño tamaño del túnel (sección cuadrada de 12 mm de lado).

$\overline{U}(m/s)$	T_u	$\lambda(m)$	Re_λ	$\eta(m)$
5,31	0,1162	0,0052	215,70	0,0001813
4,61	0,1117	0,0047	162,62	0,0001886
4,21	0,1042	0,0045	131,87	0,0001995
3,61	0,0863	0,0041	85,07	0,0002256

Tabla 1.6: Resultados para el dispositivo con configuración fractal

Figura 1.8: Evolución de Re_λ con $\overline{U}$.

Por otro lado en los resultados se muestra la evolución del número Re_λ con la velocidad media, poniéndose de manifiesto que disminuye al caer la velocidad, dado que decae la energía total transmitida al fluido y por tanto la energía turbulenta. Esto se puede ver en la siguiente gráfica (ver figura 5.8). Además puede observarse también que la rejilla metálica mejora aún más el número Re_λ , de forma que para una misma velocidad media se tienen valores mayores. Esto se debe a que al introducir en origen a través de la malla y de forma artificial las escalas menores, es menor la cantidad de energía invertida por los torbellinos grandes en la generación de los pequeños y por tanto ϵ disminuye, haciendo λ mayor. Dicho de otro modo, para una misma cantidad de energía, la proporción de torbellinos pequeños aumenta.

También es de utilidad representar la evolución de la intensidad turbulenta (ver figura 5.9), para medir la calidad de nuestro generador de turbulencia, ya que nos

muestra como va variando la proporción de energía suministrada a la turbulencia frente a la total. Esto se puede observar también representando u'^2 frente a $\bar{U}$ (ver figura 5.10). Así se puede observar que la intensidad turbulenta se mantiene prácticamente constante para el rango de velocidades que va de 9,5 a 4,5 m/s y la función que relaciona u'^2 y $\bar{U}^2$ se puede representar como una recta. Esto muestra la eficacia de nuestro dispositivo que es capaz de mantener un alto nivel de turbulencia siempre y cuando la energía suministrada al fluido supere cierto valor, el correspondiente a $\bar{U} > 4,5$ m/s. Además puede observarse que el hecho de incluir las mallas laterales mejora el nivel de turbulencias, aunque eso sí, disminuye la velocidad media del fluido para una misma velocidad del ventilador, ya que introducen mayores pérdidas de carga.

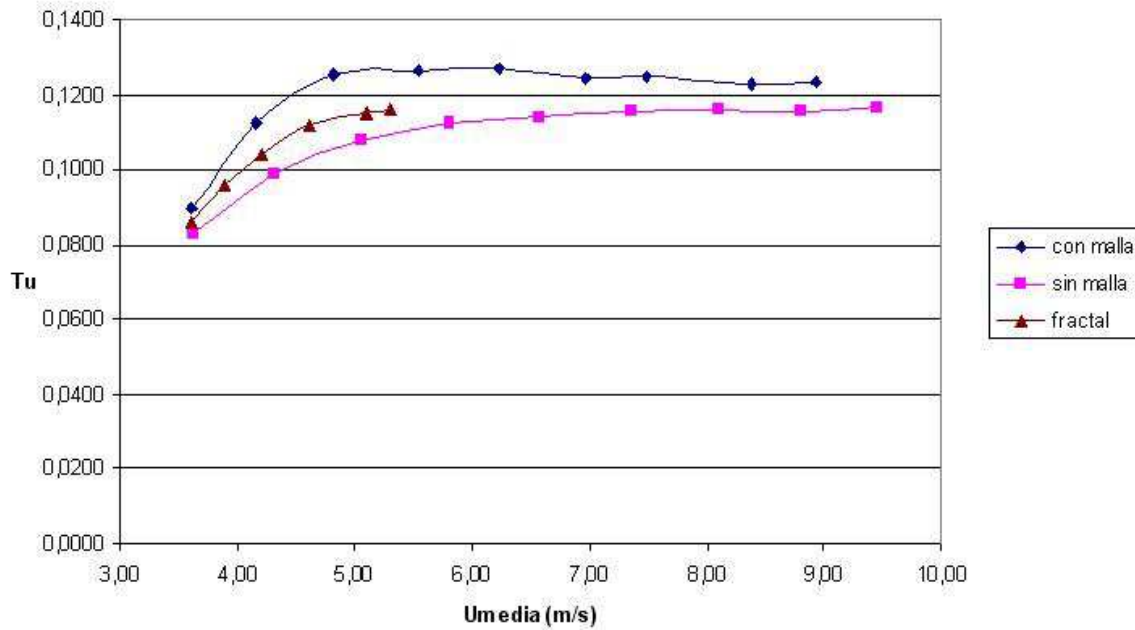
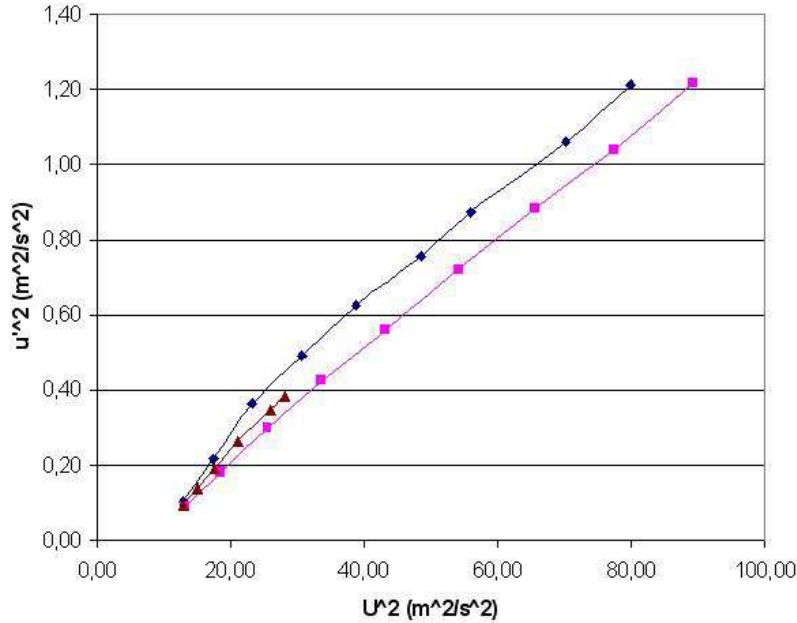


Figura 1.9: Evolución de T_u con $\bar{U}$.

Respecto a los resultados obtenidos con el dispositivo fractal, es evidente que la cantidad de datos o puntos obtenidos es muy pequeña, debido a que el rango de velocidades con el que se pudo trabajar estaba muy limitado por la velocidad máxima alcanzada por el fluido ($\bar{U}_{max} \sim 5$ m/s), dado que el ventilador utilizado no es el apropiado para vencer las pérdidas generadas.

Figura 1.10: Evolución de u'^2 con $\bar{U}^2$.

1.4. Obtención de la longitud integral, L .

Como se explicó en el capítulo 2, la longitud integral es una medida estadística del tamaño típico de los torbellinos grandes que forman parte de la estructura turbulenta y depende de la forma en que se genera la turbulencia. A la hora de medir esta magnitud, tendremos que centrarnos en la zona del espectro de energía correspondiente a las bajas frecuencia. Para poder captar estos torbellinos será necesario muestrear a frecuencia menores que la usada para la obtención del rango inercial, en nuestro caso se tomaron muestras a una frecuencia de 1.000 Hz. Por otro lado para minimizar la dispersión de los datos obtenidos es necesario tomar muestras de gran tamaño. Esto ha supuesto una dificultad en nuestro trabajo, ya que el software con el que se ha contado no permite tomar muestras de tamaño superior a 10.000 datos. Esta limitación añadida a la gran cantidad de datos necesario, ha hecho inviable poder obtener unos resultados fidedignos.

1.5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo nos permiten llegar a las siguientes conclusiones en cuanto a la idoneidad de los dispositivos utilizados para generar turbulencia isótropa y homogénea, así como proponer mejoras.

- Los resultados referentes a la velocidad de disipación ϵ nos indican que la turbulencia obtenida no es homogénea, debido a la aparición de fluctuaciones que tienen una longitud característica del orden de las dimensiones de la sección del túnel.
- Los valores correspondientes a Re_λ y la intensidad turbulenta nos muestran que el sistema de chorros enfrentados es muy eficaz a la hora de generar turbulencia, debido a la cortadura que se produce. Por tanto se propone para futuros trabajos realizar ensayos utilizando el mismo principio, pero haciendo que los chorros se generen en la misma dirección del túnel, para que desaparezca la inestabilidad del chorro central causante de la no homogeneidad del flujo. Así, se podría utilizar una parrilla de chorros paralela al plano transversal al túnel, en la que se alternaran chorros entrantes y salientes para producir la cortadura.
- Además se ha comprobado que combinando el uso de rejillas metálicas con los chorros, el rango inercial es más amplio, obteniéndose valores de Re_λ mayores, debido como se explicó a que se generan más torbellinos de pequeña escala.
- Respecto al sistema fractal, si bien no se han podido conseguir velocidades medias suficientemente grandes para realizar una comparación con el dispositivo de matriz de chorros, se ha comprobado que en el rango de velocidades estudiado no produce mejoras sustanciales. Sin embargo se propone realizar ensayos futuros cuando se cuente con un ventilador apropiado (centrífugo).