

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Facultad de Ingeniería
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental
Montevideo - Uruguay

TESIS DE MAESTRÍA

En Mecánica de los Fluidos Aplicada

Evaluación de túneles de viento

Presentada por: **Ing. Valeria Durañona**

Dirigida por: **Dr. Ing. José Cataldo**

Diciembre, 2003

Agradecimientos

Deseo agradecer sinceramente a mi Director Académico y Director de Tesis, Dr. Ing. José Cataldo, por su guía, apoyo y seguimiento de las actividades realizadas en el marco de mis estudios de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada, así como durante el posterior análisis de los resultados obtenidos. Las discusiones mantenidas durante dicho análisis y su enfoque crítico a lo largo de la elaboración de esta tesis permitieron enriquecer su contenido y más importante aun, mi formación en el área. Por otra parte, la Facultad de Ingeniería, a través del otorgamiento de una beca de Maestría y CSIC, en la modalidad de apoyo a formación de posgrado, facilitaron la ejecución de las tareas de investigación en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería y la culminación del trabajo de tesis.

Así mismo, agradezco al Prof. Arne Johansson, Director del Departamento de Mecánica del Royal Institute of Technology (KTH) de Estocolmo, Suecia, por haber apoyado la realización de dos estadias en dicha institución, de gran valor para mi formación académica, y al Instituto Sueco y CSIC, cuyos aportes económicos hicieron posible la realización de esa experiencia. Por otra parte, deseo agradecer particularmente a Björn Lindgren, con quien planifiqué las medidas realizadas en el túnel de viento MTL de KTH y discutí gran parte de los resultados obtenidos. Johan Westin y Jens Österlund, también aportaron sus conocimientos durante algunas etapas delicadas de esa investigación.

Extiendo también mi agradecimiento a los compañeros del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería que colaboraron durante el desarrollo de las distintas etapas de este trabajo. Entre ellos, quiero agradecer especialmente a Álvaro Acosta, Gabriel Usera y Teresita Imia.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a César, hoy mi esposo, por fomentar que siga desarrollándome académicamente, aunque eso implique que nos distanciamos físicamente durante cierto tiempo.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas a dos túneles de viento de características muy diferentes: el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, y el túnel de viento MTL del Departamento de Mecánica del Royal Institute of Technology, de Estocolmo, Suecia.

Con ese marco se describen entonces las principales características de diseño y usos de túneles de viento existentes, así como la técnica de la simulación física, y se caracteriza la Capa Límite Atmosférica.

Los resultados obtenidos en ambas evaluaciones se analizan en función del uso de cada instalación.

Índice

1. Introducción	1
2. Requerimientos básicos para la simulación física	3
3. Características de diseño y usos de túneles de viento	7
4. Descripción de la Capa Límite Atmosférica	13
4.1 Caracterización del flujo medio	
4.2 Caracterización de las componentes fluctuantes de la velocidad	
5. Simulación física de la Capa Límite Atmosférica	25
5.1 Metodología	
5.2 Estimación de la escala de simulación y criterios de evaluación de la CLA simulada	
6. Túnel de viento MTL, KTH, Estocolmo, Suecia	32
6.1 Descripción del túnel de viento	
6.2 Evaluación de las características del flujo en la zona de trabajo	
6.2.1 Medidas de presión total	
6.2.2 Medidas de la dirección del flujo	
6.2.3 Medidas de temperatura	
6.2.4 Medidas de velocidad	
6.3 Conclusiones λ	
7. Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, Montevideo	76
7.1 Descripción del túnel de viento	
7.2 Evaluación de las características del flujo en la zona de trabajo	
7.2.1 Zona de trabajo vacía	
7.2.2 Simulación física de tres flujos tipo CLA	
7.2.2.1 Terreno urbano	
- Análisis de la distribución de velocidades medias. Cálculo de z_0 , d , u^* y n	
- Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. Cálculo de L_u^x	
- Estimación de la escala de simulación	
- Discusión	
7.2.2.2 Mar	
- Análisis de la distribución de velocidades medias. Cálculo de z_0 , d , u^* y n	
- Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad.	

Cálculo de L_u^x

- Estimación de la escala de simulación
- Discusión

7.2.2.3 Terreno suburbano-mar

- Análisis de la distribución de velocidades medias. Cálculo de z_0 , d , u^* y n
- Capa interior – mar
- Capa exterior – terreno suburbano
- Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. Cálculo de L_u^x
- Estimación de la escala de simulación
- Discusión

7.3 Conclusiones

8. Anexo	120
Nomenclatura	124
Referencias bibliográficas	127

1. Introducción

La evaluación de muchos problemas relacionados a la disciplina de la Mecánica de los Fluidos Aplicada se realiza con modelos, que pueden ser tanto físicos como matemáticos (Plate, 1999).

En el área de la Ingeniería del Viento generalmente se utiliza alguna de estas técnicas de simulación para describir el campo de presiones, esfuerzos o deformaciones que experimenta un objeto debido a la acción del viento, o el campo de velocidades o de concentración de contaminantes en un sitio de interés bajo las condiciones atmosféricas deseadas. Ejemplos de preguntas prácticas que se pueden responder mediante la simulación son:

- ✧ ¿Cómo proteger de la manera más adecuada cultivos frente a la acción del viento?
- ✧ ¿Cómo se afecta el campo de velocidades de viento en el entorno de un nuevo edificio alto?. ¿Los peatones se verán afectados por vientos fuertes o gradientes de velocidad altos?. ¿Cómo se debería proteger entonces una plaza cercana?
- ✧ ¿Las personas en el interior de un nuevo edificio alto percibirán su movimiento debido al viento?
- ✧ ¿Cómo es el campo de presiones medias y fluctuantes que se desarrollan sobre el techo de un edificio bajo?
- ✧ ¿Cómo edificios existentes influyen en los esfuerzos debidos al viento que experimentan nuevas edificaciones?. ¿Cómo las nuevas edificaciones afectan los esfuerzos sobre los edificios existentes?
- ✧ ¿Cuál será la inmisión de NO_x causada por el tráfico si se construye una nueva autopista, o si el tráfico u otras fuentes lineales de contaminación se ven modificadas?
- ✧ ¿Cómo afecta a la calidad del aire fuentes puntuales de contaminación, como industrias, en un entorno urbano?

En los modelos físicos se reproduce en general la situación a estudiar a una escala geométrica más pequeña. En estos, el flujo de aire se simula a través de un flujo de aire o de agua, mientras que las condiciones de borde del flujo se simulan mediante modelos físicos de la realidad a una escala geométrica dada. Al utilizar la simulación física se debe lograr, utilizando una técnica adecuada, que el modelo del flujo represente las características principales del flujo real a la misma escala geométrica que las condiciones de borde. Las instalaciones que se utilizan en estos casos consisten principalmente en túneles de viento o de agua, en los que se modelan las características deseadas del flujo y se construyen réplicas a la misma escala de los obstáculos deseados.

Si el objetivo es el estudio de problemas básicos de la Mecánica de los Fluidos como

aquéllos relacionados a la aerodinámica, la transición de régimen laminar a turbulento, etc., generalmente se requiere contar con una instalación capaz de desarrollar flujos altamente uniformes y con muy bajo nivel de turbulencia en la sección del túnel donde se instalarán los modelos físicos. Si en cambio se requiere estudiar flujos atmosféricos, generalmente se utilizan túneles de viento tipo capa límite. La simulación más desarrollada en estos casos corresponde a flujos atmosféricos en condición de atmósfera neutra, condición que se describe en el siguiente capítulo. La Capa Límite Atmosférica (CLA) se desarrolla en la componente del túnel de viento conocida como zona de trabajo, donde en su extremo corriente abajo se instala el modelo físico del objeto de estudio. Existen diferentes metodologías para desarrollar la CLA, pero básicamente consisten en interponer obstáculos de geometrías y dimensiones determinadas al flujo (Cataldo, 1992), como se describirá brevemente en la sección 5.1.

Los modelos matemáticos pueden ser analíticos o numéricos y se basan en abstracciones matemáticas del proceso, debido a que las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen la teoría básica de la Mecánica de los Fluidos son no lineales, muy complejas, y en pocos casos cuentan con soluciones cerradas. Los modelos analíticos son aquellos basados en soluciones particulares de las ecuaciones básicas que describen los diferentes procesos. Se cuenta con un reducido número de modelos analíticos, como por ejemplo el modelo de penacho Gaussiano para el caso de una difusión lineal bajo condiciones de borde muy simples. Los modelos numéricos generalmente utilizan una grilla de puntos para describir el flujo dentro de fronteras definidas en las que se imponen condiciones de borde apropiadas. Las ecuaciones básicas en derivadas parciales se sustituyen en este caso por ecuaciones en diferencias finitas, que se resuelven en los nodos de la grilla mediante computadoras digitales (Plate, 1999).

Si se encuentran bien calibrados, muchos modelos numéricos pueden modelar correctamente las características generales de campo de flujos. Sin embargo, los modelos numéricos aun no son capaces de detallar el campo de turbulencia con suficiente precisión o estudiar problemas que involucren escalas geométricas en un muy amplio intervalo con la capacidad computacional actual, tal como se indica en Plate, 1999.

En estos casos, la simulación física es la única alternativa posible, si se excluyen los estudios de campo, generalmente más costosos. Puede decirse que los túneles de viento actúan como computadoras analógicas, integrando las ecuaciones en derivadas parciales que gobiernan la Mecánica de los Fluidos (Gorecki, 1998). En un túnel de viento las condiciones de borde pueden modelarse con detalle suficiente y el flujo es un flujo real, por lo que las ecuaciones de Navier-Stokes se cumplen exactamente.

La simulación física se realiza a escalas geométricas reducidas, por razones obvias de economía y conveniencia. Esta técnica implica entonces manejar los conceptos de la teoría de similitud, involucrando un conjunto de números adimensionados y/o criterios de similitud que se aplican tanto al flujo como a los modelos de los obstáculos inmersos en él. Utilizando las

leyes de similitud y la teoría que rige el flujo alrededor de cuerpos no aerodinámicos, el túnel de viento se convierte en la mejor herramienta disponible para modelar, por ejemplo, la naturaleza compleja del viento y su interacción con diferentes obstáculos.

Pero una vez establecidas las características del flujo que se desea modelar y seleccionados los factores de escala, se concluye que en condiciones normales de ensayo no es posible respetar todos los criterios de similitud, salvo que la escala de longitudes sea 1:1. Inevitablemente, los investigadores que utilizan túneles de viento deben buscar entonces soluciones de compromiso, que respeten las condiciones de similitud más relevantes de cada problema particular. Esto hace que su trabajo sea complejo y en lugar de ser una técnica exacta, la simulación física se convierte en el arte del conocimiento de los fenómenos de la Mecánica de los Fluidos involucrados y en la interpretación de los resultados obtenidos, tal como se indica en Simiu & Scanlan, 1986.

Esta Tesis de Maestría trata sobre la evaluación de túneles de viento en relación a su aplicación a diferentes problemas en el campo de la Mecánica de los Fluidos. En ella se describe los diferentes tipos y aplicaciones de túneles de viento, se discute los requerimientos para realizar una correcta simulación física de las situaciones que se desean estudiar y en particular, de la CLA, y se realiza la evaluación de dos instalaciones de características muy diferentes: un túnel de viento de muy bajo nivel de turbulencia, perteneciente al Royal Institute of Technology (KTH), de Estocolmo, Suecia, y el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, tipo CLA.

2. Requerimientos básicos para la simulación física

Cuando se desea aplicar la técnica de la simulación física, los requerimientos necesarios para lograr similitud geométrica, dinámica y térmica entre modelo y prototipo se pueden encontrar realizando un análisis inspeccional.

Los parámetros que gobiernan el comportamiento físico de un sistema se pueden obtener entonces, adimensionando las ecuaciones que describen al mismo. Al dividir las variables básicas que intervienen en las ecuaciones por un valor de referencia con la dimensión correspondiente, se obtienen grupos adimensionados que aparecen como factores en las ecuaciones que gobiernan el sistema. La similitud entre un prototipo y su modelo se obtiene entonces cuando estos grupos toman los mismos valores en ambos escenarios.

Por ejemplo, un flujo atmosférico tipo CLA se puede describir mediante las ecuaciones de la conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía térmica, además de la ecuación de estado del fluido (Plate, 1982, Cermak, 1981, Cermak, 1987).

Aplicando el procedimiento descrito a la ecuación de conservación de la masa se puede concluir que la similitud cinemática se asegura cuando se trabaja con similitud geométrica, o sea si se escalan todas las longitudes intervinientes mediante un mismo factor. Aquí se precisa que las escalas de longitudes tanto del modelo físico de los obstáculos como del modelo físico del flujo atmosférico se escalen de la misma manera. Se deberá entonces modelar a la misma escala geométrica de los obstáculos, la distribución de velocidades medias, de intensidad de turbulencia, de las escalas de la turbulencia y del espectro de las fluctuaciones turbulentas en altura del flujo.

Análogamente, de la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento se concluye que se tendrá similitud dinámica si cada uno de los siguientes parámetros se mantiene igual en ambos sistemas:

- el número de Reynolds: $Re = \frac{U_o \cdot L_o}{\nu_o}$
- el número de Rossby: $Ro = \frac{U_o}{L_o \cdot \Omega_o}$
- el número de Richardson: $Ri = \frac{\Delta T_o}{T_o} \cdot \frac{L_o \cdot g_o}{U_o^2}$
- el número de Strouhal: $St = \frac{U_o \cdot t_o}{L_o}$

Finalmente, de la ecuación de la conservación de la energía térmica (o primer principio) se deduce que se tendrá similitud térmica si los siguientes grupos adimensionados toman los mismos valores tanto en el modelo como en el prototipo:

- el número de Prantdl: $Pr = \frac{\nu_o \cdot \rho_o \cdot cp_o}{k_o}$
- el número de Eckert: $Ec = \frac{U_o^2}{cp_o \cdot T_o}$
- el número de Reynolds
- el número de Strouhal

Las variables que intervienen en la definición de los parámetros mencionados se indican en el apartado correspondiente a la nomenclatura utilizada. El subíndice “o” indica un valor de referencia.

Para asegurar que a escala de modelo se está trabajando en condiciones similares a las condiciones que se desean evaluar a escala de prototipo, se debe agregar al requerimiento de

similitud geométrica e igualdad de los números adimensionados anteriores, que las condiciones iniciales y las condiciones de borde sean similares en ambos casos. Por ejemplo, en caso de modelar flujos tipo CLA se debería asegurar además que haya similitud entre la rugosidad de los terrenos, las distribuciones de temperatura a nivel del suelo, las estructuras del flujo por encima de la CLA y los gradientes horizontales de presión y que la CLA simulada se encuentre en equilibrio.

A partir de un primer análisis de las condiciones anteriores, se llega a la conclusión de que no es posible respetar todos los requerimientos y obtener una similitud exacta entre modelo y prototipo, - salvo que el factor de escala sea 1 (Capítulo 13 de Plate, 1982) -, por lo que la simulación física del flujo termina logrando una similitud “aproximada”, como se adelantó en el capítulo anterior. Sin embargo, en muchos casos no es necesario considerar todas las características del flujo, siendo suficiente modelar aquellas más importantes. Un modelo real simulará entonces las leyes y características principales o fundamentales intervinientes y no considerará otras menos relevantes.

Por ejemplo, no es necesario que la similitud geométrica de los obstáculos y del flujo sea exacta, sino que se deberá asegurar la similitud de las características relevantes de los mismos para el proceso estudiado.

Con relación a la similitud dinámica, no es en general posible mantener la similitud respecto al número de Reynolds, pero muchas veces tampoco es necesario contar con los mismos valores en modelo y en prototipo si el escurrimiento es turbulento completamente desarrollado en ambos. Cuando la superficie sobre la que se desarrolla un flujo es aerodinámicamente rugosa, por ejemplo, las características locales del flujo alcanzarán condiciones de independencia respecto del número de Reynolds a partir de un valor de ese parámetro lo suficientemente alto. Por otra parte, el número de Rossby describe el efecto de Coriolis que se manifiesta en la rotación del vector velocidad del flujo atmosférico en altura. El valor del número de Rossby en un modelo generalmente será varios órdenes de magnitud mayor que el Rossby en el prototipo correspondiente, por lo que el vector de la velocidad media no cambiará de dirección en altura como la CLA prototipo (Cermak, 1987, Capítulo 13 de Plate, 1982). Se puede decir que esta diferencia entre modelo y prototipo no influye, por ejemplo, en el efecto del viento sobre un edificio de gran altura (por ejemplo, 200m), pero puede influir en procesos de dispersión de contaminantes a una distancia mayor a los 5km. Esto último condiciona la distancia hasta la cual se puede modelar correctamente difusiones en túneles de viento.

En cuanto al número de Richardson, se debe respetar la similitud respecto a este número cuando se desea modelar flujos atmosféricos térmicamente estratificados, o cuando el flujo atmosférico se ve perturbado por efectos convectivos. En estos casos se puede trabajar con túneles de agua con estratificación en densidad (por ejemplo, con soluciones salinas), o con túneles de viento cuyos pisos y/o techos sean enfriados o calentados. En relación con este

punto se puede decir que en el área de la Ingeniería del Viento, los estudios en general pueden dividirse en dos categorías. Por una parte, usualmente se precisa evaluar el efecto del viento sobre personas, cultivos, edificios u otras estructuras bajo condiciones de viento fuertes, en las que las condiciones de estratificación térmica son destruidas debido a la fuerte mezcla producida por la turbulencia de origen mecánico. Una segunda categoría corresponde a los casos en los que se desea estudiar problemas de contaminación atmosférica local y el transporte de partículas en áreas urbanas bajo condiciones de vientos suaves, en los que la estratificación térmica de la atmósfera afecta de manera apreciable los procesos de mezcla turbulenta. En los procesos mencionados en la primer categoría no interviene el número de Richardson, mientras que en la segunda categoría es imprescindible una correcta simulación de este número.

Finalmente, el número de Strouhal aplicado a la CLA describe condiciones del flujo atmosférico no estacionarias a gran escala, pero éstas toman lugar tan gradualmente (en periodos de horas) que el efecto de este número generalmente puede ser despreciado. Sin embargo, si se estudia el proceso de emisión de vórtices alrededor de una estructura, este parámetro sería relevante.

Cabe mencionar que dependiendo del fenómeno que se desee estudiar y de las escalas de longitudes intervinientes, la interacción entre un flujo y determinados obstáculos puede estar gobernada por otras leyes físicas y por consiguiente, por otros números adimensionados que deberán respetarse en esos casos particulares.

Como conclusión, dependiendo del tipo de análisis que se desee hacer del flujo, en general es posible relajar las condiciones requeridas para obtener una similitud exacta y trabajar en modelo con algunos números adimensionados de valor diferente a los correspondientes a prototipo, cuidando de que el fenómeno que se desea estudiar se encuentre bien representado en el túnel de viento mediante la conservación de los parámetros relevantes.

3. Características de diseño y usos de túneles de viento

Esencialmente, un túnel de viento es una instalación cuyo cometido es producir un flujo de aire en movimiento relativo respecto al objeto de estudio.

Los túneles de viento se pueden clasificar tanto por su aplicación principal, como por sus características principales de diseño, velocidad, etc. Generalmente sus características de diseño y el rango de velocidades en el que pueden trabajar se encuentran vinculados a su aplicación principal y a otros aspectos como factores económicos, de espacio, etc.

El uso de túneles de viento para determinar el efecto del viento sobre distintos tipos de obstáculos se remonta a hace más de un siglo. Su aparición tuvo lugar debido a las limitaciones que presentaban otros métodos utilizados para realizar ensayos aerodinámicos hasta ese momento, como los ensayos en caída libre, en brazos rotatorios o en viento natural. El desarrollo de estas instalaciones se vio fuertemente ligado en sus comienzos a la industria aeronáutica. Textos clásicos como Rae & Pope, 1984 y Bradshaw & Pankhurst, 1964 describen algunos tipos de túneles de viento existentes, criterios de diseño y aplicaciones, con mayor énfasis en usos aeronáuticos, mientras que en Cermak, 1975, en Gorecki, 1998 y en Holmes, 2001 se reseña la evolución de los túneles de viento relacionados principalmente a la Ingeniería del Viento.

El primer túnel de viento, movido por una máquina a vapor, fue construido aparentemente por Francis Herbert Wenham en Inglaterra en 1871, para la Sociedad Aeronáutica de Gran Bretaña, tal como cita Gorecki, 1998. Por otra parte, se cree que el primer uso de un túnel de viento para medir el esfuerzo sobre edificios debido a la acción del viento se debe a Kernot, de Melbourne, Australia y data del año 1893, tal como indica Holmes, 2001. Kernot utilizó el túnel de viento para estudiar el esfuerzo sobre cubos, pirámides, cilindros y techos de diferentes inclinaciones. Casi al mismo tiempo, en Copenhague, Dinamarca, Irminger en 1894 utilizó el flujo a la salida de una chimenea para estudiar las presiones debidas a la acción del viento sobre cuerpos de formas simples.

Más adelante, el uso de los túneles de viento de tipo aeronáutico fue estimulado por el desarrollo de la aviación, al comienzo del siglo 20, tal como se menciona en Rae & Pope, 1984 y en Bradshaw & Pankhurst, 1964. De esa manera se construyeron muchos túneles de viento pequeños, de potencias cercanas a los 5 hp, en Europa y Estados Unidos para llevar a cabo investigaciones básicas en esa área. Estos túneles de viento fueron rápidamente desarrollados, aumentando en cantidad, tamaño, velocidad y potencia y alcanzando un alto grado de perfeccionamiento alrededor de 1940. Este desarrollo alcanzó tanto a los túneles de viento de circuito abierto como a los de circuito cerrado, las dos grandes clasificaciones de túneles de viento. Para los años '90 algunos túneles de viento habían alcanzado dimensiones importantes y potencias que excedían los 100.000 hp, cubriendo todo el rango de velocidades, desde velocidades subsónicas bajas hasta velocidades supersónicas.

Fuera del área aeronáutica, el túnel de viento comenzó a utilizarse algo más asiduamente como herramienta para resolver problemas relacionados a la Ingeniería del Viento alrededor de 1930 (Gorecki, 1998, Cermak, 1975). Así se intentó estudiar la acción del viento sobre edificios, torres, puentes y otros tipos de estructuras, pero fue recién a partir del trabajo de Jensen, 1958 que se comenzó a reconocer la necesidad de modelar tanto la distribución de velocidades del viento atmosférico en altura como su distribución de turbulencia para obtener resultados correctos. Se diseñaron y construyeron entonces túneles de viento con zonas de trabajo de mayor longitud, que permitían reproducir capas límites turbulentas, modelos a escala del viento atmosférico. Estos túneles de viento se conocen como túneles de viento tipo Capa Límite Atmosférica (CLA).

Existen también túneles de viento para el estudio de problemas relacionados a la Mecánica de los Fluidos básica, donde se precisa contar con un flujo de aire de alta uniformidad y extremadamente bajo nivel de turbulencia. En este tipo de túneles de viento se estudian problemas relacionados a la turbulencia, como la transición de flujo laminar a flujo turbulento, la separación de la capa límite en flujos laminares, capas límites turbulentas; intercambio de calor, difusión, problemas meteorológicos, etc. La componente principal de estos túneles es el sistema de control de la uniformidad del flujo y de la turbulencia. Estos túneles pueden llegar a contar además con zonas de trabajo de mayor longitud que las de los túneles de viento de tipo aeronáutico.

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, los túneles de viento se pueden clasificar, además de por su uso, por las características principales de su circuito de aire. De esta manera se pueden encontrar túneles de viento de circuito abierto o de circuito cerrado (Holmes, 2001), así como túneles de viento de succión o de impulsión.

Los túneles de viento de circuito abierto son los más simples. Sus componentes principales se muestran en la Figura 3.1.

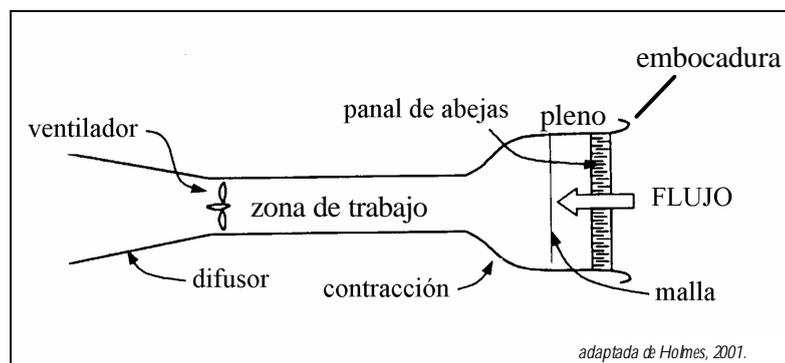


Figura 3.1. Esquema de un túnel de viento de circuito abierto

En un túnel de tipo abierto, el ingreso del flujo al interior del mismo se realiza a través de una embocadura, lo que debe ocurrir con la menor pérdida de carga posible, sin generarse asimetrías ni desprendimientos de capa límite y con una intensidad de turbulencia moderada.

El flujo pasa entonces al pleno, donde generalmente se dispone de un panel de abejas y un conjunto de mallas de pasos cada vez menores para lograr un flujo espacial y temporalmente uniforme corriente abajo de estos elementos. La contracción conduce al flujo hacia la entrada de la zona de trabajo y es necesaria para que en el pleno, donde se produce una pérdida de energía elevada debido a la presencia del panel de abejas y de las mallas, la velocidad del flujo sea menor que en la zona de trabajo y de esta manera lograr para una velocidad de trabajo, un control de turbulencia a menor costo operacional. En la zona de trabajo de un túnel de viento se instalan y operan los modelos físicos que se desea estudiar. La utilización de un difusor en un túnel de viento abierto permite recuperar parte de la energía cinética del flujo, transformándola en presión.

Los túneles de viento de circuito abierto pueden ser de impulsión o de succión, según donde se ubique el ventilador respecto a la zona de trabajo. El túnel de viento de la Figura 3.1 corresponde al segundo tipo ya que el ventilador se encuentra ubicado corriente abajo de la zona de trabajo. En la zona de trabajo de un túnel de viento de succión se obtiene un flujo de aire de mejor calidad, pero se tiene una presión apreciablemente menor que la presión atmosférica, lo cual puede inducir un flujo de aire desde el exterior, si hay comunicación entre ambas áreas.

La otra posibilidad es instalar el ventilador corriente arriba de la zona de trabajo, obteniéndose un túnel de viento de impulsión. En esta configuración es común utilizar un ventilador de tipo centrífugo. Además se hace necesario contar con enderezadores de flujo y mallas para disminuir el giro del flujo corriente abajo del ventilador. Como ventajas se tiene una zona de trabajo con una presión más cercana a la ambiente y una mayor independencia respecto a las características del flujo en el exterior del túnel. En la Figura 3.2 se muestra un túnel de viento de circuito abierto de impulsión, que posee un ventilador centrífugo.

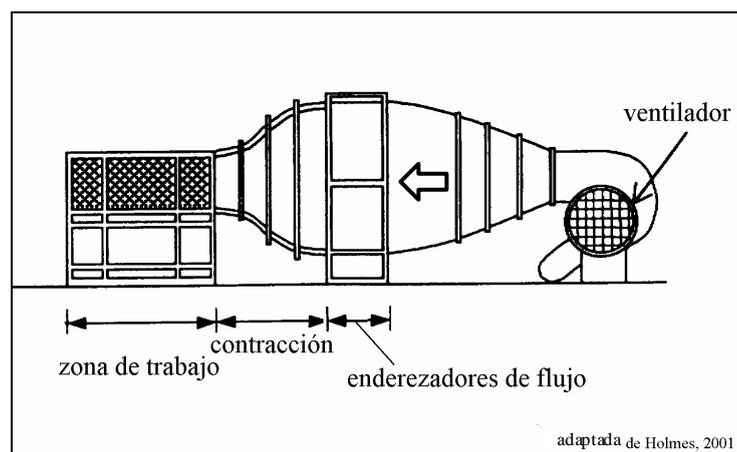


Figura 3.2. Túnel de viento de circuito abierto, de impulsión

En los túneles de viento de circuito cerrado se elimina la embocadura y se agrega un circuito de retorno de aire, para lo que se precisa disponer de cuatro esquinas de 90° cada una, o de dos de 180°. En la Figura 3.3 se muestra un túnel de viento con esas características.

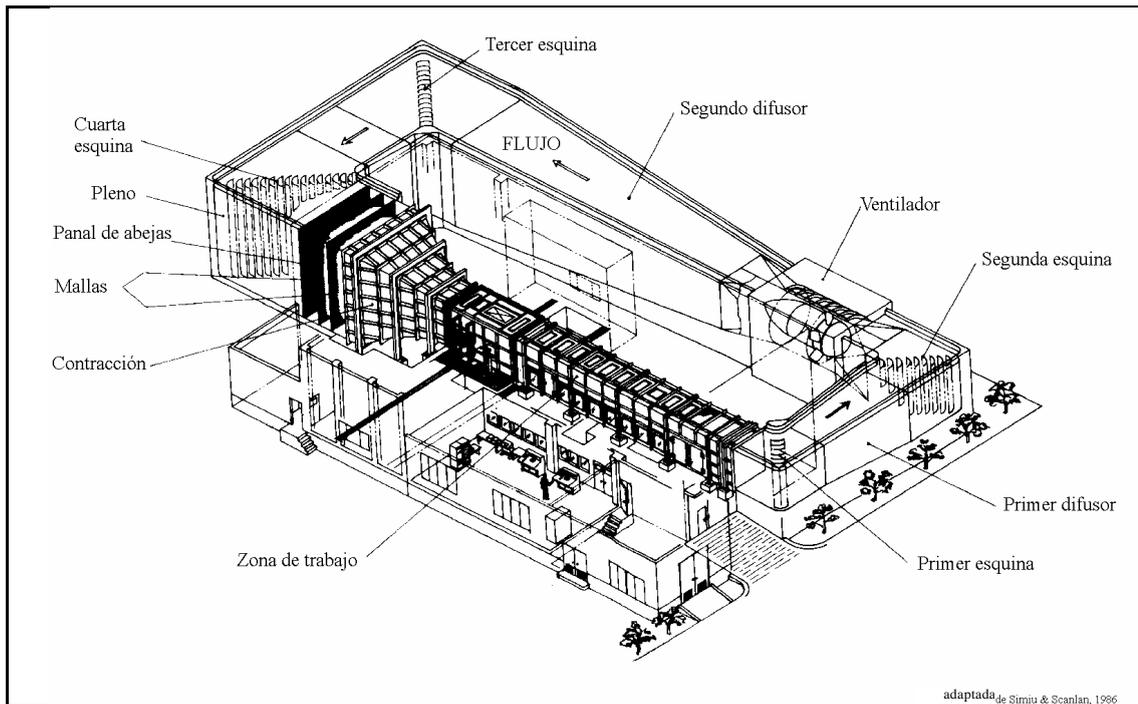


Figura 3.3. Túnel de viento de circuito cerrado.

Al igual que en los túneles de viento abiertos, la utilización de un panel de abejas y de mallas también es necesaria, y estos elementos generalmente se instalan en el pleno. Estos túneles cuentan además con una contracción, zona de trabajo y circuito de retorno del aire (con esquinas en las que se instalan álabes especialmente diseñados para guiar al flujo de manera de obtener una buena uniformidad), el ventilador y uno o más difusores. Los túneles de viento de circuito cerrado pueden diseñarse para consumir menor potencia que los túneles de viento de circuito abierto para la misma velocidad y dimensiones de la zona de trabajo y las características del flujo de aire en su interior son independientes de las perturbaciones externas, incluso a bajas velocidades. En este tipo de túneles generalmente se hace necesario contar con enfriadores para retirar el calor aportado al flujo de aire por el motor del ventilador y el originado en los diferentes procesos que implican pérdidas, para que la temperatura de trabajo no se encuentre continuamente en aumento. Por otra parte, estos túneles se pueden emplear para generar capas límites térmicamente estratificadas utilizando sistemas de enfriamiento y calentamiento, necesarias, por ejemplo, para realizar algunos estudios de transporte de contaminantes. Como ventajas adicionales se tiene por ejemplo un menor nivel de ruido, la posibilidad de trabajar con la zona de trabajo a presión atmosférica o contar con otra zona de trabajo de características diferentes en su rama de retorno. Sin embargo, estos túneles de viento requieren mayor espacio disponible, mayor inversión inicial, y de no contar con un sistema de control de temperatura se produce un aumento de temperatura del aire en su interior durante su funcionamiento mayor que en el caso de un túnel de circuito abierto.

Como se indicó anteriormente, generalmente los túneles de viento son diseñados teniendo presente su uso específico, lo cual determina las características geométricas y de funcionamiento que deberán poseer. Es decir que se seleccionan las dimensiones de la zona de

trabajo, la velocidad máxima alcanzable, la uniformidad que debe presentar el flujo medio y el nivel de turbulencia admisible en función del uso esperado del túnel. Otras características que según la aplicación pueden ser importantes son: control de temperatura, posibilidad de estratificar el fluido, etc. En este último caso se debe utilizar un túnel de viento de circuito cerrado.

La velocidad apropiada para una aplicación determinada se obtiene a partir del número de Reynolds que asegure una simulación a escala del fenómeno que se quiere estudiar y una relación señal-ruido que no induzca grandes errores en las medidas que se precisa realizar. Los túneles de viento tipo CLA, por ejemplo, son en general de baja velocidad. La experiencia lograda en el trabajo con modelos de zonas de topografía compleja muestra que es conveniente trabajar con velocidades mayores a 10m/s. El arrastre de arena se realiza usualmente con velocidades cercanas a la velocidad umbral, la cual resulta menor a 5m/s. La correcta simulación de pequeñas estructuras de la turbulencia lleva a elevar los números de Reynolds característicos, pero manteniendo relativamente bajas velocidades. Tal acción lleva a aumentar el sub-rango inercial del espectro de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad en modelo, permitiendo que se modelen vórtices de menores dimensiones. Los túneles de viento llamados de alta velocidad son aquellos que superan los 180m/s en su zona de trabajo. Si la velocidad máxima alcanzable se encuentra por debajo de la velocidad del sonido, estos túneles de viento se conocen como subsónicos, y si la supera son llamados supersónicos. La aplicación principal de los túneles de viento de alta velocidad es la aeronáutica, donde las fuerzas de inercia y la compresibilidad son los principales factores actuantes (Pankhurst & Holder, 1952).

De la misma manera, las características del panel de abejas y de las mallas de un túnel de viento dependerán del requerimiento del nivel de turbulencia y uniformidad del flujo en la zona de trabajo. Los túneles de viento aeronáuticos o aquellos especializados en Mecánica de los Fluidos básica requieren en general bajos niveles de turbulencia, del orden del 0.1%, mientras que en los túneles de viento tipo CLA esta característica no es tan importante y se permite tener niveles de turbulencia del orden del 1% con la zona de trabajo vacía (previamente a la instalación del sistema de simulación de la CLA).

La función del panel de abejas es amortiguar las componentes laterales medias y fluctuantes del flujo. La disminución de estas componentes dependerá de la pérdida de carga impuesta por este elemento y de la relación entre su longitud y la escala de turbulencia corriente arriba del mismo, como se presenta en Lumley & McMahan, 1967. Por otra parte, un conjunto de mallas amortigua tanto la componente longitudinal de la turbulencia como la no-uniformidad del flujo medio en la misma dirección. La escala de la turbulencia incidente es un factor importante que afecta el comportamiento de las mallas, tal como se sugiere en Tan-Atichat, et al., 1982 y se debe considerar al seleccionar la distancia entre ellas y al estimar el decaimiento de la turbulencia corriente abajo de las mismas.

Adicionalmente, la turbulencia y el nivel de uniformidad se ven modificados al evolucionar por una contracción, tal como lo muestran resultados experimentales presentados en Uberoi, 1955, Hussain & Ramjee, 1976 y Ramjee & Hussain, 1976.

Como es de esperar, las dimensiones de la sección recta de la zona de trabajo, la longitud de la misma y el intervalo de velocidades de trabajo se encuentran íntimamente ligadas al uso principal del túnel de viento. Cuando se desea estudiar un problema mediante la técnica de la simulación física, se debe seleccionar la escala adecuada para modelar las características del flujo relevantes al problema. Por ejemplo, la determinación del efecto de la topografía sobre el viento con el fin de evaluar el potencial eólico de una región requiere una correcta simulación del campo de velocidades medias y de las escalas mayores de la turbulencia en las cuales se encuentra la mayor parte de la energía. Esta simulación se puede realizar con escalas tan pequeñas como 1/1000 o 1/6000 (Neal, 1982, Cataldo, 1990). La simulación del efecto de las edificaciones sobre la dispersión de contaminantes, el efecto que producen los obstáculos sobre el viento con el fin de estudiar problemas de protección de recintos destinados a plantación, recreación o tránsito, implican simular adecuadamente escalas de la turbulencia comparables a las dimensiones de los obstáculos. Para simular los picos de presión que se producen sobre edificaciones a baja altura debidos a la acción del viento, sería recomendable simular escalas de turbulencia pequeñas, como se señala en Tieleman, 1992, para lo que se requiere modelos de mayores escalas. En todos los casos se recomienda trabajar con bloqueos menores al 7%. Se debe seleccionar entonces las dimensiones de la sección recta de la zona de trabajo de manera de poder seleccionar los futuros modelos a una escala adecuada y con un bloqueo que no supere el valor sugerido. En la elección de la longitud de la zona de trabajo para un túnel de viento tipo CLA, se debe considerar la distancia necesaria para desarrollar la CLA. A modo de ejemplo, la simulación de flujos tipo CLA requiere longitudes del orden de 11 veces la profundidad de la misma en caso de utilizar métodos artificiales para generarlas. Gran parte de los túneles de viento tipo CLA poseen zonas de trabajo con longitudes entre 15 y 30m, anchos entre 2 y 4m y alturas entre los 2 y 3m. Zonas de trabajo de secciones mayores permiten modelar el objeto de estudio a una escala geométrica mayor. Las relaciones típicas entre la longitud y la altura de la zona de trabajo se encuentran entre 5 y 15, con las que se puede lograr una buena simulación de la CLA (AAMA, 1985). En comparación, los túneles de viento aeronáuticos poseen una zona de trabajo corta. Una característica común a todos los tipos de túneles de viento es que la zona de trabajo generalmente posee un techo de altura ajustable para poder controlar el gradiente de presiones y lograr un gradiente de presiones nulo a lo largo de la misma.

La mayoría de los túneles de viento utiliza ventiladores de tipo axial. Criterios de diseño de estos ventiladores pueden encontrarse en Csanady, 1964, Sédille, 1973 y Stepanoff, 1948. Finalmente, el criterio de diseño de un difusor es realizar la recuperación de la energía cinética con la menor pérdida de energía posible, de manera de hacer más eficiente la instalación. En ESDU, 1980, Ward-Smith, 1980 y Miller, 1978 se presentan criterios de diseño de difusores.

4. Descripción de la Capa Límite Atmosférica

La Capa Límite Atmosférica (CLA) es la región de la atmósfera más próxima a la superficie de la Tierra, y se extiende hasta una altura δ del orden del kilómetro, a partir de la cual el efecto de la fuerza de fricción que ejerce la Tierra sobre el aire en movimiento relativo deja de ser de relevancia. La energía necesaria para producir el flujo en la CLA se obtiene a través de la interacción entre la superficie de la Tierra en movimiento y el aire y de los gradientes de presión y de temperatura originados por calentamientos diferenciales producidos por la radiación solar.

Tal como se presenta en Holton, 1992 o en Pedlosky, 1986 por encima de la CLA se encuentra la región llamada atmósfera libre, donde el viento alcanza aproximadamente su valor geostrófico o gradiente, desarrollándose paralelo a las isobaras. En la atmósfera libre, el flujo atmosférico es gobernado por el gradiente horizontal de presiones, los gradientes de temperatura, la fuerza centrífuga y la fuerza de Coriolis debido al movimiento de rotación de la Tierra. En la CLA, además de esas fuerzas, interviene la fuerza debida a la fricción entre el flujo relativo a la Tierra y la superficie de la misma, la cual gobierna la distribución de la velocidad del viento en altura y su cambio de dirección. La velocidad media disminuye desde un valor cercano al geostrófico o gradiente en el extremo superior de la CLA hasta hacerse nula cerca de la superficie terrestre. Además, ésta cambia su dirección, en sentido antihorario en el hemisferio sur, desde una dirección paralela a las isobaras en el extremo superior de la CLA hasta formar un ángulo máximo sobre la superficie terrestre entre los 6° y los 30° con esa dirección, dependiendo de la rugosidad del terreno. Se ha hallado experimentalmente que la dirección del viento de superficie puede presentar un ángulo cercano a los 30° respecto al viento geostrófico o gradiente sobre terrenos relativamente rugosos, mientras que este ángulo puede llegar a ser de unos 10° sobre superficies menos rugosas, como el mar. La teoría desarrollada por Ekman permite predecir las características generales del comportamiento de la velocidad del viento en altura descritas. Los conceptos indicados anteriormente se pueden encontrar descritos con más detalle en Holton, 1992 o en Pedlosky, 1986.

El flujo en la CLA es la mayor parte del tiempo un flujo tipo capa límite, como su nombre lo indica, y su comportamiento posee características similares a las de las capas límites que se desarrollan sobre superficies sólidas. El flujo en la CLA, salvo bajo condiciones de estados de la atmósfera fuertemente estables, es un flujo altamente turbulento, que se desarrolla sobre una superficie aerodinámicamente rugosa. En Schlichting, 1979 se presenta la teoría clásica de capas límites y el estudio matemático de las ecuaciones que gobiernan su movimiento, y en Hinze, 1975 se discute con mayor detalle algunas características de las capas límites turbulentas. En Hama, 1954 se describen medidas realizadas en capas límites que se desarrollan sobre superficies lisas y rugosas en túneles de viento, mientras que en Raupach et al., 1991, y Maruyama & Ishizaki, 1988, por ejemplo, se estudian características comunes que presentan los flujos turbulentos tipo capa límite que se desarrollan sobre superficies rugosas y los flujos en la CLA. Por otra parte, en el capítulo 6 de Plate, 1982 se

discuten las variaciones que presenta la CLA debido a distintos estados de la atmósfera.

4.1 Caracterización del flujo medio

Como sucede habitualmente en las capas límites de flujos turbulentos (ver por ejemplo, Hama, 1954), en la CLA se pueden identificar tres regiones con características diferenciadas. En la cercanía a la superficie sobre la que se desarrolla la capa límite se encuentra la primer sub-capa, conocida con el nombre de sub-capa rugosa. En la sub-capa rugosa el flujo medio es afectado directamente por la presencia de los obstáculos que se encuentran sobre la superficie, que ejercen una tensión rasante τ_o sobre la misma. En esta sub-capa, las características del flujo dependen fuertemente de la geometría de los obstáculos, variando sensiblemente con la posición relativa a los elementos de rugosidad. El flujo en esta sub-capa es tridimensional y muy heterogéneo, y se desarrolla hasta una altura que se denominará z_r , de entre 1 a 5 veces la altura media de los elementos de rugosidad, tal como se presenta en Raupach, 1991.

Por encima de esta sub-capa se encuentra la sub-capa inercial o logarítmica, a veces llamada también capa superficial, que se desarrolla hasta una altura z_L cercana al 15% de la altura total de la CLA. Las características de esta sub-capa dependen básicamente de la tensión rasante media que se ejerce en su base, de igual valor a la tensión rasante media τ_o que ejerce la superficie en la sub-capa rugosa, pero no de otras propiedades de la superficie, como se indica en Jackson, 1981. Esta sub-capa se caracteriza por presentar una distribución de velocidad media en altura que se ajusta aproximadamente a una ley logarítmica y un flujo vertical turbulento de cantidad de movimiento aproximadamente constante en altura, como se ha podido comprobar experimentalmente, debido a las características de las componentes turbulentas de pequeña escala.

La existencia de esta sub-capa se puede deducir a partir de estudios dimensionales y experimentales, como los presentados en Schlichting, 1979 y Hinze, 1975. La sub-capa logarítmica corresponde a una región donde son válidas simultáneamente la ley de la pared, correspondiente a la llamada capa interior o región de la pared en flujos tipo capa límite y la ley del déficit de cantidad de movimiento, correspondiente a la capa exterior, o región de la estela. En ella la velocidad varía de acuerdo a la ley que se presenta a continuación bajo condiciones neutras:

$$U = \frac{u_*}{k} \cdot L \left(\frac{z - d}{z_o} \right) \quad z_r < z < z_L \quad (4.1.1)$$

En esta expresión, U es la velocidad media a la altura z , $u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}$ es la velocidad de fricción, k es una constante universal, denominada constante de von Karman ($k \cong 0.4-0.41$), d es la altura del plano de desplazamiento nulo y z_o la longitud de rugosidad. Schlichting, 1979,

indica que u_* es una velocidad característica de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad y una medida de la transferencia de cantidad de movimiento debido a esas fluctuaciones. En Jackson, 1981 se presenta una interpretación de los parámetros que intervienen en la formulación anterior, mientras que en Wieringa, 1993 se discute los factores de los que dependen los valores de z_0 y d . La altura del plano de desplazamiento nulo depende de la distribución de las fuerzas de fricción en la superficie y corresponde a la altura de desplazamiento promedio de la tensión rasante total, indicando la altura a la que la fuerza de fricción promedio parece actuar en el flujo, bien por encima de los elementos de rugosidad. La longitud de rugosidad z_0 depende de la magnitud de las fuerzas de fricción que actúan sobre la superficie. Estos parámetros por lo tanto dependen del tipo de exposición, que puede variar con la dirección del viento.

En el capítulo 6 de Plate, 1982 se presenta la formulación del perfil de velocidades en esta sub-capa bajo condiciones de estados estables e inestables de la atmósfera, a través de la teoría de la longitud de mezcla. Cabe mencionar en este momento, que la condición de estado de la atmósfera depende de su perfil de temperatura. En una atmósfera estable, una partícula que se desplaza en posición vertical tiende a recuperar su posición inicial, mientras que en una atmósfera inestable la misma partícula tiende a apartarse de su posición original. Por el contrario, en una condición de estado de atmósfera neutra, la partícula permanecerá en equilibrio en cualquier posición. En condición de vientos moderados a fuertes (más de 6 m/s) se ha podido comprobar que la atmósfera presenta en general un estado neutro, tal como se indica en Davenport, 1960, por lo que en la mayor parte de los estudios relacionados a la Ingeniería del Viento interesa estudiar capas límites atmosféricas en condiciones neutras. De esta situación quedan excluidas algunas tormentas particulares con alto intercambio térmico o con distribuciones de velocidad diferentes a una capa límite, como se presenta en Holmes, 2001, para las que actualmente se están utilizando túneles de viento de características especiales.

La tercer sub-capa se conoce con el nombre de sub-capa potencial o sub-capa de la estela, ($z_L < z < \delta$) y ocupa la mayor parte de la CLA. El flujo en esta sub-capa presenta características similares a las de los flujos sin turbulencia bajo rasantes (“free-turbulent shear-flows”), como los flujos en estelas. En ella la distribución de velocidad se desvía de la ley logarítmica y la intensidad de turbulencia y las tensiones de Reynolds decrecen en altura. Experimentalmente se ha visto que la distribución de velocidad media en esta sub-capa se puede ajustar a una ley potencial del siguiente tipo:

$$\frac{U}{U_H} = \text{cte.} \left(\frac{z-d}{H} \right)^n \quad z_L < z < d \quad (4.1.2)$$

En esta expresión U_H es la velocidad media a la altura H y n , llamado índice potencial, es un exponente que depende de la rugosidad del terreno que se encuentra corriente arriba, como se indica en Counihan, 1975.

En Counihan, 1975 y Wieringa, 1993, por ejemplo, se presentan resultados de medidas realizadas en capas límites atmosféricas que permiten inferir valores de z_0 , d y n para distintos tipos de exposición, bajo condiciones de atmósfera neutra.

En la Figura 4.1.1 se indican esquemáticamente las sub-capas mencionadas:

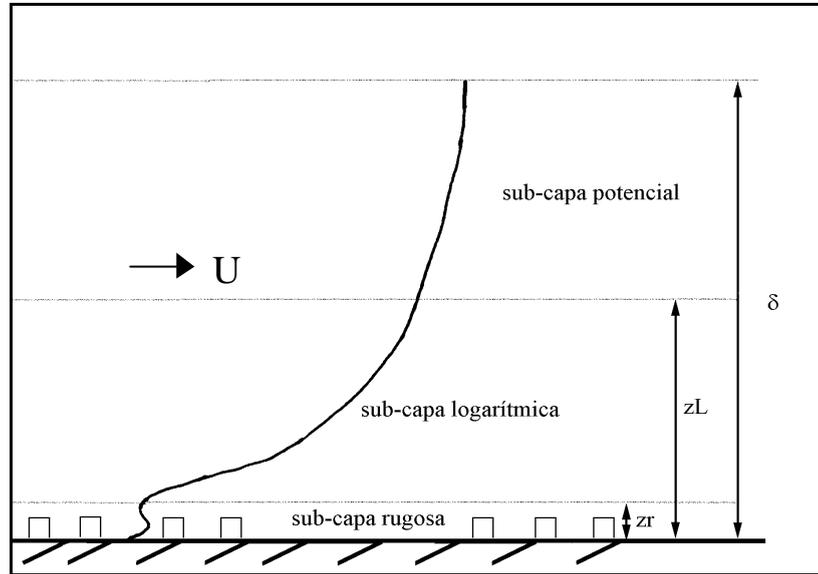


Figura 4.1.1 Regiones de la CLA

La altura δ de la CLA depende de la velocidad del viento, de las condiciones de estado de la atmósfera, de la rugosidad del terreno, así como de la latitud y puede variar típicamente desde los cien metros en noches con condiciones de estado fuertemente estables hasta varios kilómetros en días con condiciones altamente convectivas en latitudes bajas. En Counihan, 1975 y Simiu & Scanlan, 1986, por ejemplo, se presentan resultados de diferentes medidas realizadas de la altura de la CLA y de la sub-capa logarítmica para distintos tipos de exposición en condiciones de estado neutro, mientras que en Arya, 1981 se presentan parametrizaciones de la altura de la CLA según el tipo de condición de estado.

Simiu & Scanlan, 1986 presenta la siguiente estimación de la altura de la sub-capa logarítmica, deducida a partir de medidas micrometeorológicas:

$$z_L = c \cdot \frac{u_*}{f} \quad (4.1.3)$$

donde c es una constante de valor 0.015-0.03 y f el parámetro de Coriolis, que se calcula de la siguiente manera:

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen } \phi \quad (4.1.4)$$

En esta expresión Ω es la velocidad de rotación de la Tierra ($\Omega \cong 7.27 \times 10^{-5}$ rad/s) y ϕ , la latitud, que para Montevideo vale $\phi = 35^\circ$, por lo que $f \cong 8.34 \times 10^{-5}$.

Por otra parte, en Arya, 1981 se indica la siguiente sugerencia para estimar la altura de la CLA (según Benkley & Schulman, 1979) en condiciones de estado neutras:

$$d = a \cdot \frac{u_*}{f} \quad (4.1.5)$$

donde a es una constante de valor cercano a 0.3.

Como comentario final, cabe mencionar que muchas veces durante el desarrollo de una CLA ocurre algún cambio en el tipo de rugosidad que presenta la superficie. En estos casos se desarrolla una capa límite interior (CLI), cuya altura δ_I aumenta con la distancia al punto de cambio de rugosidad. En la capa exterior, la cual se ubica por encima de la CLI, las características del flujo se encuentran asociadas al tipo de terreno ubicado corriente arriba del cambio de rugosidad y la distribución de velocidad sigue la ley correspondiente. Dentro de la CLI se puede distinguir una región cercana al suelo donde el perfil de velocidad se adapta a una ley logarítmica que depende de las nuevas condiciones de rugosidad y de las características del flujo en la capa exterior. Entre ambas regiones, se desarrolla una capa de transición, de cierta extensión, en la que la distribución de velocidad cambia gradualmente de una a otra. A partir de una distancia lo suficientemente alejada del punto de cambio de rugosidad el crecimiento de la CLI finaliza y termina por establecerse el régimen correspondiente al tipo de terreno más cercano. En la Figura 4.1.2 se indican las regiones características de una CLI. En Cataldo, 1998 se sugiere que el valor de z_{02} , hallado ajustando una ley logarítmica a la distribución de velocidad cerca del suelo, dependería de la estructura que presente la región superior del flujo y no únicamente de las características de la nueva superficie.

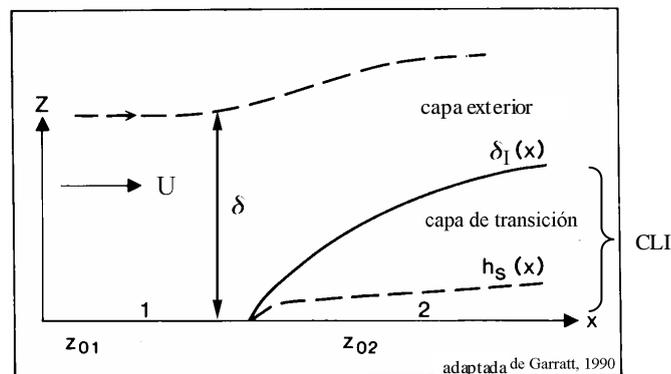


Figura 4.1.2 Regiones de una CLI

Aunque la mayoría de los autores está de acuerdo con las características presentes en el desarrollo de una CLI citadas anteriormente, no se ha llegado a un consenso general de cómo cambia la altura de la CLI con la distancia al punto de cambio de rugosidad. Se han realizado

medidas en la CLA y en capas límites desarrolladas en túneles de viento, con cambios de rugosidad de distintas características, a partir de las cuales se verificaron modelos analíticos y numéricos propuestos. Pero las variables intervinientes, como la distancia al punto de cambio de rugosidad, la magnitud de la relación entre las longitudes de rugosidad corriente arriba y abajo del cambio, y las dificultades inherentes presentes en las medidas realizadas en la CLA muchas veces dificultan la comparación de resultados. A continuación se mencionan y discuten algunos trabajos realizados para describir el comportamiento de una CLI.

Una de las primeras fórmulas desarrolladas para estimar la altura de la CLI cuando ocurre un cambio de longitud de rugosidad de z_{o1} a z_{o2} , en función de la distancia al punto de cambio de rugosidad x , fue propuesta por Elliott, 1958:

$$\frac{d_I}{z_{o2}} = \left[0.75 - 0.03 \cdot L \left(\frac{z_{o2}}{z_{o1}} \right) \right] \cdot \left(\frac{x}{z_{o2}} \right)^{0.8} \quad (4.1.6)$$

Otro de los trabajos frecuentemente citados en relación con el desarrollo de la CLI es el correspondiente a Antonia & Luxton, 1971. En él se presentan medidas realizadas en un túnel de viento para caracterizar el desarrollo de la CLI correspondiente a un cambio de rugosidad de z_{o1} a z_{o2} con $z_{o2}/z_{o1} = 100$ y el cambio en velocidad media, intensidad de turbulencia y escala integral longitudinal de la turbulencia en altura. En ese trabajo se puede identificar fácilmente el cambio de características de tanto la distribución de velocidades, como de la distribución de intensidad de turbulencia a la altura correspondiente a la altura de la CLI. La zona más cercana al suelo presenta características correspondientes a la rugosidad corriente abajo del cambio de rugosidad, mientras que las características de la región por encima de δ_i corresponden al flujo corriente arriba. En la distribución de velocidad en escala semi-logarítmica se observa un cambio de pendiente a una altura cercana a δ_i , presentando el gráfico una doble curvatura. En la distribución de intensidad de turbulencia longitudinal se observa una zona de cambio de pendiente en la misma región, más acentuada a la normalmente esperada. También se encontró que la escala integral longitudinal de la turbulencia en la capa interior era menor que la correspondiente a la superficie de menor rugosidad, tal como se esperaba.

El desarrollo de la altura de la CLI encontrada en el estudio de Antonia & Luxton, 1971 corresponde a alturas significativamente menores que las predichas por Elliott, 1958, presentando un exponente similar al correspondiente a la teoría clásica de desarrollo de una capa límite (0.8). En un trabajo posterior (Antonia & Luxton, 1972) se estudió el caso $z_{o1} > z_{o2}$. Las características descritas anteriormente se repiten para este tipo de cambio de rugosidad, pero se encontró un desarrollo de la altura de la CLI más lento (con menor $d\delta_I/dx$).

Más recientemente, Hunt & Simpson (Cap. 7 de Plate, 1982) y Panofsky & Dutton, 1984 desarrollaron dos fórmula iterativas de cálculo que, respectivamente, se presentan a

continuación:

$$d_1 = \frac{0.37 x}{L \left(0.24 \frac{d_1}{z_{o2}} \right)} \quad (4.1.7)$$

$$\frac{x}{z_{o2}} = \left[\frac{d_1}{z_{o2}} \cdot \left(L \left(\frac{d_1}{z_{o2}} \right) - 1 \right) + 1 \right] \cdot \left(\frac{u_{*2}}{\sqrt{w_2'^2} \cdot \kappa} \right) \quad (4.1.8)$$

La fórmula (4.1.7) de Hunt & Simpson se derivó particularmente para un cambio moderado de longitud de rugosidad. Estos autores indican que hay evidencia de que cuando los valores de z_{o1} y z_{o2} son muy diferentes, el desarrollo de la CLI se parece al de una capa límite desarrollándose sobre una superficie en ausencia de capas límites corriente arriba, como se sugeriría en Antonia & Luxton, 1971, y la fórmula presentada no sería aplicable. En este último caso, la altura de la CLI desarrollada sería del orden de la mitad de la altura predicha por el modelo presentado por Hunt & Simpson, tanto para el caso $z_{o1} > z_{o2}$ como $z_{o1} < z_{o2}$, aunque en el primer caso estos autores citan de Jackson, 1976 valores de $\delta_1(x)$ del mismo orden o ligeramente mayores que en el segundo, para una misma distancia x corriente abajo del cambio de rugosidad. La estimación de la altura de una CLI que se desarrolla cuando z_{o1} y z_{o2} son muy diferentes se puede realizar, por ejemplo, con los resultados presentados en White, 1974 para calcular la altura de una capa límite que se desarrolla sobre una placa plana rugosa en condiciones de flujo turbulento.

En la fórmula (4.1.8) de Panofsky & Dutton, u_{*2} y w_2' son, respectivamente, la velocidad de fricción y la componente fluctuante de la velocidad en la dirección vertical, corriente abajo del cambio de rugosidad. En Simiu & Scanlan, 1986 y en Biétry et al., 1978, se propone la siguiente relación entre u_{*1}/u_{*2} y z_{o1}/z_{o2} :

$$\frac{u_{*1}}{u_{*2}} = \left(\frac{z_{o1}}{z_{o2}} \right)^{0.0706} \quad (4.1.9)$$

Medidas realizadas en la CLA indican que $\sqrt{w_2'^2}$ aparentemente no variaría en altura en la sub-capa logarítmica. Aunque la relación $\sqrt{w_2'^2} / u_{*2}$ puede depender de z_{o2} , se puede tomar $\sqrt{w_2'^2} \cong 1.25 u_{*2}$, tal como indica Theurer et al., 1992 y se presenta en Counihan, 1975 y en Lumley & Panofsky, 1964.

Por otra parte, Walmsley, 1989, comparó las predicciones dadas por las fórmulas propuestas por Elliott, 1958, Jackson, 1976 y Panofsky & Dutton, 1984 con datos atmosféricos, mientras que Theurer et al., 1992 realizó medidas en capas límites desarrolladas en un túnel de viento y comparó las CLI obtenidas bajo cambios de rugosidad de diferentes

características con los modelos analíticos propuestos por los investigadores citados anteriormente y por Plate, 1971 y Plate & Friedrich, 1991. Tanto Walmsley, 1989 como Theurer et al., 1992 encontraron que el modelo propuesto por Panofsky & Dutton, 1984 se ajusta mejor a la altura de las CLI estudiadas. Theurer et al., 1992 también obtuvo pocas diferencias con la fórmula propuesta por Plate & Friedrich, 1991.

Garratt, 1990 presenta una amplia revisión de medidas realizadas en túneles de viento y en campo para estudiar el desarrollo de las capas límites internas debidas a cambios de rugosidad bajo diferentes condiciones de estado de la atmósfera y compara sus principales características con los modelos analíticos propuestos por diferentes investigadores. Este autor indica que las comparaciones realizadas por Walmsley, 1989 para evaluar los distintos modelos analíticos y numéricos de desarrollo de CLI citados anteriormente se han basado en el número limitado de observaciones de cambios de rugosidad disponibles en la CLA, realizadas a distancias cortas desde el punto de cambio de rugosidad, del orden de decenas de metros – menos de 200m.

Por otra parte, este autor advierte que la estimación de la altura de la CLI depende en parte de la definición propuesta por los diferentes autores, por lo que algunas fórmulas pueden diferir levemente. El fin de la CLI se distingue generalmente por una discontinuidad en las pendientes de la distribución de velocidades en escala semi-logarítmica, y ésta usualmente presenta una doble curvatura.

Otros métodos para estimar la altura de la CLI se pueden encontrar en Simiu & Scanlan, 1986 y ESDU, 1985, por ejemplo.

Tanto en el desarrollo de las fórmulas de Elliott, 1958 como de Panofsky & Dutton, 1984 se supuso una atmósfera neutra y velocidades de viento moderadas a altas. Cabe mencionar también que estos modelos no diferencian si el cambio de rugosidad se da de un terreno con mayor longitud de rugosidad a uno menor o viceversa. Aunque consideraciones teóricas llevan a concluir que ambos casos presentarían comportamientos diferentes, cálculos que tienen efectivamente esto en cuenta no hallan diferencias apreciables en la altura de la CLI desarrollada (Townsend, 1976 según Capítulo 7 de Plate, 1982), como tampoco lo hacen medidas realizadas en la CLA (Jackson, 1976 según Garratt, 1990).

4.2 Caracterización de las componentes fluctuantes de la velocidad

Al caracterizar la estructura de la CLA interesa describir, además de las características del flujo medio, la distribución de las componentes turbulentas de la velocidad. En los párrafos siguientes se caracterizará la distribución de la intensidad de turbulencia, la distribución de la escala integral longitudinal de la turbulencia y la distribución del espectro de las fluctuaciones longitudinales de la velocidad que tienen lugar en capas límites

atmosféricas que se desarrollan sobre diferentes superficies rugosas.

La intensidad de turbulencia es el parámetro más simple que describe la turbulencia atmosférica. La intensidad de turbulencia longitudinal se define como:

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{u'^2(z)}}{U(z)} \quad (4.2.1)$$

donde $u'(z)$ es la componente fluctuante de la velocidad en la dirección de la velocidad media $U(z)$ a la altura z . La distribución en altura de la intensidad de turbulencia depende de la rugosidad que presenta la superficie así como de las condiciones de estado de la atmósfera.

Como se observa en Raupach et al., 1991, la componente fluctuante longitudinal de la velocidad aumenta de manera pronunciada con la altura en la sub-capa rugosa. En la sub-capa logarítmica, por otra parte, existiría una región donde las tensiones rasantes permanecen esencialmente constantes. El límite superior de esta región se ubicaría a una altura cercana a $\delta/10$. Luego de esta región, el valor de u' disminuye en altura.

En la capa de rasante constante y en condiciones de estado termodinámicamente neutro se puede afirmar entonces que:

$$\overline{u'^2} = \beta u_*^2 \quad (4.2.2)$$

donde β es un parámetro que depende únicamente de la rugosidad del terreno, tal como se indica en Simiu & Scanlan, 1986.

Combinando las dos expresiones anteriores con la distribución logarítmica de velocidades se obtiene:

$$I_u = \frac{k \cdot \sqrt{\beta}}{L \left(\frac{z-d}{z_o} \right)} \quad (4.2.3)$$

válida en la capa de rasante constante.

En Counihan, 1975, Simiu & Scanlan, 1986, ESDU, 1985, Harris, 1969 y en el capítulo 13 de Plate, 1982 se presentan resultados de medidas de la intensidad de turbulencia longitudinal realizadas en la CLA para distintos tipos de rugosidad.

El modelo conceptual convencional de la turbulencia en capas límites consiste en considerar que el flujo medio transporta un gran número de vórtices, que varían en tamaño y orientación. Se puede considerar que las fluctuaciones turbulentas de la velocidad son causadas por una superposición de vórtices, de tamaños y frecuencias de giro diferentes. Según la teoría de Kolmogorov, en los flujos de capas límites turbulentas, los vórtices de mayor tamaño extraen energía cinética del flujo medio y la traspasan a vórtices menores mediante un proceso denominado “cascada”, hasta que esta energía es disipada en forma de

calor por los vórtices de menor escala mediante efectos viscosos. Se puede suponer que la energía cinética total de la componente turbulenta de la velocidad en una región del flujo corresponde a la suma de las contribuciones de energía que realiza cada tamaño de vórtices que presenta el flujo. El espectro de potencia de las fluctuaciones turbulentas caracteriza la forma en que se distribuye la energía cinética de la turbulencia en escalas, (o frecuencias, aplicando la hipótesis de Taylor $t = x/U$), según los distintos tamaños de vórtices. Como se indica en el Cap. 5 de Plate, 1982 o en Tennekes and Lumley, 1972, la hipótesis de Taylor consiste en suponer que la correlación entre eventos simultáneos que ocurren en dos puntos separados una distancia x en la dirección del flujo medio es la misma que la correlación existente entre dos eventos que ocurren en el mismo punto pero separados un tiempo t , si $t=x/U$.

Existe un espectro de potencia asociado a cada componente turbulenta por lo que se puede definir los espectros de turbulencia longitudinal, lateral y vertical. En Tennekes & Lumley, 1972 y en el Capítulo 5 de Plate, 1982 se presenta la teoría y características del espectro de las fluctuaciones turbulentas. En Lumley & Panofsky, 1964 y Raupach et al., 1991 se presenta, además, características y medidas del espectro de la turbulencia en la CLA. Se ha podido establecer teórica y experimentalmente (ver por ej., Lumley & Panofsky, 1967) que estos espectros presentan características que varían en altura.

Si se realizan consideraciones dimensionales, es posible identificar en el espectro de potencial longitudinal tres rangos de frecuencias asociados a distintos procesos. El rango de bajas frecuencias, o mayores escalas, corresponde a la producción de turbulencia, mientras que el rango de las mayores frecuencias, o de las menores escalas corresponde a la disipación de la turbulencia. Entre ambos rangos existe el llamado sub-rango inercial, asociado a la transmisión de energía entre escalas cercanas e independiente de los efectos viscosos.

Como se presenta en el Capítulo 5 de Plate, 1982 (escrito por Jensen y Busch) se puede establecer mediante la teoría de Kolmogorov, y utilizando argumentos dimensionales, que en el sub-rango inercial el espectro longitudinal de potencia presenta la siguiente forma:

$$S(z, f) = \alpha \cdot \left(\frac{\epsilon \cdot U(z)}{2 \cdot \pi} \right)^{2/3} \cdot f^{-5/3} \quad (4.2.4)$$

donde $S(z,f)$ es la componente espectral de la componente turbulenta longitudinal de la velocidad asociada a la frecuencia f y a una altura z sobre el suelo, ϵ es la disipación de la turbulencia, f es la frecuencia y α es una constante universal, conocida como constante de Kolmogorov y de valor cercano a 0.55, que se puede determinar experimentalmente. Esto implica que si se grafica el espectro en función de la frecuencia en escala logarítmica éste presentará una pendiente igual a $-5/3$ en el sub-rango inercial, lo que ha podido ser comprobado experimentalmente en la CLA, como citan, por ejemplo, Lumley & Panofsky, 1964.

En este sub-rango se puede deducir a partir de la expresión anterior que:

$$\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2} \propto Y^{-2/3} \quad (4.2.5)$$

donde

$$\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2} \quad \text{es el espectro de potencia adimensionado y}$$

$$Y = \frac{f \cdot z}{U(z)} \quad \text{es una frecuencia adimensionada, llamada coordenada de Monin.}$$

Por otra parte, en el rango de producción se puede mostrar que (Raupach et al., 1991):

$$S(z, f) \approx \text{cte} \quad (4.2.6)$$

de donde:

$$\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2} \propto Y \quad (4.2.7)$$

Por lo indicado anteriormente, cuando se grafica el espectro de potencia adimensionado $\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2}$ en función de Y, éste presenta un máximo, asociado a los vórtices relacionados con el mayor contenido de energía. Si además la gráfica se realiza en escala logarítmica, este espectro presenta una zona lineal de pendiente 1 a bajas frecuencias, mientras que en el sub-rango inercial se obtiene una pendiente igual a $-2/3$.

Existen formulaciones empíricas que intentan caracterizar el espectro de turbulencia atmosférica respetando las consideraciones anteriores. Cabe mencionar que la forma del espectro depende de las condiciones de estabilidad atmosférica.

Una de las formulaciones propuestas para condiciones de atmósfera neutra es la fórmula empírica de von Karman para el espectro adimensionado de potencia (ecuación 4.2.8) que se puede utilizar para describir el espectro en el intervalo de frecuencias fuera de la región de disipación:

$$\frac{S(z, f) \cdot f}{u'^2} = \frac{4 \cdot \frac{f \cdot L_u^x(z)}{U(z)}}{\left[1 + 70.8 \cdot \left(\frac{f \cdot L_u^x(z)}{U(z)} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (4.2.8)$$

En esta última expresión L_u^x es la escala integral longitudinal de la turbulencia, medida en m, y U es la velocidad media en el punto donde se evalúa la escala integral, en m/s.

Otras formulaciones empíricas del espectro, tal como cita Counihan, 1975, se deben a Harris, 1968, Fuchtl & McVehil, 1969, Davenport, 1961, o Pasquill, 1970. Dentro de éstas, la formulación de Harris no tiene en cuenta la variación del espectro con la altura, la correspondiente a Davenport sobrestima la energía en la región del espectro correspondiente a bajas frecuencias (producción), mientras que la de Pasquill es válida básicamente en el sub-rango inercial. En Lumley & Panofsky, 1964, en el Capítulo 5 de Plate, 1982 y en Simiu & Scanlan, 1986 se pueden encontrar formulaciones debidas a otros autores.

La distribución de las escalas integrales de la turbulencia es otro de los parámetros que se utiliza para caracterizar los flujos turbulentos. La escala integral de la turbulencia atmosférica es una medida del tamaño promedio de los vórtices turbulentos que presenta la CLA en los cuales se registra el mayor contenido de energía. La escala integral depende de la altura sobre la superficie, de la longitud de rugosidad de la misma, así como de las condiciones de estado de la atmósfera. La escala integral longitudinal de la turbulencia corresponde al tamaño promedio de los vórtices en la dirección longitudinal.

Counihan, 1975 analizó medidas de escalas integrales de la turbulencia atmosférica realizadas por diversos investigadores. De estas medidas se puede deducir que la escala integral longitudinal aumenta con la altura y disminuye con la rugosidad del terreno hasta una altura en la que esta escala pasa a ser independiente de la rugosidad del terreno. Para una CLA de 600m, esta altura correspondería a aproximadamente 250m. Por encima de esta altura la escala integral disminuiría, tal como lo indican las pocas medidas realizadas en la CLA y medidas realizadas en capas límites turbulentas desarrolladas en laboratorios. Esta disminución puede deberse al factor de intermitencia.

A partir de la bibliografía analizada, en la referencia citada se presenta la siguiente relación para la escala integral longitudinal con la altura en condiciones de atmósfera neutra, válida en toda la sub-capa logarítmica y hasta una altura aproximada de 250m:

$$L_u^x(z) = C.(z)^{1/n} \quad (4.2.9)$$

En ella, C y $1/n$ son valores que dependen únicamente de la longitud de rugosidad z_0 y que Counihan, 1975 presenta gráficamente.

5. Simulación física de la Capa Límite Atmosférica

5.1 Métodos de simulación

Los métodos utilizados para generar flujos tipo CLA en túneles de viento pueden clasificarse en dos grupos: métodos naturales y métodos artificiales, tal como se presenta en Cataldo, 1992. Los métodos naturales consisten en permitir que la capa límite se desarrolle sobre una superficie de longitud suficiente con una adecuada rugosidad. Los métodos artificiales consisten en perturbar el flujo en una posición mediante un conjunto de obstáculos ubicados corriente arriba de un piso aerodinámicamente rugoso para obtener a cierta distancia corriente abajo un flujo con las características deseadas. La elección del tipo de método de simulación de la CLA se realiza de acuerdo a las dimensiones de la instalación con que se cuenta. Cuando la distancia requerida para desarrollar una CLA mediante los métodos naturales supera la longitud de la zona de trabajo del túnel de viento se deben utilizar métodos artificiales para su simulación física.

Existen diversos métodos artificiales para simular la CLA, que se diferencian en las características de los obstáculos que se interponen al flujo. En Cataldo, 1992 se presenta una reseña de los mismos. En todos los casos, es necesario lograr una adecuada distribución de la velocidad media, de la intensidad y escalas integrales de turbulencia en altura, representativas de las condiciones reales, en el lugar de la zona de trabajo donde se instalará el modelo físico objeto de estudio. Las características de las distribuciones a simular dependen básicamente del tipo de terreno que se encuentre alrededor del sitio real, de la escala de simulación seleccionada y de las condiciones de estado de la atmósfera que se desee representar.

Dentro de los métodos artificiales de simulación de la CLA existentes, un método recomendado para utilizar cuando no se precisa modelar la totalidad de la CLA es el propuesto en Cook, 1973, ya que permite trabajar con modelos de mayores dimensiones. Este método se recomienda para la simulación del tercio inferior de la CLA, que incluye la sub-capa logarítmica y parte de la sub-capa potencial, y consiste en la perturbación del flujo mediante una reja, una barrera y un piso rugoso. La reja introduce cambios en el flujo incidente de tal manera que sus características se vuelven apropiadas para modelar la región de la estela de una capa límite, mientras que el piso rugoso introduce el déficit de cantidad de movimiento requerido cerca del suelo para modelar la sub-capa inercial y su diseño se encuentra vinculado al tipo de terreno que se desea modelar. Con la barrera, que puede ser sólida o perforada en su extremo superior, se obtiene una zona de mezcla de ambas regiones, de manera de lograr un flujo similar a una capa límite. Este método fue estudiado posteriormente y presentado en Hunt, 1982, variando la altura de la barrera y de los elementos de rugosidad así como la longitud del piso rugoso.

Para diseñar el piso rugoso se pueden aplicar diferentes técnicas. En Gartshore, 1973, por

ejemplo, se presenta un método de diseño de pisos hidráulicamente rugosos aplicable a distintos tipos de exposición. Este método utiliza un modelo integral de la turbulencia y consiste en interponer obstáculos al flujo de manera equiespaciada, que pueden consistir en barreras transversales al flujo o en cubos dispuestos sobre el piso de la zona de trabajo del túnel. Esta referencia indica cómo estimar las dimensiones de esos obstáculos.

Una vez seleccionado el método de simulación de la CLA y estimadas las dimensiones de los obstáculos a interponer al flujo se debe verificar en primera instancia que las distribuciones de velocidad media e intensidad de turbulencia en el sitio donde se instalará el modelo en el túnel de viento correspondan al flujo tipo CLA que se desea simular, a la escala de simulación seleccionada. Cuando no se alcanzan estas condiciones se debe ajustar las dimensiones de los obstáculos teniendo presente las distribuciones obtenidas. Dependiendo de la aplicación, puede ser necesario verificar adicionalmente una vez que las distribuciones de velocidad media e intensidad de turbulencia cumplen con las características deseadas, que la distribución de las escalas integrales de la turbulencia y del espectro de potencia adimensionado en altura también sean adecuadas. La relevancia de estas distribuciones dependerá de las características del estudio a realizar posteriormente.

5.2 Estimación de la escala de simulación y criterios de evaluación de la CLA simulada

Al simular una CLA en un túnel de viento generalmente se hace difícil lograr que las distribuciones de velocidad media, intensidad de turbulencia, escalas integrales, etc., correspondan todas a una misma escala de simulación.

Afortunadamente, algunas características de la CLA modelada pueden ser más relevantes que otras, dependiendo de los procesos bajo estudio involucrados, y se puede priorizar éstas para la estimación de la escala de simulación.

Como se indica en Iyengar & Farell, 2001, a partir del trabajo de Jensen en 1958 y de otros trabajos anteriores se pudo comprobar la sensibilidad de los resultados obtenidos al estudiar la acción del viento sobre estructuras mediante la simulación física en túneles de viento frente a la correcta simulación de la distribución de velocidades medias en altura. Por esta razón, un criterio comúnmente utilizado para determinar la escala de la CLA modelada es calcular la misma como el cociente entre la longitud de rugosidad z_{0M} obtenida de la distribución de velocidades en el modelo y la longitud de rugosidad z_{0P} prototipo correspondiente al terreno que se deseaba simular. En consecuencia, la dimensión característica del modelo se elige de manera que la relación entre ésta y la longitud de rugosidad en modelo corresponda a la misma relación de estos parámetros en prototipo.

Como se indicó en el Capítulo 4.1, la longitud de rugosidad es uno de los parámetros

característicos que gobierna el comportamiento de la sub-capa logarítmica. Por esta razón, el criterio mencionado anteriormente es adecuado cuando se desea simular la parte inferior de la CLA. Cuando, por ejemplo, los elementos a modelar físicamente son de alturas comparables a la altura de la CLA, Plate, 1982, recomienda como criterio adicional que la altura de la CLA simulada y la altura de la CLA prototipo mantengan la misma relación que las longitudes de rugosidad correspondientes. La dificultad que generalmente se encuentra al utilizar este último criterio es la estimación de la altura de la CLA prototipo que se desea modelar, que depende de numerosos factores. Se debe recurrir a recomendaciones como las indicadas en el Capítulo 4.1 a tal efecto.

Más recientemente, se han llevado a cabo estudios para determinar los efectos de la turbulencia y sus escalas sobre las fluctuaciones de presión que experimentan distintos obstáculos. A partir de los resultados obtenidos en esos trabajos se pudo concluir que para modelar adecuadamente las fluctuaciones de presión que experimentan obstáculos reales se hace necesario mantener el cociente entre las escalas integrales de la turbulencia en modelo y en prototipo igual a la escala de simulación. Cabe mencionar que en el trabajo de Cook, 1978 también se proponía la longitud de rugosidad y la escala integral de la turbulencia como los criterios para inferir la escala de simulación.

Según lo presentado anteriormente, la escala de simulación de la CLA se estimaría igual al cociente z_{oM}/z_{oP} , que debería ser igual al cociente $L_u^x(z_M)/L_u^x(z_P)$ calculado para distintas alturas correspondientes, con z_M/z_P igual a la escala de simulación. Otras verificaciones que se deben hacer para evaluar la calidad de la simulación lograda consisten en comparar los valores obtenidos en modelo de n , d , z_L y la distribución de intensidad de turbulencia con valores medidos en la CLA, como los mencionados en el Capítulo 4.1 y 4.2. Al tener unidades de longitud, la altura del plano de desplazamiento nulo y la altura de la sub-capa logarítmica obtenidas en modelo deberían escalarse de la misma manera que la longitud de rugosidad. En Wieringa, 1993 y Counihan, 1975, respectivamente, se presentan valores de d y z_L obtenidos de medidas realizadas en la CLA para diferentes tipos de terrenos a partir de los cuales es posible realizar esta comparación. Adicionalmente, el exponente de la ley potencial, n , debería corresponder al mismo tipo de terreno al que corresponde z_o , como se indica en Counihan, 1975. Si se simula la totalidad de la CLA, puede verificarse que δ_M/δ_P corresponda a la misma escala de simulación hallada. Por otra parte, los valores de intensidad de turbulencia obtenidos en modelo a diferentes alturas deberían ser iguales a los valores de intensidad de turbulencia que presenta la CLA a las alturas correspondientes a la escala de simulación inferida. Se pueden encontrar medidas de las distribuciones de intensidad de turbulencia en altura realizadas en la CLA en Counihan, 1975 y otras referencias indicadas en el Capítulo 4.2.

En los siguientes párrafos se presentan algunos métodos existentes para estimar los parámetros que intervienen en la distribución de velocidades medias y la escala integral

longitudinal de la CLA modelada, para evaluar la simulación lograda e inferir su escala.

Para caracterizar la distribución de velocidad media de la CLA modelada se debe determinar además de la longitud de rugosidad z_0 , la altura de desplazamiento nulo d y la velocidad de fricción u_* . La velocidad de fricción se puede medir directamente mediante una balanza de forma de determinar la tensión rasante sobre la superficie, se puede inferir a través de medidas de las tensiones de Reynolds, deducir a través de la ecuación integral de la cantidad de movimiento o evaluar indirectamente del perfil de velocidades medias, como se presenta en Iyengar & Farell, 2001. En este último tipo de métodos se determinan u_* , z_0 y d por prueba y error, ajustando perfiles logarítmicos y potenciales a los perfiles de velocidades, para varios valores de d y se selecciona el conjunto de los parámetros que ofrecen el mejor ajuste estadístico. De este ajuste también se obtiene el índice n de la sub-capa potencial. Los métodos indirectos han sido utilizados satisfactoriamente para determinar u_* en capas límites que se desarrollan sobre superficies lisas, pero su error asociado es mayor cuando se aplican a capas límites sobre superficies rugosas. Sin embargo, por su sencillez de implementación siguen siendo uno de los métodos utilizados para determinar los parámetros de la distribución de velocidades medias medidas.

Uno de los métodos indirectos de determinación de los parámetros mencionados consiste en graficar la velocidad media para distintos d en escala semi-logarítmica y logarítmica, para identificar los puntos que siguen una distribución de tipo logarítmico y los puntos que siguen una distribución potencial. El perfil de velocidades puede presentar una región común a ambas distribuciones. Una vez identificados los puntos que pertenecen a cada una de las distribuciones, se realiza una regresión lineal en cada una de ellas, como se indica a continuación.

La distribución logarítmica presentada en (4.1.1) se puede modificar introduciendo una velocidad de referencia (U_H) a la altura de referencia (H) para obtener la siguiente expresión:

$$\frac{U}{U_H} = \frac{u_*}{k \cdot U_H} \cdot L\left(\frac{z-d}{H}\right) - \frac{u_*}{k \cdot U_H} \cdot L\left(\frac{z_0}{H}\right) \quad (5.2.1)$$

Se puede realizar entonces una regresión lineal a los puntos correspondientes a esta distribución, de la forma:

$$\frac{U}{U_H} = a \cdot L\left(\frac{z-d}{H}\right) + b \quad (5.2.2)$$

de donde se obtienen los valores de las constantes a y b . A partir de estos se puede calcular u_* y z_0 de la siguiente manera:

$$u_* = a \cdot \kappa \cdot U_H \quad (5.2.3)$$

$$z_o = H \cdot e^{-b \cdot \kappa \cdot \frac{U_H}{u_*}} \quad (5.2.4)$$

Por otra parte, la distribución potencial se puede describir a partir de (4.1.2) de la siguiente manera:

$$L\left(\frac{U}{U_H}\right) = n \cdot L\left(\frac{z-d}{H}\right) + \text{cte} \quad (5.2.5)$$

donde la constante toma un valor cercano a 0.

Utilizando la expresión anterior se puede realizar una regresión lineal a los puntos correspondientes a la distribución potencial, de la que se obtendría n .

Como se presenta en Iyengar & Farell, 2001, existen dos alternativas para identificar la extensión de la sub-capa logarítmica y de la sub-capa potencial. Una primer alternativa sería seleccionar un valor de d e identificar la altura z_L hasta la cual valdría la ley logarítmica y a partir de la cual valdría la ley potencial de manera de minimizar el error medio cuadrático total para ese valor de d . A esa altura se debe verificar, además, que los valores y pendientes de ambas distribuciones sean iguales. Este procedimiento se debería repetir para varios valores de d hasta hallar el valor que ofrezca el menor de los mínimos errores medios cuadráticos. La altura z_L correspondiente a este último d correspondería a la altura de la sub-capa logarítmica. La otra opción consiste en permitir que ambas distribuciones se solapen en una región a la que pertenecería z_L . Los límites de esta región y el valor de z_L se elegirían también, para cada valor de d seleccionado, de manera que el error medio cuadrático total sea mínimo. Finalmente el mejor ajuste correspondería al valor de d que minimice los errores cuadráticos hallados anteriormente.

Por su parte, la distribución de la escala integral longitudinal de la turbulencia en modelo puede obtenerse a partir del cálculo de las funciones de autocorrelación de series temporales de la componente fluctuante longitudinal u' o utilizando la medida del espectro de potencia de esta componente fluctuante, tal como se cita en Farell & Iyengar, 1994.

A partir de la función de autocorrelación de la muestra:

$$c_{u'u'}(k) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N-|k|} u'(i) \cdot u'(i+|k|), & 0 \leq |k| \leq \\ 0, & |k| > N-1 \end{cases} \quad (5.2.6)$$

donde u' es la componente fluctuante longitudinal de la velocidad y N el número de puntos de la serie temporal, se puede calcular la escala integral temporal de la turbulencia (t) como el área por debajo de la curva de esta función normalizada con u' . Aplicando la hipótesis de Taylor, $t = L_u^x/U$, se puede calcular entonces la escala integral longitudinal de la turbulencia como:

$$L_u^x = U \cdot \frac{\text{Área}}{u'} \quad (5.2.7)$$

La dificultad de aplicación que presenta este método consiste en que los estimadores existentes para la función de autocorrelación o no se acercan gradualmente a cero como lo hace esta función o presentan valores negativos que obligan a fijar un punto de manera arbitraria a partir del cual se trunca el cálculo de la misma.

Uno de los métodos existentes para calcular la distribución de la escala integral longitudinal a partir del espectro de potencia consiste en utilizar la relación:

$$L_u^x(z) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U(z)}{f^*(z)} \quad (5.2.8)$$

que surge de derivar la expresión de von Karman para el espectro adimensionado de potencia de la turbulencia longitudinal (4.2.8) respecto a $(f \cdot L_u^x/U)$, e igualar a cero. La frecuencia $f^*(z)$ corresponde a la frecuencia donde el espectro adimensionado calculado a la altura z presenta un máximo. La velocidad media U y el espectro adimensionado se deben medir en el punto donde se desea calcular L_u^x . Por lo tanto, la escala integral longitudinal de la turbulencia se puede estimar utilizando el gráfico del espectro adimensionado en función de la frecuencia para hallar gráficamente el pico espectral. Este método puede introducir cierto error debido a la dificultad de determinar con la suficiente precisión la posición del pico espectral. Esto se debe a que el pico se da normalmente a bajas frecuencias, donde el espectro no posee generalmente buena resolución.

Un segundo método utilizado para estimar la escala integral longitudinal de la turbulencia a partir del espectro consiste en utilizar la relación existente entre el valor del espectro de potencia para frecuencia cero y la escala integral longitudinal, que se halla suponiendo válida la hipótesis de Taylor:

$$L_u^x(z) = \frac{1}{4} \cdot S(0, z) \cdot \frac{U(z)}{u'^2(z)} \quad (5.2.9)$$

Hallando entonces el valor de $S(0,z)$ gráficamente y utilizando la expresión anterior es también posible estimar $L_u^x(z)$. Para disminuir el error asociado a la estimación de L_u^x mediante este método puede ser necesario aumentar la cantidad de puntos del espectro cercanos a $f = 0$ o representar al espectro mediante una parábola en las frecuencias más bajas

para luego hallar el valor del espectro para $f = 0$, tal como se recomienda en Iyengar & Farell, 2001.

Finalmente, se debe recordar que difícilmente todos los parámetros hallados a partir de las medidas realizadas en el túnel de viento correspondan con la misma escala de simulación al tipo de terreno que se desea modelar, como se indicó anteriormente. Aunque generalmente es posible lograr una correspondencia entre las distribuciones de velocidad media y de intensidad de turbulencia simuladas y las del viento atmosférico, se hace más difícil lograr una distribución adecuada de energía turbulenta en todo el intervalo de escalas turbulentas de interés, que puede incluir escalas integrales de la turbulencia así como escalas representativas de los vórtices correspondientes al sub-rango inercial, incluidas las pequeñas escalas de la turbulencia. Cuando esto ocurre no se obtiene una simulación exacta de la CLA, y se debe estimar la escala de simulación que mejor represente la interacción entre el flujo atmosférico y el objeto de estudio en modelo. Para ello se debe estudiar detenidamente los requerimientos de simulación que son esenciales y cuáles pueden ser relajados, lo que dependerá del tipo de estudio que se desea realizar. La escala de simulación deberá estimarse entonces a partir de los parámetros significativos, resultando en una distorsión de algunos de los demás parámetros involucrados y quizás en algo de incertidumbre en la interpretación de los resultados obtenidos, tal como se presenta en Iyengar & Farell, 2001.

6. Túnel de viento MTL, KTH, Estocolmo, Suecia

El Departamento de Mecánica del Royal Institute of Technology (KTH) de Estocolmo, Suecia, cuenta desde 1991 con un túnel de viento denominado MTL (minimum turbulence level), diseñado para realizar investigación básica en Mecánica de los Fluidos en áreas tales como aerodinámica, dinámica de fluidos, turbulencia e incluso aeroacústica. Las características de diseño y construcción de este túnel de viento se seleccionaron de manera de obtener un nivel muy bajo tanto de intensidad de turbulencia como de ruido, características esenciales al realizar estudios de transición de régimen laminar a turbulento y estudios de procesos de separación laminar, por ejemplo.

Una vez finalizada la construcción de este túnel, se condujo una primer evaluación de las características del flujo que se desarrolla en su zona de trabajo (Johansson, 1992). En 1996 se automatizó el sistema de posicionamiento de probetas de la zona de trabajo del túnel de viento, el cual permite obtener medidas con una mayor resolución espacial. Se decidió realizar entonces un nuevo estudio utilizando el nuevo sistema de posicionamiento para verificar los resultados obtenidos anteriormente con una descripción más detallada de la uniformidad y de las características turbulentas del flujo y estudiar si las características del flujo habían sufrido algún tipo de modificación desde la inauguración del túnel.

Durante los meses de junio y julio y de septiembre a noviembre de 1999 la autora realizó dos estadías en el Departamento de Mecánica del KTH en Estocolmo, como parte de las actividades correspondientes a los requisitos para obtener el grado de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada. El objetivo de estas estadías fue estudiar las características del flujo en la zona de trabajo del túnel de viento MTL con el mayor detalle posible.

Para tal fin se estudió el flujo medio mediante medidas de la distribución espacial de la presión total (estática más dinámica), de la dirección del flujo, de la temperatura y de la velocidad y las características turbulentas del flujo mediante medidas de las componentes fluctuantes en las tres direcciones.

6.1 Descripción del túnel de viento

El túnel de viento MTL es un túnel de circuito cerrado, con una longitud total de 25m, una zona de trabajo de 7m de longitud y velocidad regulable entre 1 y 69.5 m/s con la zona de trabajo vacía. Se puede encontrar descripciones de este túnel en trabajos como Johansson, 1992 o en estudios posteriores tales como Österlund, 1999. En la Figura 6.1.1 se indican sus características principales.

El diseño de este túnel de viento fue orientado para obtener en la región central de su zona de trabajo una intensidad de turbulencia longitudinal menor al 0.03% y una componente

lateral menor al 0.09%, dentro del intervalo de velocidades de 5 a 60 m/s, así como muy bajo nivel de ruido. El nivel de turbulencia es controlado mediante un panel de abejas y una serie de mallas. Por otra parte, en las cuatro esquinas del túnel se instalaron álabes diseñados de forma de mantener bajas las pérdidas de carga y asegurar un flujo uniforme, mientras que el intercambiador de calor indicado en la figura también actúa como un panel de abejas colaborando con la buena uniformidad del flujo. Una gran parte del circuito de retorno del túnel cuenta con aislamiento acústico, al igual que las zonas ubicadas corriente arriba y abajo del ventilador.

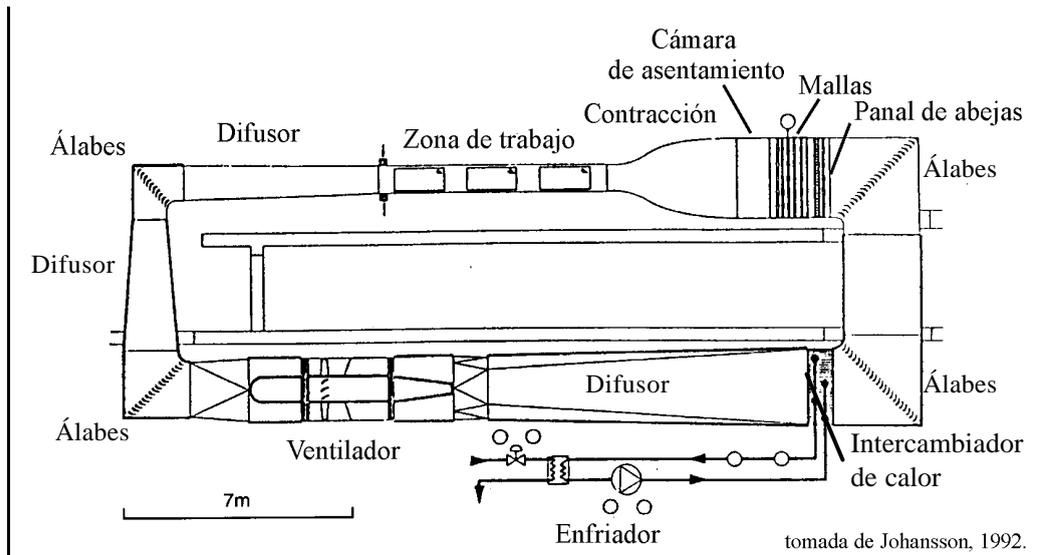


Figura 6.1.1 Diagrama del túnel de viento MTL de KTH

El flujo de aire ingresa a la cámara de asentamiento del túnel luego de pasar a través del panel de abejas y de las mallas instaladas en el pleno y de allí es conducido hacia una contracción 9 a 1, luego de la cual se encuentra la zona de trabajo. La zona de trabajo posee una sección transversal de 1.2m de ancho por 0.8m de alto a su entrada, y es de altura regulable. El ventilador utilizado en esta instalación es axial, movido por un motor de 86kW, y se encuentra ubicado entre la segunda y tercer esquina del circuito de retorno. El intercambiador de calor, ubicado corriente abajo del ventilador, permite mantener la temperatura del flujo constante y uniforme para cualquier velocidad. La temperatura y la velocidad del túnel son controladas externamente.

A continuación se presentan las características principales de las diferentes componentes del túnel.

Pleno

El pleno posee una sección transversal de 3.6m de ancho por 2.4m de alto y se encuentra equipado con un panel de abejas y diferentes lugares en los que se puede colocar mallas, como muestra la Figura 6.1.1. La instalación está diseñada para poder colocar una malla

corriente arriba del panel de abejas y hasta siete mallas en serie corriente abajo del mismo. Luego de éstas se encuentra la cámara de asentamiento, de 1.5m de longitud.

El panel de abejas se compone de una serie de tubos de sección hexagonal construidos en aluminio de 0.1mm de espesor, con 100mm de longitud y un diámetro hidráulico de 9.5mm. Estos tubos se apoyan en marcos de madera.

Las mallas son de acero inoxidable y fueron construidas en un solo tramo. En la Tabla 6.1.1 se indican las características más relevantes de las mallas disponibles en la instalación, todas ellas instaladas corriente abajo del panel de abejas. Las características de reducción de la turbulencia de esta serie de mallas se estudiaron en Groth & Johansson, 1988. Según el estudio realizado, la combinación de mallas seleccionada logra disminuir la intensidad de turbulencia longitudinal en un factor de 10. La cámara de asentamiento asegura una reducción mayor de las componentes turbulentas y de su anisotropía.

Malla	Paso (mm)	Diámetro del hilo (mm)	Solidez (%)
1	3.14	0.50	29.3
2	2.09	0.50	42.2
3	2.09	0.50	42.2
4	0.75	0.16	38.2
5	0.75	0.16	38.2

Tabla 6.1.1 Características de las mallas del túnel de viento MTL

Contracción

La contracción, 9 a 1, guía al flujo desde la cámara de asentamiento a la entrada a la zona de trabajo, con el mismo factor de contracción en sus dos ejes, y posee una longitud de 4m. Los criterios fijados para seleccionar su forma buscaron obtener una buena uniformidad de flujo y un riesgo mínimo de separación en las esquinas. Para este fin se realizaron cálculos computacionales de flujo potencial y de las capas límites que se desarrollarían sobre sus paredes, variando su forma. En estudios anteriores no se detectó que existiera separación de capa límite en esta componente del túnel (Johansson, 1992).

Zona de trabajo

La zona de trabajo posee 7m de largo, 1.2m de ancho y 0.8m de alto en su entrada y se encuentra abierta al ambiente a través de un filtro de aire ubicado en su extremo corriente abajo. Su piso y techo pueden ser ajustados en ± 40 mm en altura para poder controlar el

gradiente de presiones en el interior de la misma y se encuentra contenida en un marco de acero que asegura su rigidez y mantiene un nivel de vibraciones bajo.

La zona de trabajo cuenta con un sistema de posicionamiento de instrumentos con cinco grados de libertad (x , y , z , α y φ) que se indican en la Figura 6.1.2, el cual es controlado a través de una computadora. Este sistema consiste en un brazo de 1.5m de longitud que se mueve a lo largo (x), alto (y) y ancho (z) de la zona de trabajo, con una punta donde se instalan distintos tipos de sistemas de sujeción y probetas y capaz de girar en un plano horizontal o vertical (α) y rotar sobre sí misma (φ). El error de posicionamiento de este sistema es menor a $1\mu\text{m}$, y la resolución angular es de $1/30^\circ$. Este sistema no posee un mecanismo que permita registrar su posición relativa a un sistema de coordenadas fijo, por lo que la posición de referencia inicial se debe fijar cuidadosamente para cada serie de medida.

En la Figura 6.1.2 se muestra una foto del interior de la zona de trabajo con el sistema de posicionamiento instalado. Este sistema se desliza a lo largo de la zona de trabajo a través de una ranura existente en el techo.

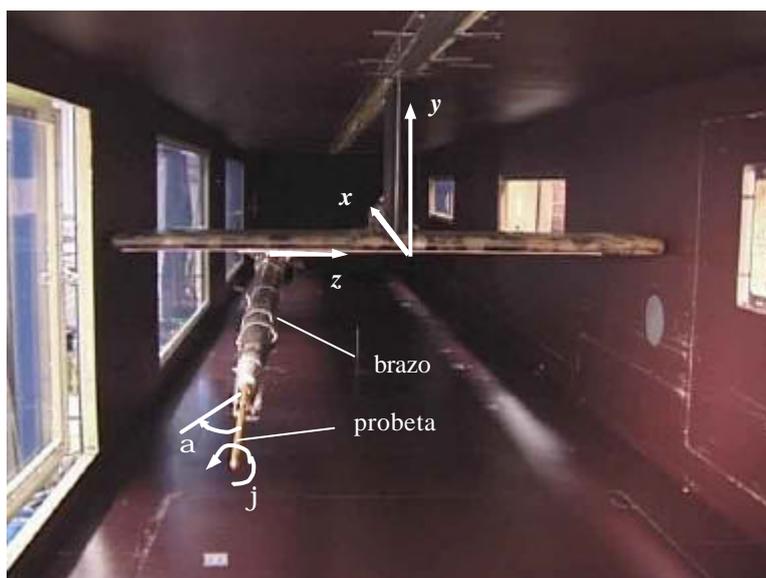


Figura 6.1.2. Vista del sistema de posicionamiento de instrumentos

Difusores y esquinas

Los difusores de este túnel de viento fueron diseñados para no presentar separación y poseen un ángulo de apertura cónica equivalente cercano a 6° . El primer difusor incrementa el área de la sección transversal del túnel en un 50% respecto al área de la zona de trabajo, mientras que el tercero, ubicado corriente abajo del ventilador, convierte además una sección circular en una sección transversal rectangular. Se realizaron estudios en modelo de este último difusor para verificar que no presentara separación, tal como se indica en Johansson, 1992.

Los álabes ubicados en los codos del circuito de aire cumplen dos funciones: minimizar las pérdidas de carga que ocurren en las esquinas, así como asegurar una buena uniformidad del flujo, característica especialmente requerida en la cuarta esquina. Las esquinas cuentan respectivamente con 22, 30, 43 y 44 álabes. La separación entre álabes es cercana a los 5cm, por lo que éstos cumplen una función similar a un panal de abejas, amplificada por el hecho de que sobre ellos se desarrollan capas límites laminares sin desprendimiento.

Ventilador

El ventilador es de tipo axial, de 2m de diámetro exterior y posee 14 palas de ángulo ajustable entre 18 y 55°. Su control de velocidad se realiza a través de un motor de corriente continua de potencia máxima igual a 86kW, correspondiente a una velocidad de giro de 740rpm y a una máxima velocidad alcanzable en el inicio de la zona de trabajo de 69.5m/s, cuando ésta se encuentra vacía. Por otra parte se encuentra equipado con un dispositivo para evitar entrada en pérdida, álabes difusores a la salida y un sistema independiente de enfriamiento. Su fundación se encuentra separada del resto del edificio y sus vibraciones aisladas del resto de las componentes del túnel.

Circuito de enfriamiento

El circuito de enfriamiento consiste, como se indica en la Figura 6.1.1, en un intercambiador de calor, un sistema de enfriamiento y un control de temperatura que comanda la válvula de este circuito. El intercambiador de calor se encuentra situado corriente abajo del final del tercer difusor, y forma parte de un circuito cerrado de agua. Posee tubos elípticos y aletas muy delgadas que juntas actúan como otro panal de abejas, asegurando un flujo de aire con distribución uniforme de temperatura y de velocidad.

La temperatura de operación del túnel se puede variar entre 15°C y 30°C. De medidas anteriores se ha podido constatar que la variación de la temperatura en el tiempo se mantenía en un intervalo de $\pm 0.05^\circ\text{C}$, luego de un periodo inicial de 10 minutos (Österlund, 1999).

Aislación acústica

La mayor parte del circuito del túnel de viento posee aislación acústica de 20cm de espesor, realizada en lana de vidrio. En la Figura 6.1.1, las líneas más gruesas indican las secciones que han sido aisladas acústicamente. Además del tratamiento realizado en las paredes, el túnel cuenta con silenciadores corriente arriba y corriente abajo del ventilador, como se indicó anteriormente.

6.2 Evaluación de las características del flujo en la zona de trabajo

Por las características de diseño del túnel de viento MTL, vinculadas a los requerimientos de las distintas áreas de investigación dentro de la Mecánica de los Fluidos básica indicadas en el comienzo de este capítulo, se requería evaluar con gran detalle la uniformidad del flujo en la zona de trabajo de este túnel.

Tanto el diseño de este túnel de viento, como estudios anteriores del flujo en su zona de trabajo (Johansson, 1992) hacían esperar muy bajos niveles de turbulencia y no-uniformidades. Las características de la metodología e instrumentación utilizadas y las verificaciones realizadas a lo largo de este estudio reflejan la necesidad de realizar medidas muy cuidadosas.

En el presente estudio las características del flujo en la zona de trabajo del túnel MTL se evaluaron en la sección transversal de la misma ubicada 70cm corriente abajo del final de la contracción. Esta sección coincide con la estudiada en Johansson, 1992, lo que permite realizar comparaciones entre los resultados de ambos estudios. Como interesaba analizar la calidad del flujo lejos de la influencia de las paredes, las medidas se realizaron en la región central de esta sección. Para tal fin se utilizó generalmente una grilla de 60 puntos de medida, separados entre sí 10cm, contenida en un rectángulo de 90cm de ancho por 50cm de alto centrado con el eje del túnel. Este rectángulo distaba aproximadamente unos 15cm de cada pared de la zona de trabajo. Todas las medidas se realizaron con una velocidad en la zona de trabajo igual a 25m/s y en la mayoría de los casos también se realizaron medidas a 10 y a 40m/s para comparar el funcionamiento del túnel en condiciones diferentes. La temperatura en el interior del túnel se mantuvo alrededor de 20°C en todas las medidas.

Durante el presente estudio el túnel de viento se operó con las cinco mallas en serie instaladas corriente abajo del panel de abejas indicadas en la Tabla 6.1.1, y con la zona de trabajo vacía.

Antes de comenzar con el plan de medidas se inspeccionaron y limpiaron las mallas y se ajustó la altura del techo de la zona de trabajo para obtener una velocidad uniforme a lo largo de los primeros 4m de la misma. En esas condiciones se midió la velocidad en el eje central de la zona de trabajo a lo largo de dichos 4m con la ayuda de un tubo Pitot y un micromanómetro digital con una repetibilidad mejor al 0.1% de la lectura, verificándose una variación longitudinal en la velocidad media menor a $\pm 0.5\%$, y una variación en la presión estática menor a $\pm 4\text{Pa}$.

Por otra parte, durante las medidas realizadas a lo largo de la presente investigación se pudo constatar que la variación de la velocidad media en el tiempo en puntos seleccionados de la zona de trabajo era menor a la repetibilidad de dicha medida ($\pm 0.04\%$), mientras que la variación de temperatura se mantenía en $\pm 0.05^\circ\text{C}$, a lo largo de varias horas de funcionamiento del túnel.

Las medidas realizadas fueron controladas por una computadora Macintosh Quadra 950, y tarjetas National Instruments que controlaban el sistema de posicionamiento de probetas en el interior del túnel de viento y la velocidad del aire, y proveían las interfases necesarias para adquirir los datos provenientes de los instrumentos de medida.

El sistema de posicionamiento de instrumentos era comandado por dos tarjetas controladoras MU, mientras que la velocidad de giro del ventilador del túnel se controlaba a través de una tarjeta NB-MIO-16L. También se utilizó una tarjeta adquisidora A2000 para adquirir datos durante algunas medidas. Esta tarjeta es una tarjeta analógica-digital de 12 bits con una frecuencia de muestreo de hasta 1MHz y cuatro canales analógicos de entrada. Finalmente, una tarjeta DMA 2800 proveía a la computadora y demás tarjetas instaladas con acceso a memoria directa en bloque y con una interfase NuBus a GPIB.

Se utilizó un paquete NI-DAQ para controlar las tarjetas y el programa LabView para programar y realizar tanto el control y posicionamiento de los instrumentos como la adquisición y el análisis de datos, además de la velocidad y temperatura del túnel.

6.2.1 Medidas de presión total

Como primer medida para evaluar la uniformidad del flujo se decidió estudiar la uniformidad de la distribución espacial de la presión total (estática más dinámica), promediada en el tiempo en la sección de trabajo indicada. Sus características se encuentran relacionadas con las características de la distribución de velocidad y presión estática del flujo medio y con un buen diseño general de las componentes del túnel. No-uniformidades importantes encontradas en esta distribución pueden indicar defectos de diseño o de construcción que pudieran tener los álabes de esquina, el panel de abejas, las mallas, la contracción, etc.

Para disminuir la dependencia de la medida de posibles cambios en la condición de funcionamiento del túnel en el tiempo se midió la diferencia entre la presión total correspondiente a cada punto de la grilla y la presión total en un punto de referencia ubicado en la cámara de asentamiento. Se utilizó la presión total en la cámara de asentamiento como referencia por ser una presión representativa de la condición de funcionamiento del túnel.

Instrumentación

La presión total en la cámara de asentamiento se midió con un tubo de presión total instalado en una de sus paredes laterales. La presión total en la sección de la zona de trabajo se midió en el orificio de presión total del tubo Pitot que muestra la Figura 6.2.1.1., colocado en el extremo del sistema de posicionamiento del túnel.



Figura 6.2.1.1. Tubo Pitot utilizado en medida de presión total

Las medidas de presión total se llevaron adelante con un micromanómetro FCO510 marca Furness Control Ltd., Modelo 2, y se adquirieron a través de una interfase RS232. Este instrumento posee escalas de medida de 2000.0 y de 200.00Pa y posee un transductor de presión diferencial de alta sensibilidad, con una resolución en su indicador digital de 0.01Pa en su menor escala. Este micromanómetro realiza el procesamiento de la señal internamente con un convertidor analógico a digital de 16bits. Su exactitud es del 0.25% de la lectura hasta el 10% (20Pa) de su menor escala de medida y por debajo de este valor, ésta pasa a ser de \pm un dígito es decir, 0.01Pa, valor menor al 0.025% del fondo de escala correspondiente. Su repetibilidad es mejor al 0.1% en ambas escalas. Este instrumento también fue utilizado para registrar la temperatura en el interior del túnel y la presión ambiente. La temperatura del túnel se midió con una apreciación de 0.1°C utilizando un sensor Druck Pt-100 instalado 3.5m corriente abajo del comienzo de la zona de trabajo, mientras que la presión ambiente se midió con un sensor Druck PTX 520, colocado debajo de la zona de trabajo del túnel.

Medidas

Antes de comenzar las medidas en la sección de la zona de trabajo bajo estudio se analizó la evolución de la presión total en el tiempo en el punto de referencia en la cámara de asentamiento y en varios puntos de la grilla. Estas presiones totales se registraron en el tiempo para diferentes intervalos de promediación utilizando el micromanómetro en la escala de 2000Pa, dando promedios cercanos a 380Pa en todos los casos. Las presiones registradas variaron en menos de ± 0.3 Pa una vez que el interior del túnel alcanzaba condiciones estacionarias de operación, correspondiendo a una variación menor a $\pm 0.1\%$ respecto al promedio. Se debe señalar que la amplitud que presentó esta medida es del orden de la repetibilidad del instrumento utilizado, por lo que las variaciones de presión total en el tiempo podrían ser menores. Este valor correspondería a una variación temporal de la velocidad menor a $\pm 0.04\%$, si se supone una presión estática constante en el tiempo.

A continuación se estudió la variación temporal de la diferencia de presión total entre el punto central de la grilla y la cámara de asentamiento, promediando cada un minuto. En la Figura 6.2.1.2 se muestra el resultado de esa medida llevada a cabo a lo largo de diez horas:

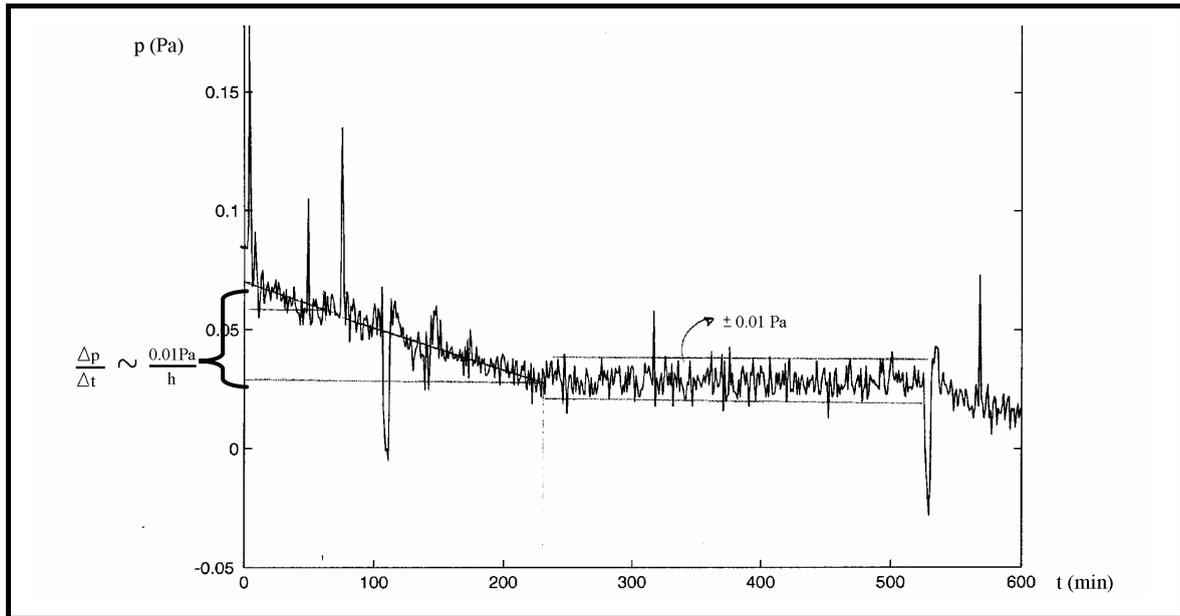


Figura 6.2.1.2 Medida de la variación temporal de la diferencia de presión total entre un punto de la grilla y la cámara de asentamiento

En esta figura se puede observar una variación temporal inicial relativamente lineal con pendiente cercana a 0.01Pa por hora en las primeras tres horas y media de medida. Luego de la misma se puede observar que la presión diferencial se mantiene en un intervalo comprendido entre $0.03 \pm 0.01\text{Pa}$ durante las siguientes cinco horas. A lo largo de toda la medida se verifica en general variaciones pico a pico de $\pm 0.01\text{Pa}$, que coinciden con la resolución del indicador digital del instrumento de medida en la escala utilizada de 200Pa .

Las medidas de presión total en la sección de la zona de trabajo analizada se realizaron en la grilla descrita en 6.2 únicamente para la velocidad de 25m/s por la complejidad de las mismas, ya que las presiones a medir iban a ser relativamente cercanas a la resolución del micromanómetro en su escala más baja. Para cada punto de la grilla se registró la diferencia de presión total entre el punto y la cámara de asentamiento, la temperatura en el interior del túnel y la presión ambiente. La serie de medidas se realizó cuatro veces, dos veces promediando en cada punto de la grilla durante dos minutos y las restantes dos veces realizando promedios durante un minuto. En las series de igual intervalo de promediación se decidió barrer los puntos de la grilla en diferente orden para analizar si se obtenían resultados diferentes. La duración de cada serie de medida no superó las tres horas en ninguno de los casos y se utilizó el micromanómetro FCO510 en el rango de 200Pa .

El control de la temperatura en el interior del túnel se fijó en 20°C , mientras que la presión dinámica de referencia se registró en el punto central de la grilla con el tubo Pitot utilizado para medir la presión total, al comienzo y al final de cada serie de medidas, y en cada una de ellas se mantuvo cercana a 395Pa .

Las cuatro series de medidas realizadas se muestran en las figuras 6.2.1.3 a 6.2.1.6. En ellas el rectángulo exterior de los gráficos corresponde a las paredes de la zona de trabajo y las cruces, a los 60 puntos de la grilla donde se realizaron las medidas. Como interesaba estudiar la variación espacial relativa de la presión total, se restó a las medidas tomadas en cada punto de la grilla el promedio espacial de la serie de medidas correspondiente. De esta manera, el promedio espacial de los valores presentados en la sección para cada serie es cero. El valor substraído es la diferencia de presión total promedio entre la sección bajo estudio y la cámara de asentamiento, relacionada con la pérdida de carga que tiene lugar en la contracción.

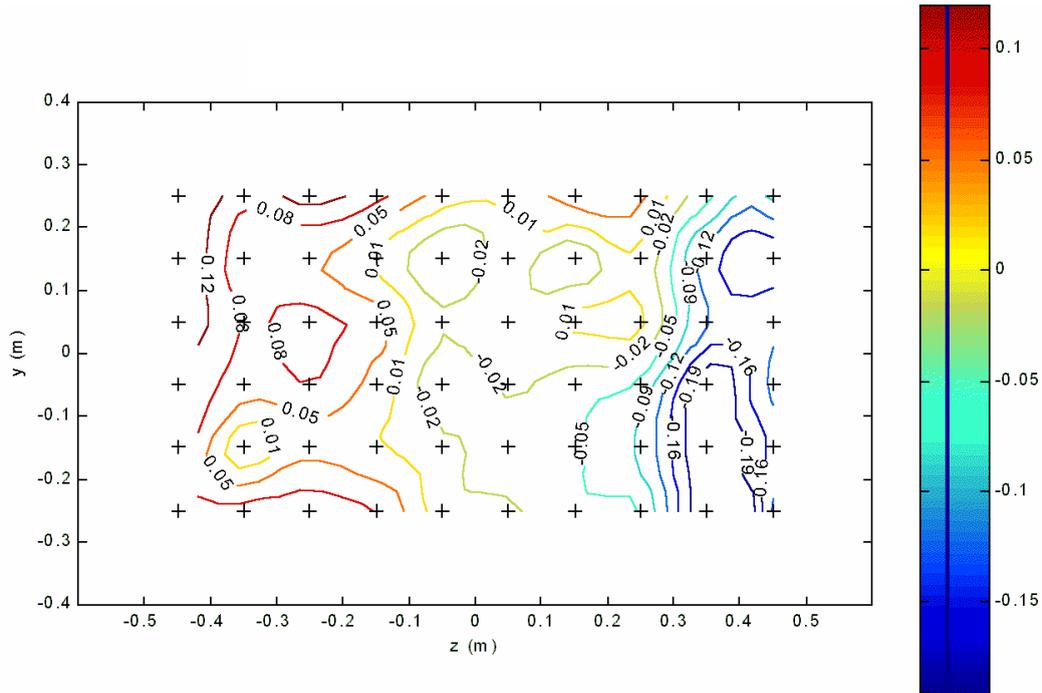


Figura 6.2.1.3. Primer serie de medidas de presión total (Pa)

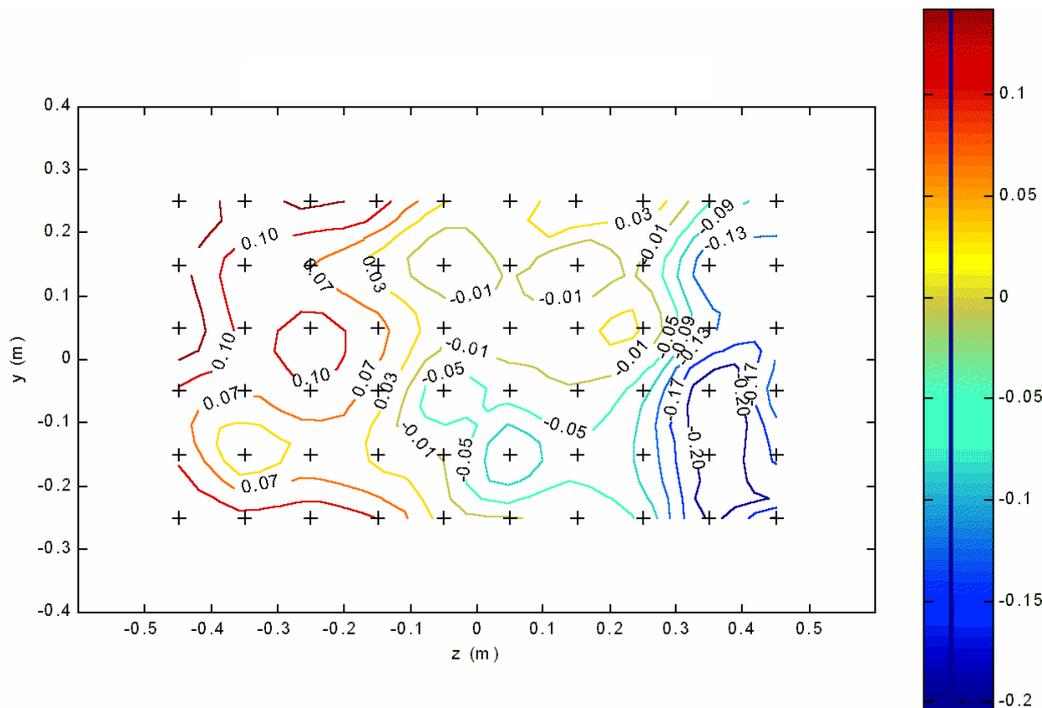


Figura 6.2.1.4. Segunda serie de medidas de presión total (Pa)

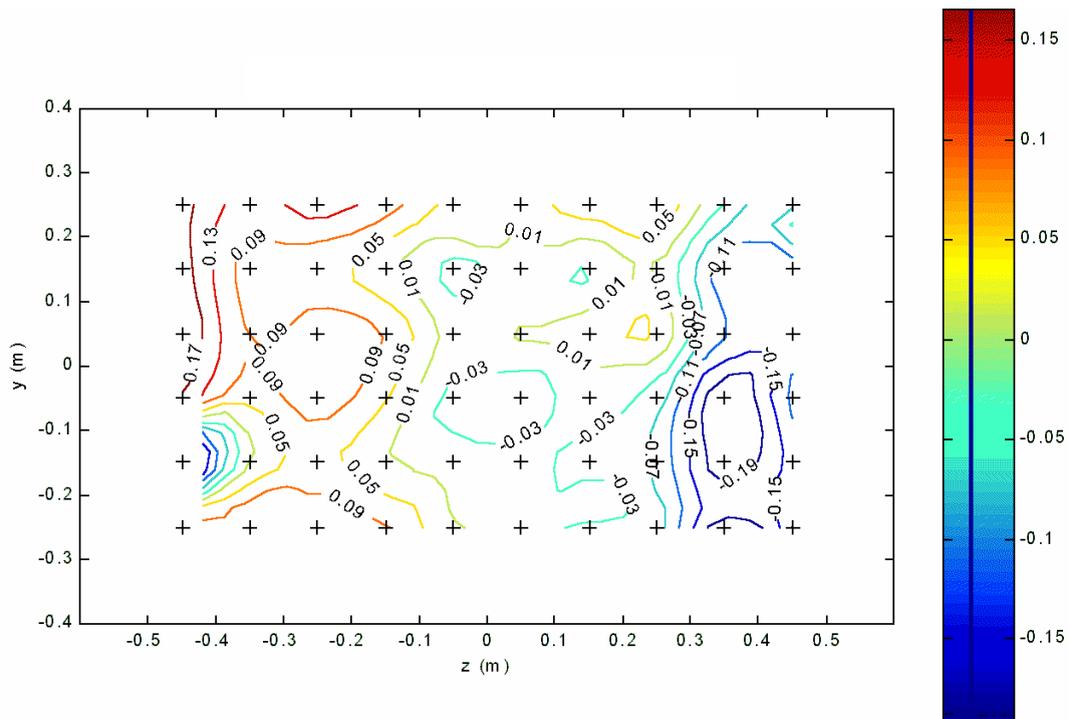


Figura 6.2.1.5. Tercer serie de medidas de presión total (Pa)

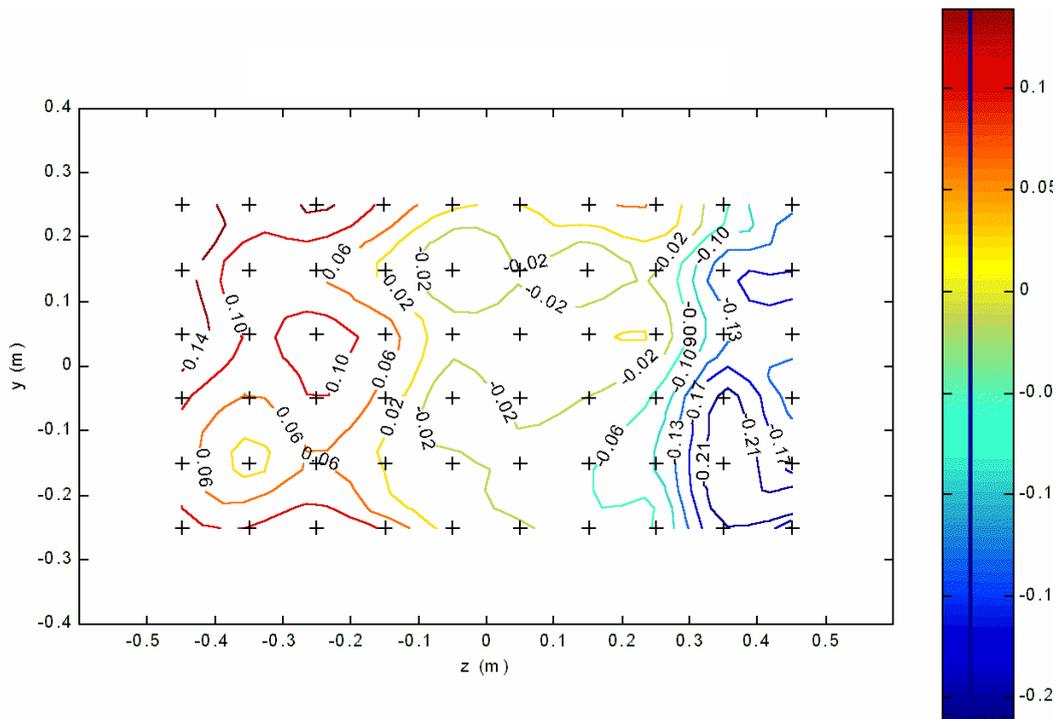


Figura 6.2.1.6. Cuarta serie de medidas de presión total (Pa)

Las curvas de iso-presión indicadas fueron obtenidas mediante el programa Matlab utilizando interpolaciones cúbicas triangulares a partir de las medidas realizadas en los puntos de la grilla. Como se puede observar, las medidas realizadas muestran una distribución de presiones bastante similar, especialmente las series 1, 2 y 4. Estas series en particular presentaron diferencias en las presiones medidas en puntos correspondientes menores a ± 0.01 Pa en el 90% de los mismos. Estas diferencias coinciden nuevamente con la resolución

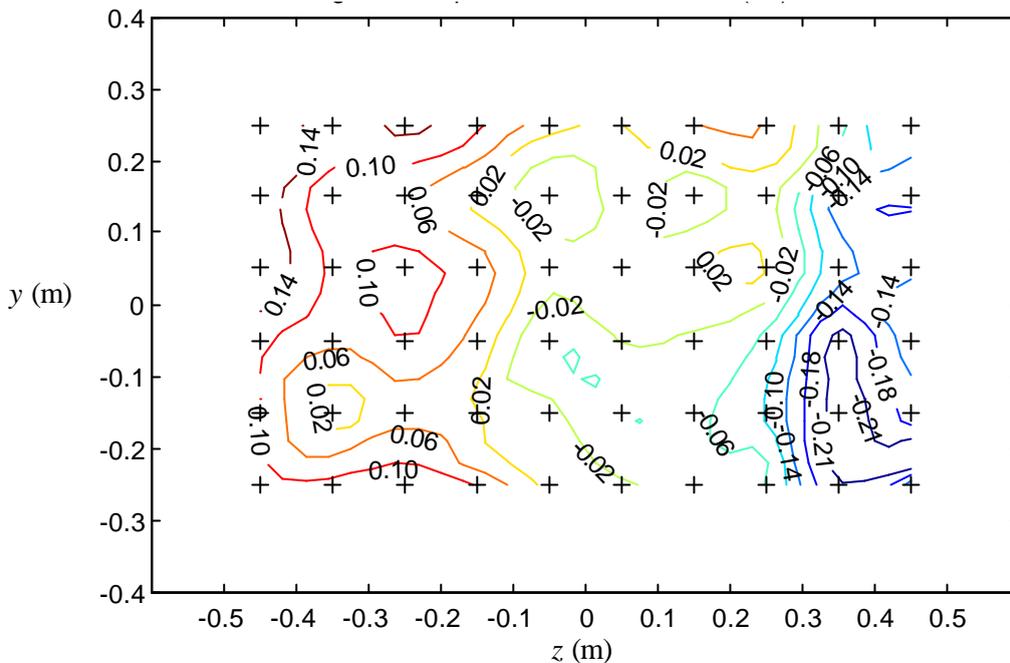


Figura 6.2.1.7. Promedio de medidas de presión total (Pa)

del micromanómetro utilizado. Por las diferencias que presentó la distribución de presión total correspondiente a la tercer serie de medidas respecto a las otras tres, mayores a 0.2Pa en su ángulo inferior izquierdo, se decidió descartar la misma y trabajar con la distribución que resulta de promediar las tres series restantes, la cual se muestra en la Figura 6.2.1.7.

En la distribución de presión total promedio se observa que cerca del 80% de los puntos de la grilla presentan presiones comprendidas en el intervalo ± 0.15 Pa, siendo el mínimo absoluto -0.24Pa y el máximo 0.19Pa. Por otra parte, cerca del 20% de los puntos presentan presiones en el intervalo ± 0.02 Pa, particularmente aquéllos comprendidos en una franja central vertical con z entre ± 0.15 m, corrida levemente hacia la derecha como se puede apreciar en esta última figura.

Los resultados también se pueden expresar como porcentaje de la presión dinámica medida en el centro de la grilla, como se indica en la Figura 6.2.1.8. Como se puede observar, las mayores variaciones espaciales de la presión total registrada se encuentran comprendidas entre un -0.05% y un 0.06% de la presión dinámica.

Conclusiones

A pesar de las dificultades encontradas al realizar estas medidas, se constató un patrón repetitivo en la distribución de la presión total en la zona de trabajo y una diferencia muy pequeña (menor a ± 0.01 Pa a 25m/s en el 90% de los casos) entre los valores medidos para cada punto de la grilla en diferentes momentos, con lo que se consideran confiables los resultados obtenidos. El valor de esta diferencia es igual a la resolución del instrumento de medida utilizado y similar a la variación temporal de la diferencia entre la presión total medida en algunos puntos de la grilla y en la cámara de asentamiento, como se indicó en la

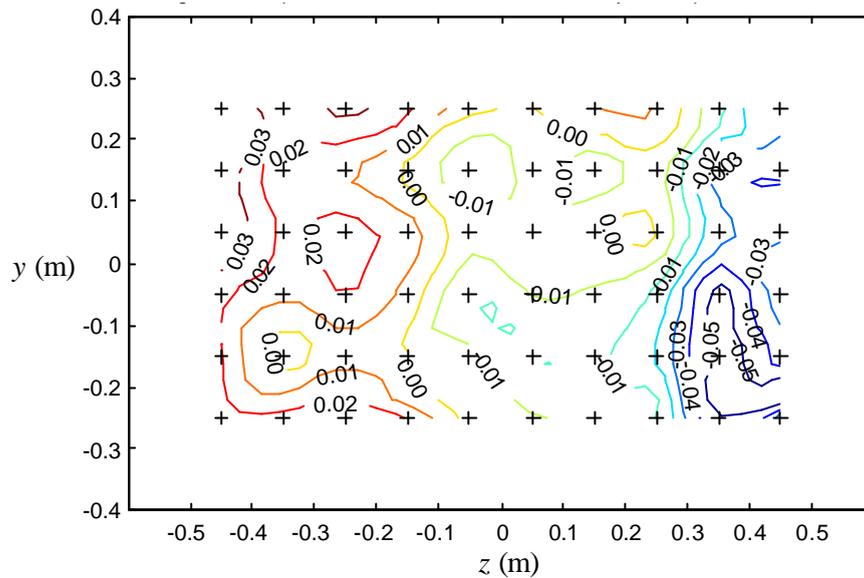


Figura 6.2.1.8 Presión total expresada como porcentaje de la presión dinámica

Figura 6.2.1.2.

Tanto en la Figura 6.2.1.7 como en la 6.2.1.8 se observa una región central vertical, algo alejada de las paredes, con una no-uniformidad excepcionalmente pequeña en la presión total, de $\pm 0.02\text{Pa}$ ($\pm 0.005\%$). A la izquierda de esta región se registran presiones totales levemente mayores y a su derecha, levemente menores. Si no ocurrieran variaciones de presión estática en la sección, hacia la izquierda de la región central se tendrían velocidades levemente mayores. La variación espacial máxima encontrada es de $\pm 0.2\text{Pa}$ ($\pm 0.05\%$) a 25m/s , aproximadamente. Si se supone una distribución de presión estática uniforme, estos valores corresponderían a una variación en la distribución de la velocidad media menor a $\pm 0.03\%$.

Por otra parte, la variación temporal de la presión total tanto en puntos de la grilla como en la cámara de asentamiento sería menor a $\pm 0.1\%$, aunque podría ser aun menor, como se comentó anteriormente. Esto correspondería a una variación temporal de la velocidad media menor a $\pm 0.04\%$ si se supone una presión estática constante.

Aunque los resultados de esta medida se presentaron de manera diferente en Johansson, 1992 (figura 4) al no haber restado el promedio espacial en la sección, se puede apreciar que la no-uniformidad máxima obtenida en la distribución de presión total durante el presente estudio fue cerca de la mitad de la registrada anteriormente. Por otra parte, la distribución de presión total presentó algunas diferencias. Por ejemplo, en la misma figura se observan gradientes de presión total en general verticales y en la Figura 6.2.1.8 de este estudio se observan que estos son más bien horizontales.

De cualquier manera, observando los resultados presentados en este capítulo se puede concluir, sin lugar a dudas, que el túnel de viento MTL presenta una uniformidad excepcional en la distribución de presión total en la zona de trabajo.

6.2.2 Medidas de la dirección del flujo

Además de evaluar la distribución de presión total en una sección de la zona de trabajo, interesaba estudiar la distribución espacial de la dirección del flujo medio en la misma, para obtener una visión general de la estructura del flujo. Con este estudio se pueden identificar, por ejemplo, vórtices que se desplacen a lo largo de la zona de trabajo del túnel de viento, los que pueden interferir con otras medidas, tales como las realizadas con probetas dobles de hilo caliente.

Instrumentación

Para medir la dirección del flujo se deben de utilizar probetas muy sensibles a su posición angular respecto al flujo. Generalmente se utilizan para tal fin probetas que permiten medir la diferencia de presión entre dos puntos de las mismas y su variación cuando éstas son rotadas respecto a la dirección del flujo, tal como se indica en Bryer & Pankhurst, 1971. Se pueden utilizar probetas que poseen dos tubos dispuestos en ángulos fijos uno respecto al otro o que en el mismo cuerpo, generalmente simétrico, disponen de dos orificios sobre su superficie dispuestos también simétricamente. Estos orificios se pueden situar de tal manera que pequeños cambios en la dirección del flujo impongan diferencias de presiones importantes entre los mismos. En el caso de las probetas simétricas, la presión diferencial indicada posee generalmente un intervalo de ángulos respecto del plano de simetría, equidistante de los dos orificios mencionados, en el que ésta es función lineal del ángulo del flujo. En este caso, una presión diferencial nula indica que la dirección del flujo se encuentra en el plano de simetría. La relación entre la presión diferencial indicada y el ángulo de ataque del flujo se debe hallar calibrando la probeta.

La medida de la dirección del flujo se puede realizar mediante dos métodos. El método directo consiste en fijar la posición de la probeta y determinar el ángulo del flujo respecto al plano de simetría de la probeta en función de la presión diferencial medida entre los orificios. El segundo método consiste en posicionar la probeta de manera que la presión diferencial medida sea nula y medir el ángulo correspondiente de la probeta respecto a una posición fija de referencia.

Debido a su simplicidad y a los pequeños ángulos que presenta el flujo en un túnel de viento, generalmente se utiliza el método directo para estudiar la uniformidad del flujo en ellos. En ese caso conviene utilizar probetas con respuesta lineal en el intervalo de ángulos que se espera que contenga la medida, y por lo tanto deben elegirse probetas simétricas.

Para medir la distribución del ángulo que presenta el flujo en la sección de estudio del túnel MTL se utilizó una probeta direccionalmente sensible a pequeños ángulos respecto al flujo, construida especialmente para esta medida. El cuerpo de esta probeta es de forma

rectangular y plana (de pequeño espesor), básicamente, y presenta una incisión en forma de V a 45° en el extremo sobre el que incide el flujo, que aumenta la diferencia de presión registrada entre sus dos caras. Los orificios de medida de la presión diferencial se encuentran inmediatamente corriente abajo de dicha incisión, de ambos lados de la probeta.

En la Figura 6.2.2.1 se muestra una foto de la probeta utilizada. En la misma se señala con un círculo la posición de los orificios.



Figura 6.2.2.1. Probeta de medida de ángulo del flujo utilizada

A medida que el punto de estancamiento del flujo incidente se mueve sobre el borde de ataque, levemente redondeado, de esta probeta, la presión diferencial que se registra entre los orificios presenta un comportamiento lineal con el ángulo relativo del flujo, para ángulos de ataque pequeños. Las medidas de la dirección del flujo se realizaron utilizando el método directo colocando la probeta en cada punto de la grilla ya indicada en dos posiciones fijas con $\alpha = 0^\circ$, una correspondiente a $\varphi = 0^\circ$ (cuerpo de la probeta en plano vertical, como indica la figura) y otra con $\varphi = 90^\circ$ (probeta en plano horizontal). La primera medida permitió medir el ángulo del flujo medio respecto a un plano vertical en cada punto, mientras que la segunda medida indicaba el ángulo del flujo medio respecto a un plano horizontal. En cada serie de medidas se verificó que la posición inicial de la probeta fuera tal que los ángulos relativos del flujo medidos pertenecieran al intervalo de comportamiento lineal de la presión diferencial.

La medida de presión diferencial se realizó utilizando el micromanómetro FCO510 marca Furness Control Ltd descrito en 6.2.1 y ésta se registró a través de una interfase RS232. Con el mismo instrumento se registró además la temperatura en el interior del túnel y la presión ambiente.

La medida de la presión dinámica de referencia se realizó con el tubo Pitot indicado en la

figura, colocándolo en el interior del túnel al inicio y al final de cada serie de medida.

Medidas

La medida de la dirección del flujo se realizó en la grilla descrita en 6.2 (con $x = 70\text{cm}$) para velocidades de 25, 10 y 40m/s en la zona de trabajo. La medida a 25m/s se repitió en la misma sección y adicionalmente en la posición $x = 2.5\text{m}$ corriente abajo del comienzo de la zona de trabajo, para estudiar las similitudes entre estas distribuciones. En cada punto se registró la diferencia de presión entre los orificios de la probeta, la temperatura en el interior del túnel y la presión ambiente. La medida de la presión dinámica de referencia se realizó al inicio y al final de cada serie de medidas.

Para cada velocidad indicada se realizó una calibración de la probeta, colocando la misma en el centro de la sección de la zona de trabajo estudiada ($x = 70\text{cm}$, $y = 0\text{cm}$, $z = 0\text{cm}$) y variando el ángulo α del sistema de posicionamiento entre -1.2 y 1.2° cada 0.05° en los tres casos. En cada posición de la probeta se registró la diferencia de presión entre los orificios de la misma realizando promedios de un minuto. En este caso el ángulo ϕ se mantuvo en 0° .

De esa manera se obtuvieron las constantes de calibración 9.05, 2.342 y 80.65 %/Pa para las velocidades de referencia 25, 10 y 40m/s, respectivamente.

Los resultados se muestran en las Figuras 6.2.2.2, 6.2.2.3, 6.2.2.4, 6.2.2.5 y 6.2.2.6.

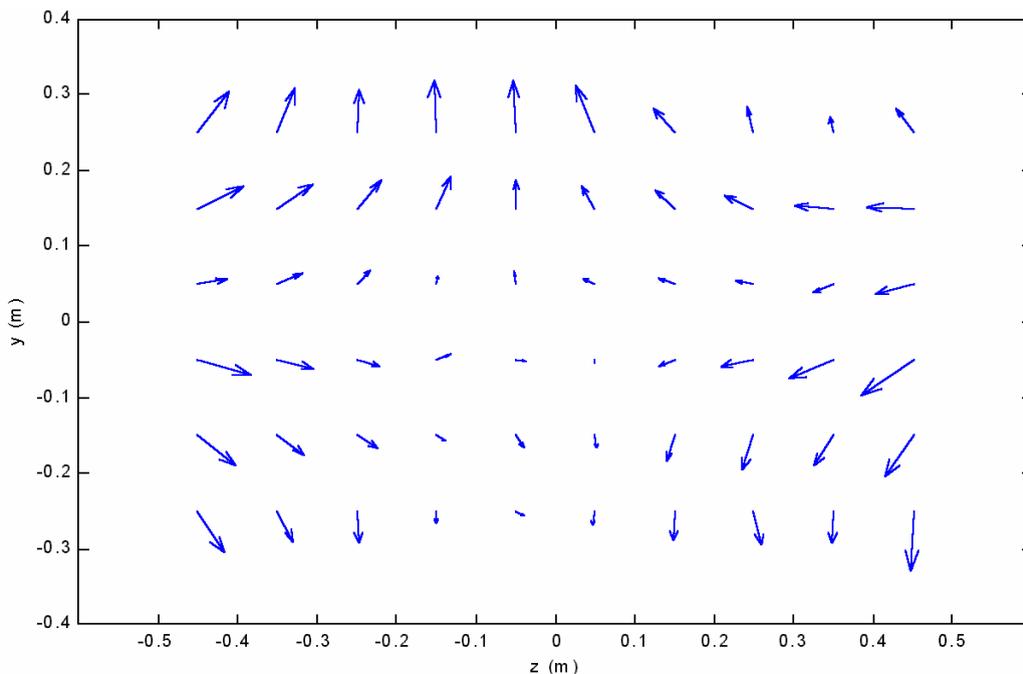


Figura 6.2.2.2. Primer medida de la dirección del flujo a 25m/s, $x = 70\text{cm}$

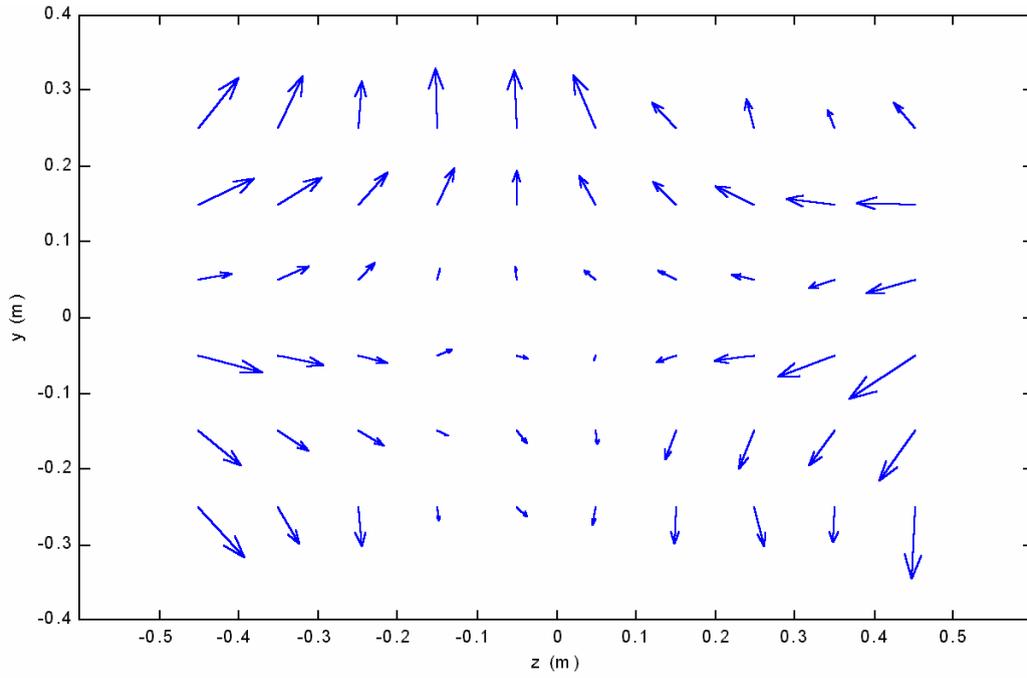


Figura 6.2.2.3. Segunda medida de la dirección del flujo a 25m/s, $x = 70\text{ cm}$

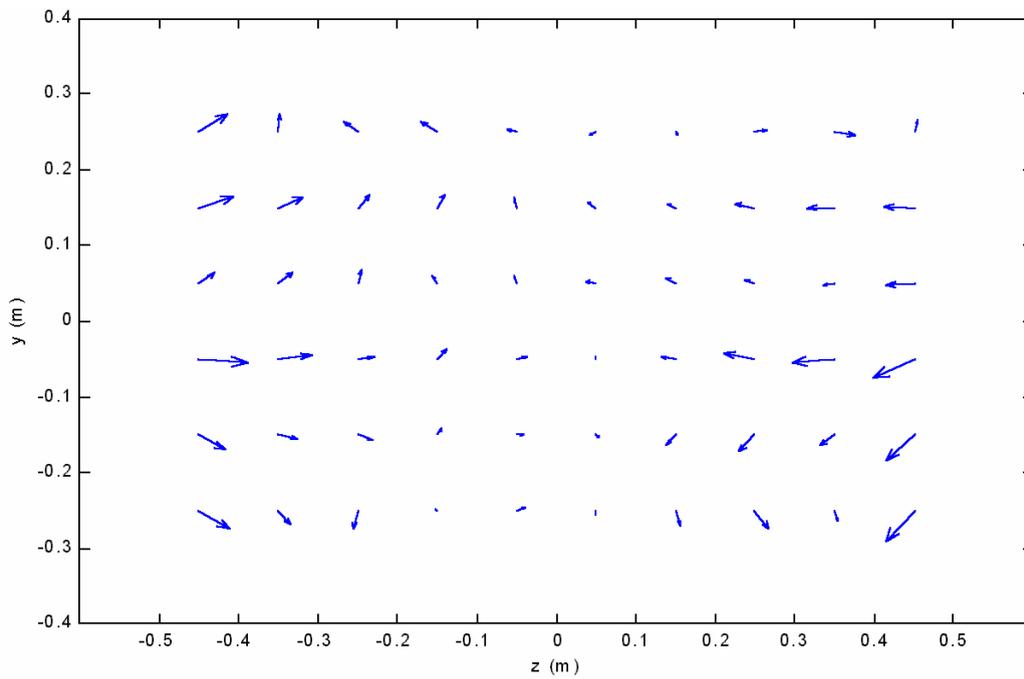
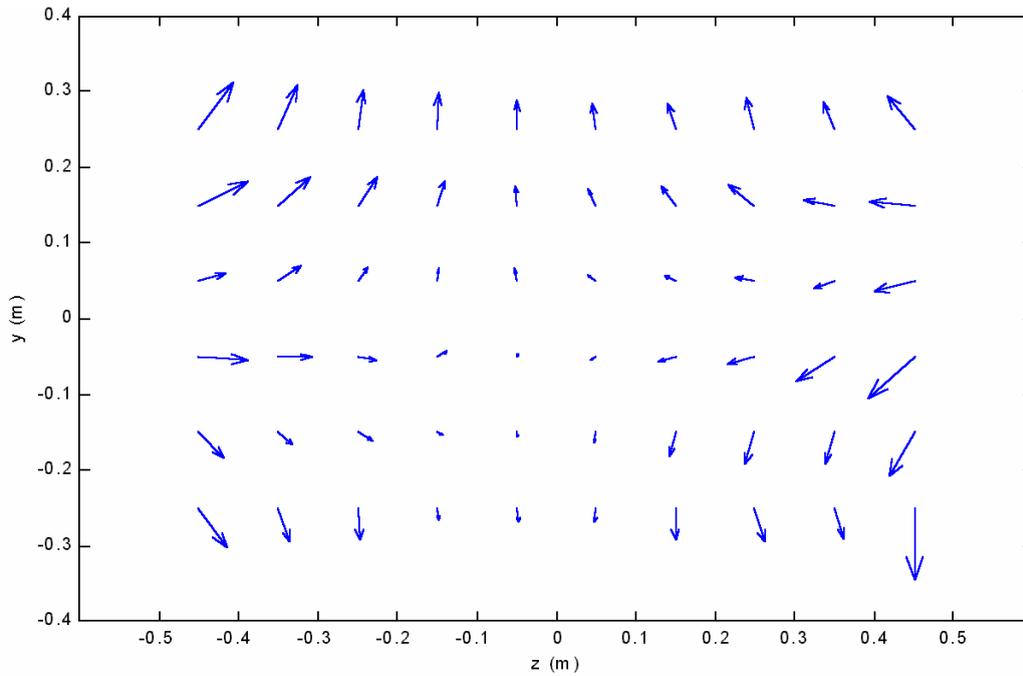
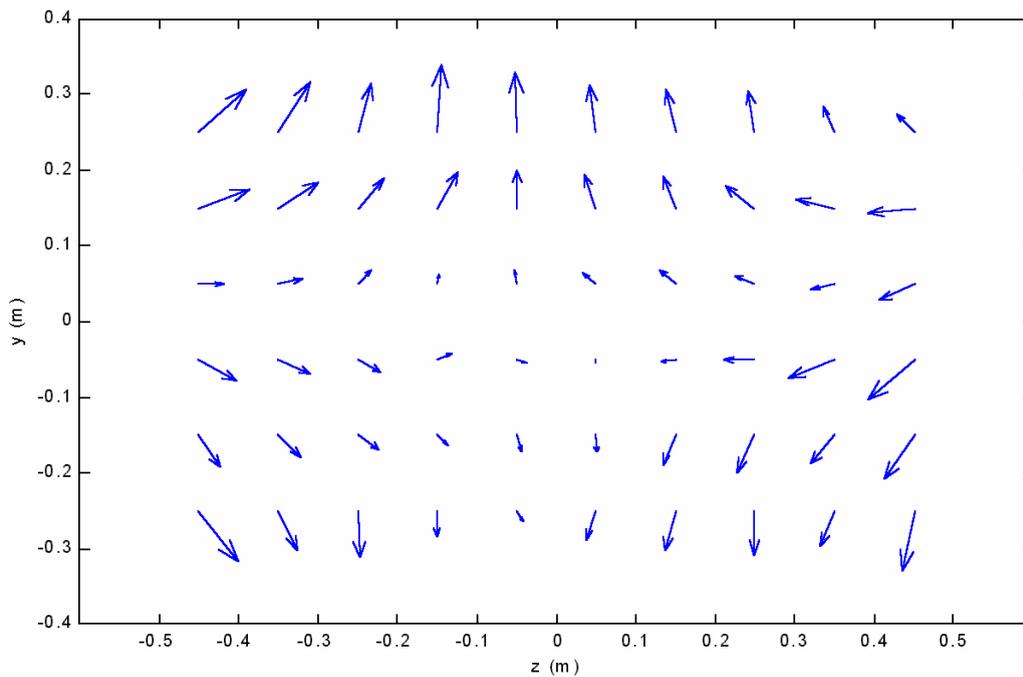


Figura 6.2.2.4. Medida del ángulo del flujo a 25m/s, $x = 2.5\text{ m}$

Figura 6.2.2.5. Medida del ángulo del flujo a 10m/s, $x = 70\text{cm}$ Figura 6.2.2.6. Medida del ángulo del flujo a 40m/s, $x = 70\text{cm}$

En estas figuras, la dirección de los vectores es la dirección de la componente del flujo en el plano perpendicular al eje del túnel en cada punto de medida y su módulo es directamente proporcional al módulo de dicha componente. Nuevamente, el rectángulo exterior representa las paredes de la zona de trabajo del túnel. Las flechas de mayor tamaño corresponden a direcciones del flujo medio en esos puntos que forman ángulos cercanos a 0.2° con el eje del túnel. Estos ángulos corresponderían a componentes transversales del orden del 0.3% de la velocidad media. A 25m/s, por ejemplo, la máxima desviación del flujo medio en cada punto

respecto a la dirección longitudinal fue cercana a 0.15° .

Se puede apreciar la gran repetitividad encontrada entre las dos medidas realizadas en $x = 70\text{cm}$ a 25m/s (la desviación angular del flujo medio en puntos correspondientes a las dos medidas difiere en promedio en 0.02° , con una desviación estándar de 0.02°) y la alta similitud de los patrones mostrados con las medidas realizadas a 10 y a 40m/s . La estructura del flujo es similar para las tres velocidades, básicamente conservando los ángulos del flujo. Por otra parte, el promedio de los ángulos indicados para las tres velocidades en $x = 70\text{cm}$ fue cercano a 0.1° , y la desviación estándar, a 0.05° .

En todas las figuras se observa que las componentes transversales del flujo en las secciones estudiadas son aproximadamente simétricas respecto a los planos horizontal y vertical que contienen al eje central de la zona de trabajo, aunque en la sección ubicada en $x = 2.5\text{m}$ se registran éstas serían menores. En la gran mayoría de los casos el sentido de las componentes horizontales es hacia el centro de la sección y el de las componentes verticales es hacia el piso o al techo.

En las medidas a $x = 70\text{cm}$ la simetría respecto del plano horizontal es menor porque el flujo presenta una mayor componente ascendente, en particular en la zona central de la región superior. Una hipótesis posible es que esta componente se debe a la presencia de la ranura por la que se desliza el sistema de posicionamiento, que puede permitir cierta fuga de flujo al exterior, al encontrarse la zona de trabajo en sobrepresión. Esta fuga sería menor a menor velocidad, como sucede a $V = 10\text{m/s}$ y cuanto más corriente abajo se esté, como se observa en $x = 2.5\text{m}$. En este último caso no se aprecian diferencias importantes entre la región superior e inferior.

Conclusiones

Aunque los ángulos medidos durante este estudio fueron muy pequeños, la repetitividad encontrada en las medidas realizadas a una misma velocidad y sección y la similitud de los comportamientos encontrados a distintas velocidades muestran la confiabilidad de los resultados obtenidos.

El flujo medio en los puntos medidos presenta direcciones que forman ángulos del orden de 0.1° y menores en todos los casos a 0.2° con el eje del túnel. La estructura simétrica del flujo encontrada en el presente estudio podría deberse, por ejemplo, a una disminución en el ancho disponible para el pasaje del flujo en la sección estudiada y a un aumento de su altura, así como a la presencia de la ranura en el techo del túnel. En Johansson, 1992 se había encontrado para la misma sección de la zona de trabajo ángulos siempre menores a 0.1° , mientras que la estructura del flujo no presentaba la simetría indicada en este estudio. Ambas diferencias podrían deberse a un posicionamiento levemente diferente de las paredes del túnel.

6.2.3 Medidas de temperatura

La tercer medida realizada para analizar la uniformidad del flujo en la zona de trabajo consistió en el estudio de la distribución de temperatura en la sección de la zona de trabajo ubicada en $x = 70\text{cm}$. En la mayoría de los estudios realizados en esta instalación interesa contar con una distribución uniforme de temperatura y conocer la máxima discrepancia esperada, por ejemplo, para evaluar la incertidumbre asociada a medidas realizadas con anemómetro de hilo caliente.

Instrumentación

La temperatura en la sección estudiada se midió con una termorresistencia del tipo RTD Pt-100 especialmente construida por la autora y un multímetro. Entre los sensores de temperatura existentes, los sensores termorresistivos poseen una buena sensibilidad, estabilidad a largo plazo y requieren de circuitos de interfase simples. Debido a la alta resolución requerida por la medida de temperatura, cercana a los 0.005°C , se seleccionaron termorresistencias del tipo RTD. Los RTD se construyen a partir de hilos resistivos, metálicos generalmente, con características conocidas de resistencia en función de la temperatura. El platino es muy utilizado en muchas aplicaciones debido a la posibilidad de ofrecer mayor resolución de medida que otros materiales además de una respuesta predecible y alta durabilidad. Adicionalmente, la resistencia de este material se puede suponer lineal con la temperatura en la cercanía de los 20°C , temperatura de trabajo, sin introducir errores significativos. Por estas razones se optó por construir una termorresistencia con sensor de platino. El sensor seleccionado fue un clase 1/3 B RTD Pt-100 M-FX 416 de Sensor Nite, debido a su pequeño tamaño ($3.9\text{mm} \times 1.6\text{mm} \times 0.9\text{mm}$) combinado con un tiempo de respuesta bajo y una corriente eléctrica admisible mayor en comparación con otros sensores disponibles. Las series FX se caracterizan por poseer una alta estabilidad por periodos largos y una desviación de su curva característica mínima según DIN EN 60751.

Para seleccionar el instrumento de medida de la resistencia del sensor, se debe tener en cuenta que los sensores RTD presentan pequeños cambios de resistencia en función de la temperatura por lo que se precisa contar con una buena amplificación de la señal. Por otra parte, cambios en la resistencia medida debidos a cambios en las conexiones eléctricas pueden ser interpretados como cambios de temperatura y para minimizar este efecto generalmente se utilizan puentes compensadores. En este estudio se utilizó para medir la resistencia del sensor un multímetro HP 34401 con seis dígitos y medio de resolución y 20% de capacidad de sobrecarga, que cuenta con un puente Wheatstone de cuatro ramas para realizar la compensación de las conexiones eléctricas con el cual es posible eliminar de la medida la resistencia eléctrica de las conexiones y medir únicamente la resistencia del sensor de platino. En el rango de 100Ω , este instrumento puede detectar cambios en la resistencia medida de hasta $0.1\text{m}\Omega$, y la deriva de la medida en 24 horas se encuentra evaluada en $3\text{m}\Omega$. Este último valor corresponde a una diferencia en la temperatura medida de 0.008°C cuando la

temperatura es cercana a los 20°C. Por otra parte, en este rango la corriente aplicada para medir resistencia es 1mA, compatible con la corriente máxima admitida por el sensor Pt-100.

Medidas

Se realizaron medidas de la distribución de la temperatura en la sección de estudio para velocidades en la zona de trabajo de 10, 25 y 40m/s. Antes de comenzar cada medida, se analizó la variación temporal de la temperatura en el centro de la misma para la velocidad correspondiente. En todos los casos se fijó el control de temperatura del túnel en 20°C y se registró la evolución de la resistencia del sensor Pt-100 con el multímetro en la escala de 100Ω cada un segundo aproximadamente.

La primer medida realizada correspondió a la velocidad de 25m/s. En este caso se registró la evolución de la resistencia del sensor en el tiempo durante diez horas consecutivas de funcionamiento del sistema de control de temperatura del túnel, siendo su promedio cercano a 107.7Ω, lo que corresponde a una temperatura media de 19.9°C. En la Figura 6.2.3.1 se muestra las fluctuaciones de la temperatura registradas durante las primeras 3h 20min de la medida.

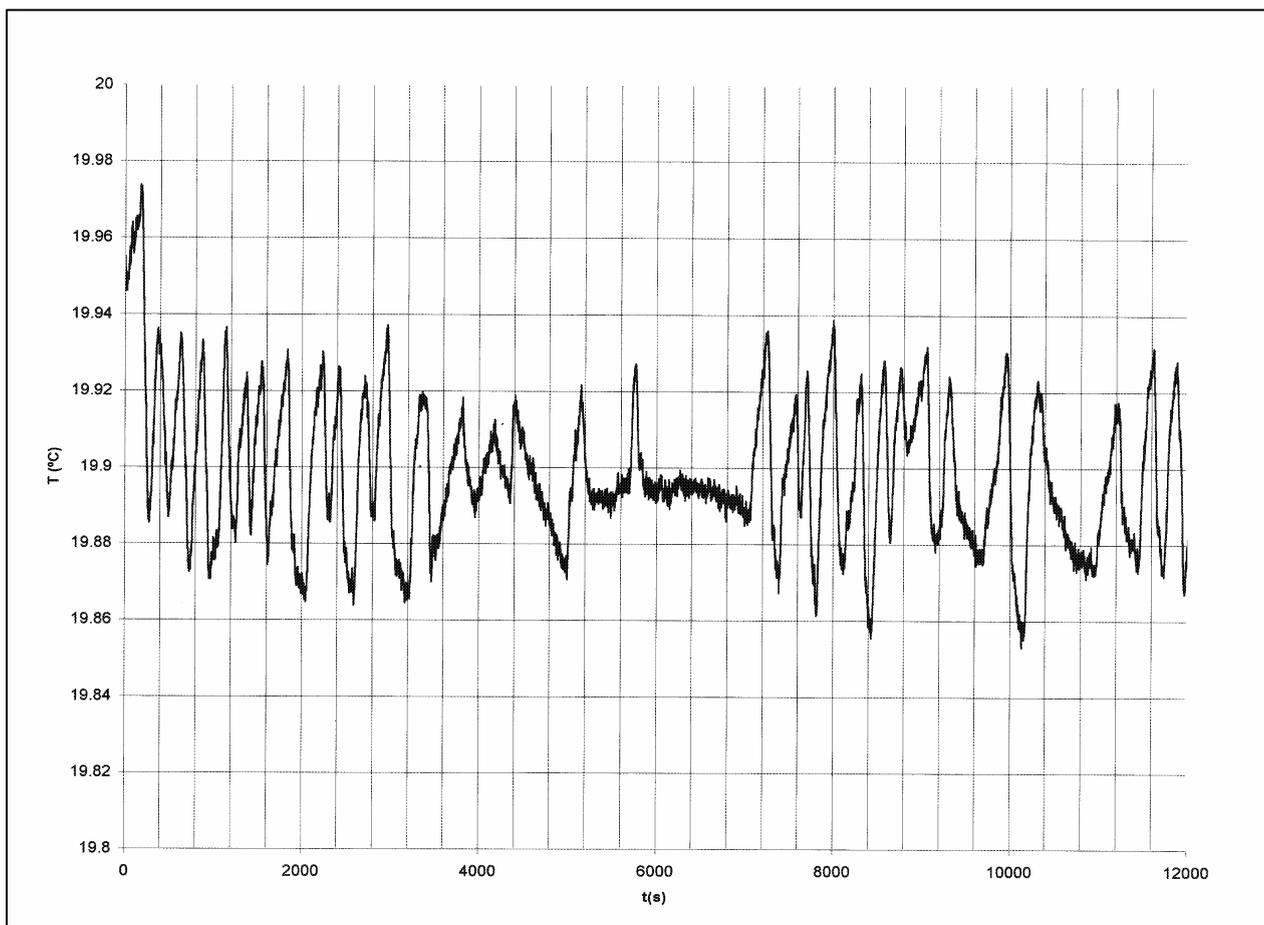


Figura 6.2.3.1 Registro de la evolución de la temperatura en el tiempo, 25m/s

En general se pudo observar que las fluctuaciones de la temperatura en el interior del túnel presentaban ciclos con periodos comprendidos en su mayoría entre 2 y 4 minutos y en todos los casos, menores a siete minutos, y amplitudes entre ± 0.01 y ± 0.04 °C, una vez que el interior del túnel alcanzaba condiciones estables de operación. Analizando cada hora de medida se encontró que la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura medida en cualquier hora se encontraba entre 0.08 y 0.09°C, y que la máxima diferencia a lo largo de las diez horas de medida correspondía a 0.1°C.

Por las características de las fluctuaciones encontradas se decidió estudiar el comportamiento de la temperatura medida realizando promedios cada siete minutos. De esta manera se eliminan las fluctuaciones de temperatura de menor escala temporal. En este caso se encontró que las temperaturas máximas y mínimas medidas en cada hora diferían entre 0.01 y 0.02°C y que la máxima diferencia de temperatura registrada en las diez horas correspondía a 0.03°C, disminuyendo a menos de la tercera parte del valor anterior. Por otra parte, al graficar la temperatura promedio de cada hora junto con las temperaturas máximas y mínimas horarias calculadas de esta manera, como se indica en la Figura 6.2.3.2, se encontró que estas tres temperaturas presentaban un comportamiento similar a lo largo de las diez horas de medida.

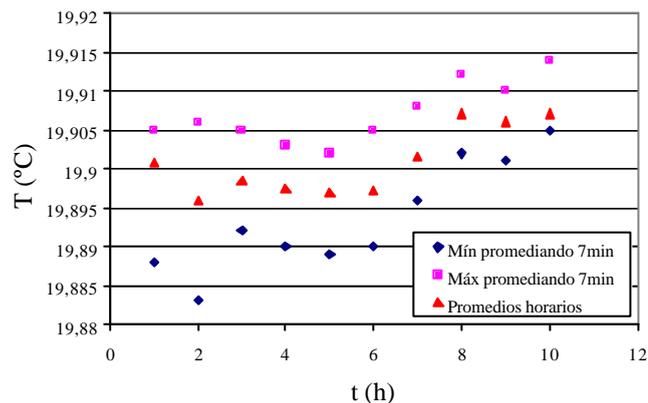


Figura 6.2.3.2. Evolución de las temperaturas medias, máximas y mínimas correspondientes a cada hora, 25m/s

Esta última figura muestra fluctuaciones de temperatura de mayor escala temporal que las apreciadas en la Figura 6.2.3.1, que podrían corresponder a cambios graduales de la temperatura del túnel o a la deriva de la medida de la termorresistencia.

A partir del análisis presentado anteriormente se decidió medir la distribución de la temperatura en la sección de la zona de trabajo realizando promedios de siete minutos en cada punto. Cabe señalar que debido a esta elección cada serie de medidas era completada en siete horas y media aproximadamente. Por esta razón se estimó que la incertidumbre asociada a la medida de temperaturas relativas pertenecientes a una misma serie sería menor a ± 0.015 °C. Esta incertidumbre estaría asociada a la deriva de la instrumentación y/o a cambios graduales en la temperatura del túnel.

Para la velocidad de 25m/s la distribución de temperatura en la sección de la zona de trabajo se registró en dos oportunidades diferentes para verificar la repetitividad de los resultados obtenidos. En las Figuras 6.2.3.3 y 6.2.3.4 se presentan estas dos medidas realizadas. Como en las medidas de presión total, las curvas indicadas fueron obtenidas mediante el programa Matlab utilizando interpolaciones cúbicas triangulares a partir de las medidas realizadas en los puntos de la grilla.

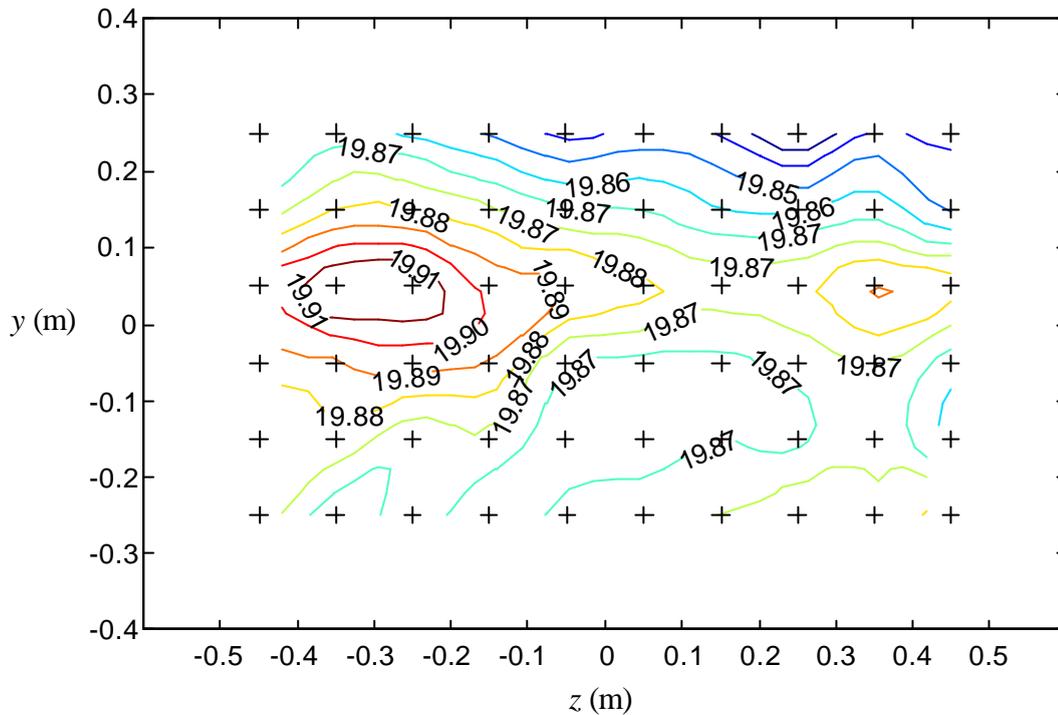


Figura 6.2.3.3. Primer serie de medidas de temperatura a 25m/s (°C)

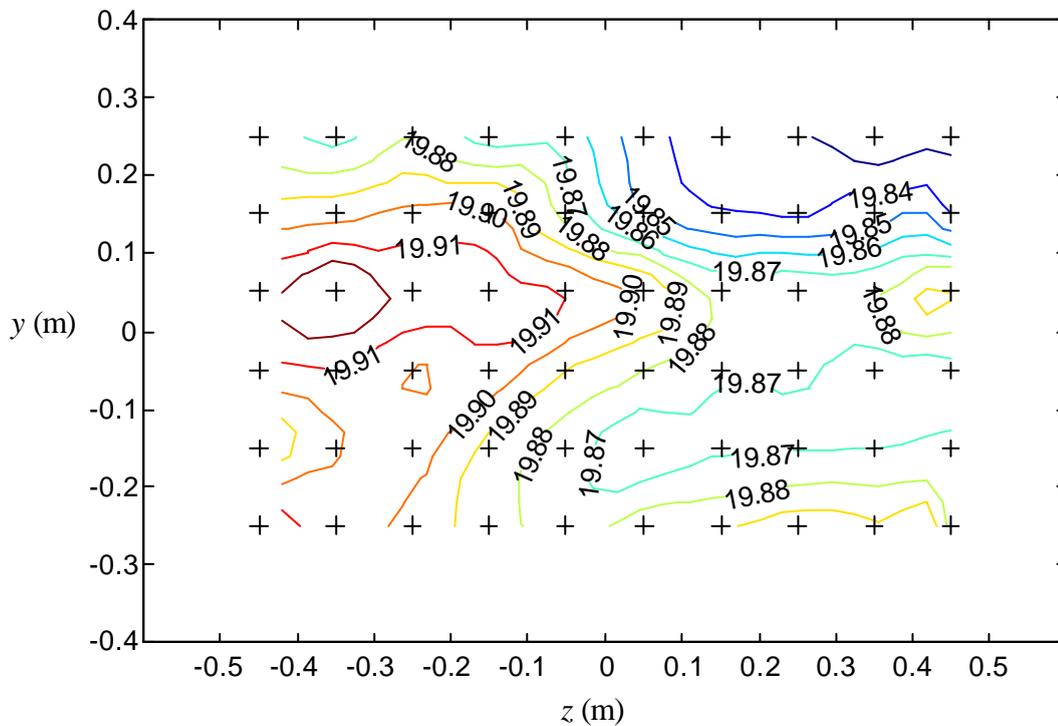


Figura 6.2.3.4. Segunda serie de medidas de temperatura a 25m/s (°C)

Se puede observar que la distribución de temperatura presenta un comportamiento cualitativamente similar en ambos casos. Se observa, en general, una zona de levemente mayor temperatura en la región central del borde izquierdo de la sección, y zonas de menor temperatura contra el techo y hacia la pared derecha. La máxima diferencia de temperatura encontrada en la sección varió entre 0.09 y 0.11°C.

Para comparar las temperaturas medidas en cada punto en ambas instancias se presentaron los resultados correspondientes a la segunda serie corregidos para que la temperatura media en la sección en este caso coincidiera con la temperatura media en la sección correspondiente a la primer serie de medidas. Cabe señalar que la diferencia de temperaturas medias registradas en cada oportunidad en la sección resultó 0.008°C. En estas condiciones se encontró que el 80% de los puntos correspondientes presentaban diferencias de temperaturas en el intervalo $\pm 0.015^\circ\text{C}$ y que las máximas y mínimas diferencias halladas correspondían a $\pm 0.03^\circ\text{C}$ y se ubicaban en zonas que habían registrado leves corrimientos de las regiones de mayores y menores temperaturas.

Las medidas de temperatura correspondientes a velocidades en la zona de trabajo de 10 y 40m/s se realizaron de manera análoga. La evolución temporal de la temperatura registrada en el centro de la grilla para ambos casos fue similar a la encontrada para 25m/s. A 10m/s los ciclos de temperatura presentaron periodos algo más largos y saltos de temperatura similares, mientras que a 40m/s los ciclos de temperatura fueron de periodos algo más cortos y presentaron amplitudes de hasta 0.1°C. Por la similitud encontrada con la medida a 25m/s se decidió promediar la temperatura nuevamente cada siete minutos al medir su distribución en la zona de trabajo. Estos resultados se indican en las Figuras 6.2.3.5 y 6.2.3.6.

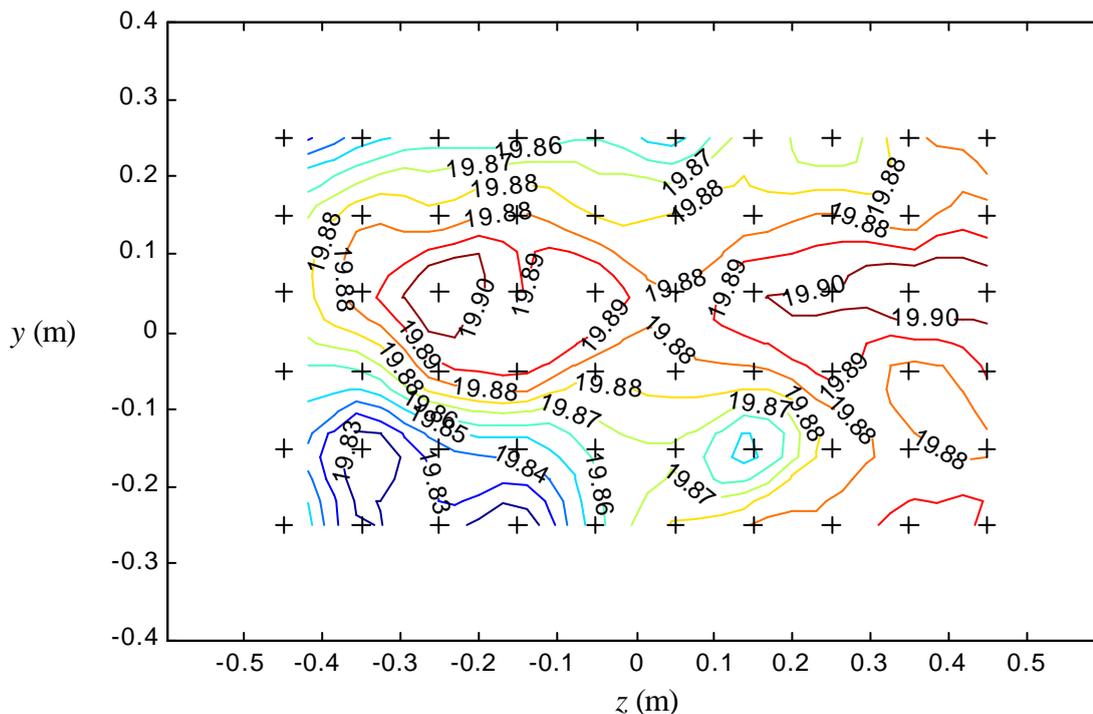


Figura 6.2.3.5 Serie de medidas de temperatura a 10m/s ($^\circ\text{C}$)

Los resultados obtenidos permiten afirmar entonces que la temperatura en la sección de la zona de trabajo estudiada varía espacialmente entre $\pm 0.05^\circ\text{C}$ para 10m/s y $\pm 0.08^\circ\text{C}$ para 40m/s aproximadamente.

La sección estudiada presenta, por otra parte, regiones de leves diferencias de temperatura, que se desplazan a medida que cambia la velocidad en el interior de la zona de trabajo. En general, la región central de la zona de trabajo que se extiende de pared a pared presenta temperaturas mayores que las zonas cercanas al piso o al techo, y al aumentar la velocidad el ángulo inferior izquierdo aumenta su temperatura, mientras que en el ángulo superior derecho la temperatura disminuye, como se puede observar en las Figuras 6.2.3.7, 6.2.3.8 y 6.2.3.9, en las que se presenta la diferencia de temperaturas entre medidas realizadas a diferentes velocidades. Este comportamiento seguramente se encuentre asociado a la disposición del sistema de enfriamiento en el interior del túnel, con la esquina que disminuye su temperatura relacionada al ingreso del agua fría al túnel y la restante asociada a la salida del agua más caliente hacia el enfriador. Estos resultados obtenidos reafirman la confiabilidad de las medidas realizadas, al presentar la distribución de la diferencia de temperaturas un comportamiento notablemente similar en estos tres casos indicados, así como valores mayores cuanto mayor es la diferencia de velocidad.

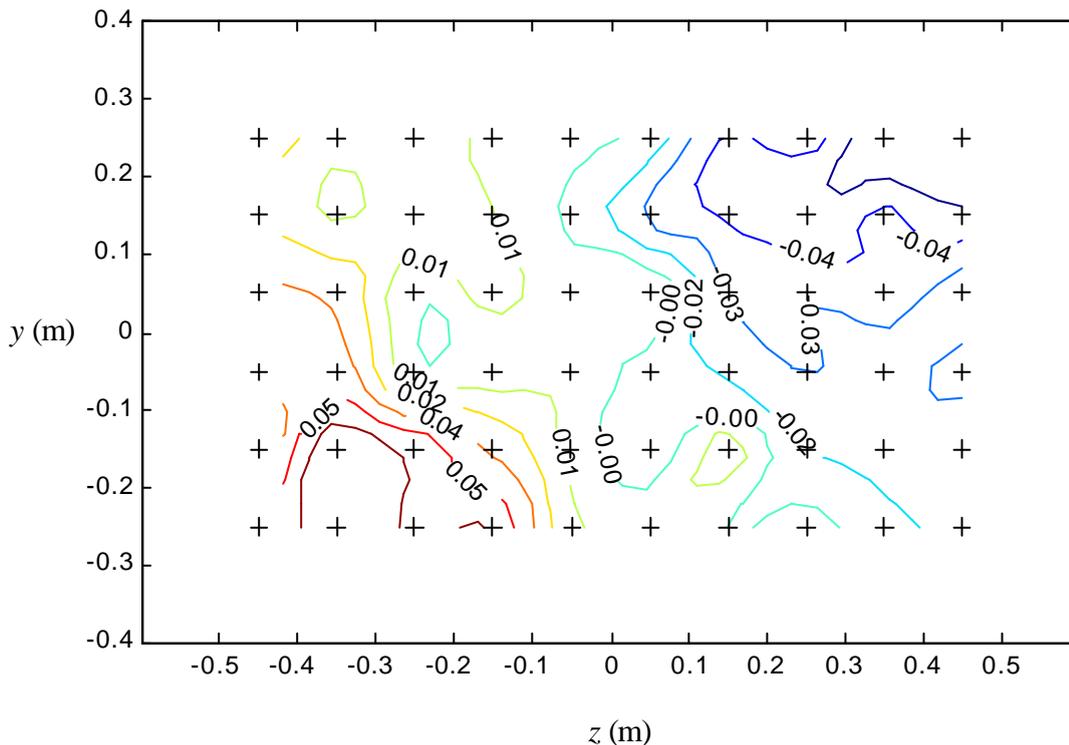


Figura 6.2.3.7 Distribución de la diferencia de temperaturas $T|_{25\text{m/s}} - T|_{10\text{m/s}}$ ($^\circ\text{C}$)

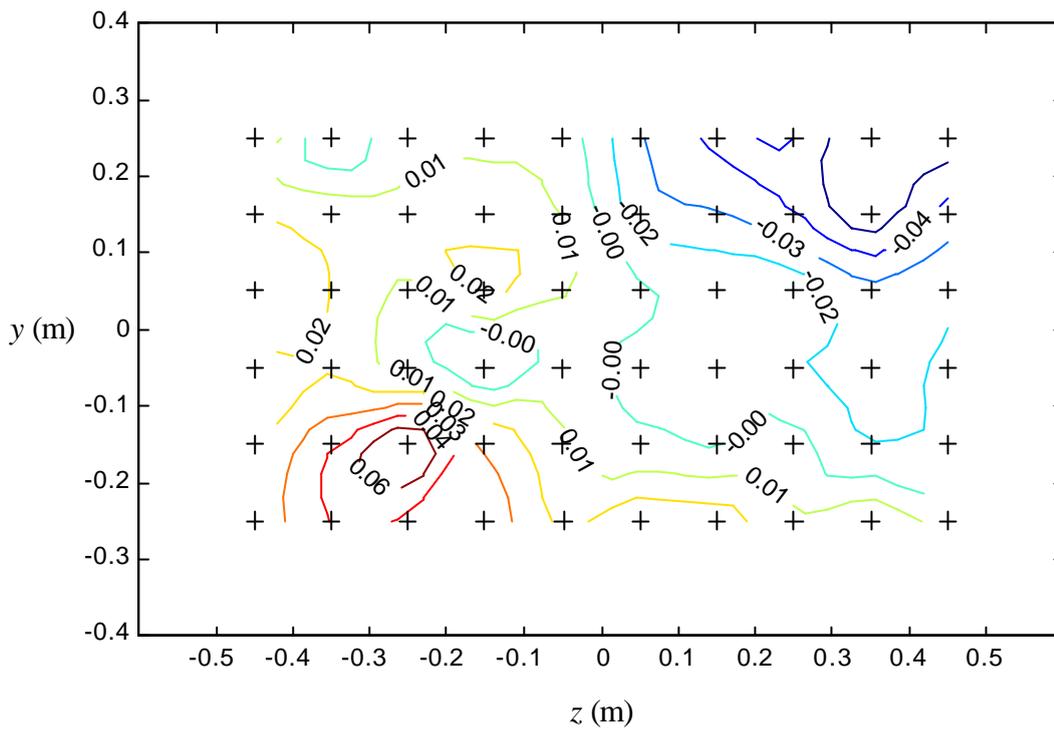


Figura 6.2.3.8 Distribución de la diferencia de temperaturas $T|_{40\text{m/s}} - T|_{25\text{m/s}}$ (°C)

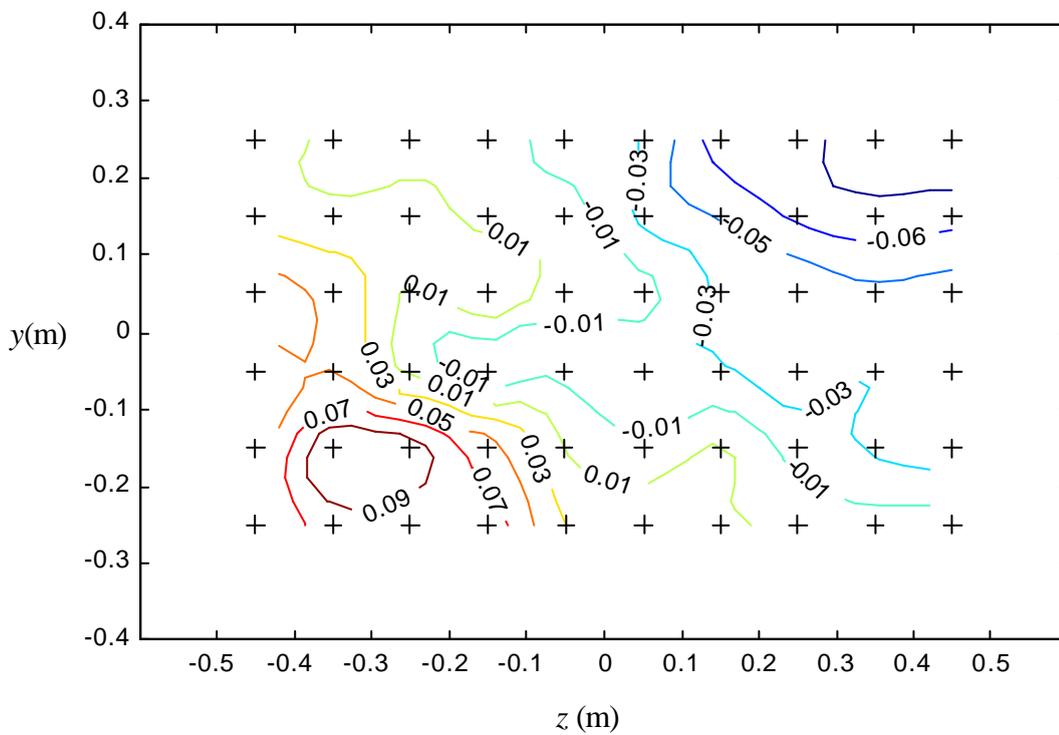


Figura 6.2.3.9 Distribución de la diferencia de temperaturas $T|_{40\text{m/s}} - T|_{10\text{m/s}}$ (°C)

En los resultados presentados en la figura 3 de Johansson, 1992, por otra parte, se indica la distribución de temperatura en una sección similar a la estudiada durante esta investigación, para una velocidad de 50m/s en el interior de la zona de trabajo. Aunque el sistema de control de temperatura sufrió alguna modificación desde esa fecha, la no-uniformidad máxima encontrada en la distribución de temperatura en la sección en ese caso y en la medida actual a 40m/s presentan el mismo valor. La distribución espacial parece ser algo diferente, sobretodo en la región inferior derecha, donde en el caso actual se registraron temperaturas similares a la temperatura en el centro de la sección, mientras que anteriormente se habían registrado temperaturas -0.14°C menores. La mayor diferencia de temperaturas en el caso actual se registra entre el ángulo inferior izquierdo (+) y el ángulo superior derecho (-), mientras que antes se registraba entre el ángulo superior izquierdo (+) y el ángulo superior derecho (-). De todas maneras se debe señalar que los pocos puntos presentados en Johansson, 1992 no permiten realizar conclusiones de esta distribución con mucho detalle.

De los resultados presentados en este capítulo se puede concluir que el túnel de viento MTL presenta una no-uniformidad en la distribución de temperatura en la zona de trabajo menor a $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ y una fluctuación temporal menor a $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$, vinculada al método de regulación de la temperatura del túnel, que con una buena elección del intervalo de promediación puede disminuir a $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$.

6.2.4 Medidas de velocidad

Para analizar las características turbulentas del flujo se decidió realizar medidas con una probeta de hilo caliente simple y con una de hilo doble. El objetivo principal de las mismas consistió en la obtención de la distribución de intensidad de turbulencia longitudinal I_u (eje x), lateral I_v (eje z) y vertical I_w (eje y). Contar con niveles bajos de intensidad de turbulencia es esencial al realizar estudios de transición de régimen laminar a turbulento o de procesos de separación laminar, por ejemplo, que forman parte de las aplicaciones de este túnel de viento.

Las medidas realizadas permitieron además verificar la uniformidad de la distribución de la velocidad media y relacionarla con la distribución de presión total que fuera presentada en 6.2.1. Se pudo caracterizar así mismo la distribución de la energía de las distintas componentes fluctuantes del flujo en frecuencia y verificar la baja correlación existente entre las mismas.

Instrumentación

Para realizar esta medida se contó con un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante modelo AN 1003 de A.A. Lab Systems Ltd, de dos canales.

La componente longitudinal de la velocidad se midió con una probeta de hilo caliente simple, la cual había sido construida previamente por personal del Departamento de Mecánica de la KTH. El sensor de esta probeta era hilo de platino de diámetro $2.5\mu\text{m}$ y longitud 0.5mm . Una foto de la misma se puede apreciar en la figura 6.2.4.1.

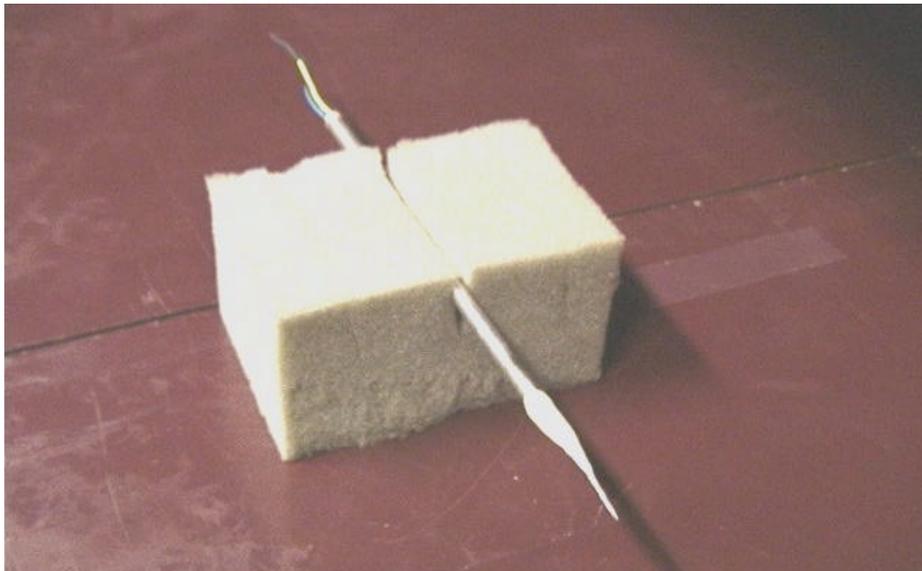


Figura 6.2.4.1 Probeta de hilo caliente simple utilizada

Las componentes fluctuantes lateral y vertical de la velocidad se midieron con una probeta de hilo caliente doble miniatura de Dantec, modelo 55P61, con hilos de platino dispuestos a 90° entre sí en configuración en X, de $5\mu\text{m}$ de diámetro y 1.25mm de longitud. El

plano de los hilos de esta probeta es paralelo al eje de la misma, por lo que las medidas de velocidad se realizan posicionando el cuerpo de esta probeta de manera paralela a la dirección del flujo medio. Un dibujo de esta probeta se indica en la Figura 6.2.4.2.

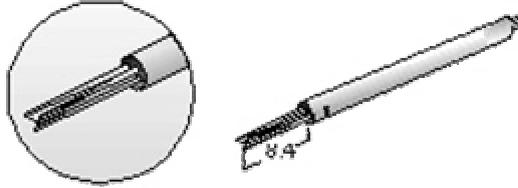


Figura 6.2.4.2 Probeta de hilo caliente doble

La restante instrumentación utilizada consistió en un amplificador y filtro externo Kemo modelo VBF10 para amplificar y filtrar la señal en caso necesario, un osciloscopio Tektronix modelo 2225, el multímetro HP 34401 descrito en 6.2.3, el cual fue utilizado para medir el offset seleccionado para la tensión de salida del anemómetro y el micromanómetro FCO510 descrito en 6.2.1, para medir la velocidad de referencia, la temperatura en el interior de la zona de trabajo del túnel y la presión ambiente. La adquisición de los datos se realizó con la tarjeta A2000 descrita en 6.2, cuyos canales analógicos poseen un rango de $\pm 5V$. Se debe señalar que dada la baja intensidad de turbulencia esperada se debió extremar los cuidados en la disposición de los instrumentos y en las conexiones eléctricas realizadas para poder obtener una relación ruido-síñal lo suficientemente baja.

La medida de la presión dinámica de referencia se realizó con el tubo Pitot indicado en la figura 6.2.2.1.

Medidas con probeta de hilo caliente simple

La distribución de la velocidad media y de la intensidad de turbulencia longitudinal se obtuvo para velocidades de 25 y de 10m/s en la sección de la zona de trabajo ubicada en $x = 70\text{cm}$. En las series de medidas correspondientes a 25m/s se utilizó una grilla de 240 puntos distanciados entre sí cerca de 5cm, contenida en el rectángulo de 90cm de ancho por 50cm de alto mencionado en 6.2, mientras que para la segunda velocidad se midió en la grilla de 60 puntos previamente descrita.

La probeta fue calibrada inmediatamente antes de las series de medidas correspondientes a cada velocidad, colocándola en el interior del túnel en el punto central de la sección de estudio. Como se pudo observar en el apartado 6.2.2, el flujo en la zona de trabajo presenta ángulos menores a 0.2° respecto a la componente longitudinal del mismo. En la región central de la sección los ángulos son incluso del orden de cinco veces menores al valor indicado. Como además se podrá observar más adelante en este capítulo, los niveles de intensidad de turbulencia son extremadamente bajos, por lo que este procedimiento se encuentra plenamente justificado. Para realizar cada calibración se seleccionó un intervalo de velocidades acotado por las velocidades esperadas en la sección de medida. Para las medidas a 25m/s se calibró la probeta

utilizando quince velocidades entre 24 y 26m/s, mientras que para las medidas realizadas a 10m/s se utilizaron diez velocidades comprendidas entre 9.2 y 10.8m/s. Las velocidades se controlaron automáticamente durante las calibraciones como se indicó al principio de este capítulo, midiendo la velocidad de referencia con el tubo Pitot ya descrito.

Tanto para las calibraciones como para las medidas realizadas en las grillas la frecuencia de muestreo se fijó en 1kHz. Durante las calibraciones se tomaron 65536 muestras (tiempo de muestreo cercano a 1min) a cada velocidad, mientras que las medidas en la grilla se realizaron tomando 131072 muestras (cerca de 2min de medida) en cada punto. En todos los casos se pudo constatar que la energía de las componentes fluctuantes del flujo se concentraba en frecuencias menores a 20Hz, siendo despreciable a partir de los 50Hz. Como la utilización del filtro superponía algo de ruido a la señal se decidió descartar su uso.

La relación entre la tensión de salida medida por el anemómetro, E , y la velocidad longitudinal U se modeló mediante la ley de King:

$$E^2 = A + B \cdot U^n \quad (6.2.4.1)$$

donde A y B son constantes que pueden depender de la temperatura, y n toma valores cercanos a $\frac{1}{2}$, tal como se presenta en el Capítulo 8.

En cada calibración se halló los valores de las constantes A y B correspondientes a una serie de valores de n mediante el método de mínimos cuadrados. Para realizar la selección final del conjunto de valores para A , B y n se estudió el máximo error relativo cometido al estimar las velocidades medidas durante la calibración mediante (6.2.4.1) para distintos valores de n . Debido a las pequeñas variaciones encontradas en dichos errores relativos se decidió en ambas calibraciones seleccionar el conjunto de valores correspondiente a $n = 0.5$. En las series de medidas realizadas la componente fluctuante de la velocidad se obtuvo directamente para cada punto realizando un análisis a las velocidades registradas en el tiempo. Estas se calcularon a partir de (6.2.4.1).

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la sección de la zona de trabajo estudiada al medir a 25 y a 10m/s en los puntos de las grillas seleccionadas. Estas velocidades de referencia corresponden a las velocidades medias registradas en el centro de la sección en cada caso, punto que se indica con una cruz en las figuras 6.2.4.3 y 6.2.4.6.

En las Figuras 6.2.4.3 y 6.2.4.6 se presentan las distribuciones de velocidad media obtenidas a 25 y a 10m/s, respectivamente, mientras que en las Figuras 6.2.4.4 y 6.2.4.7 se presenta la no-uniformidad calculada respecto a la velocidad de referencia en cada caso. Dicha no-uniformidad se expresó como porcentaje de la velocidad de referencia U_{ref} de la siguiente manera:

$$\text{no - uniformidad} = \frac{U_i - U_{ref}}{U_{ref}} \times 100$$

donde U_i es la velocidad media registrada en cada punto de la grilla.

Finalmente, las Figuras 6.2.4.5 y 6.2.4.8 presentan las distribuciones de intensidad de turbulencia longitudinal a 25 y a 10m/s, respectivamente, expresadas como porcentajes.

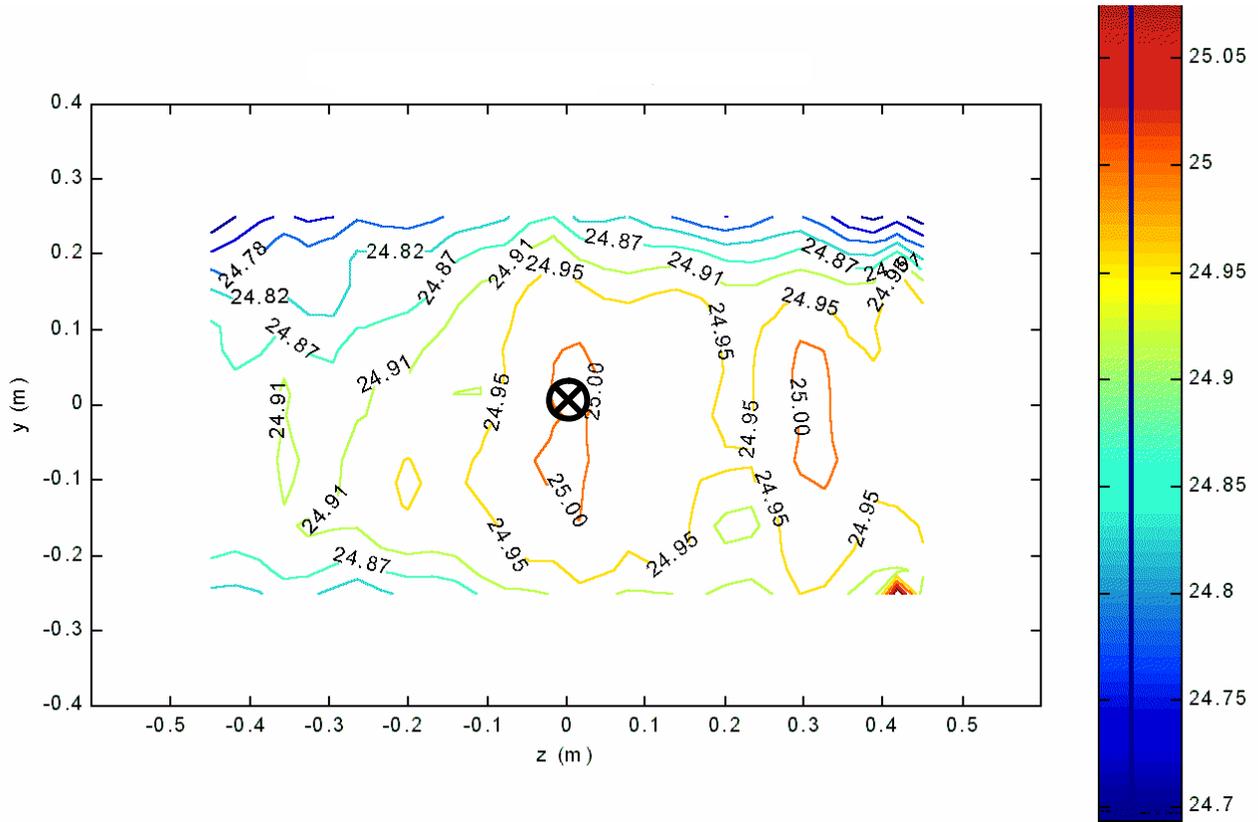


Figura 6.2.4.3 Distribución de velocidad media (m/s), $U = 25 \text{ m/s}$

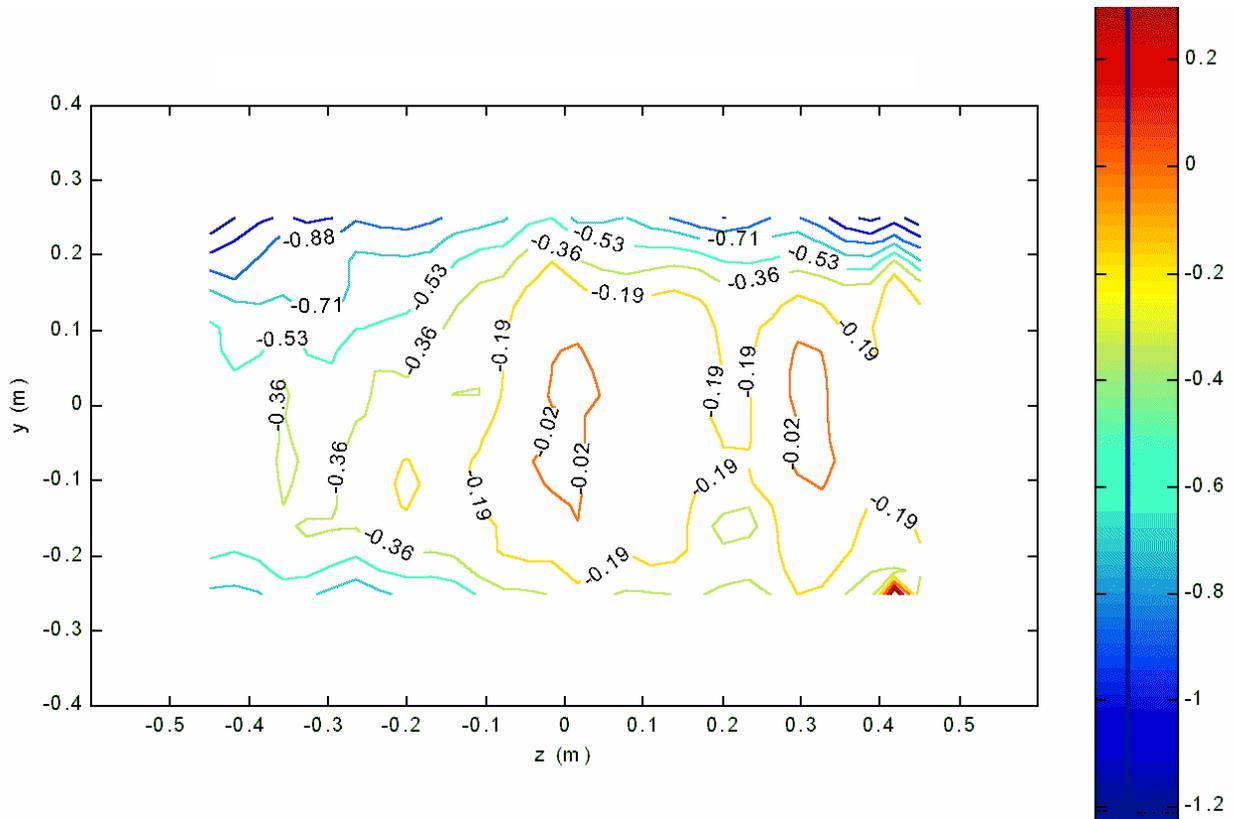


Figura 6.2.4.4 No-uniformidad de la velocidad media (%), $U = 25 \text{ m/s}$

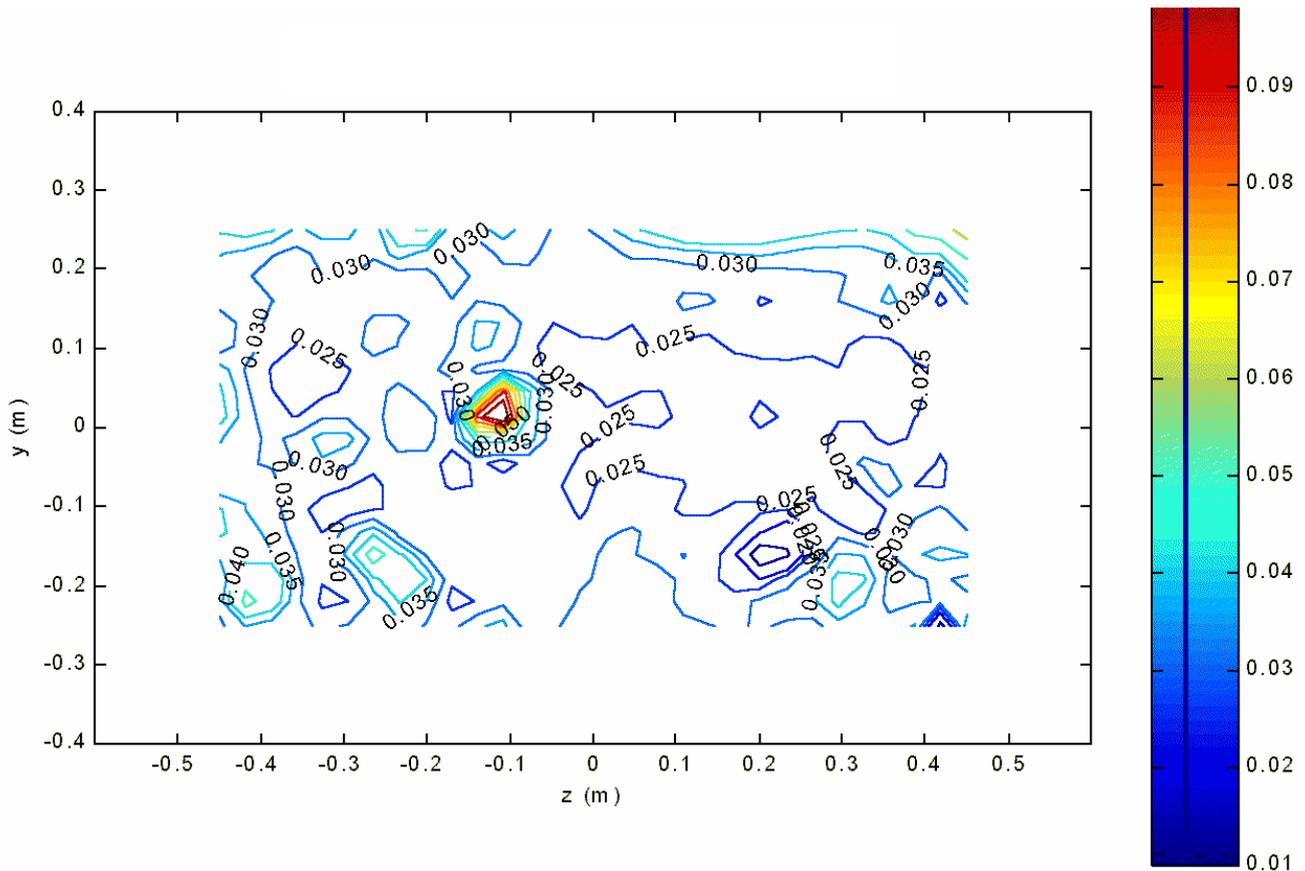


Figura 6.2.4.5 Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal I_u (%), $U = 25\text{m/s}$

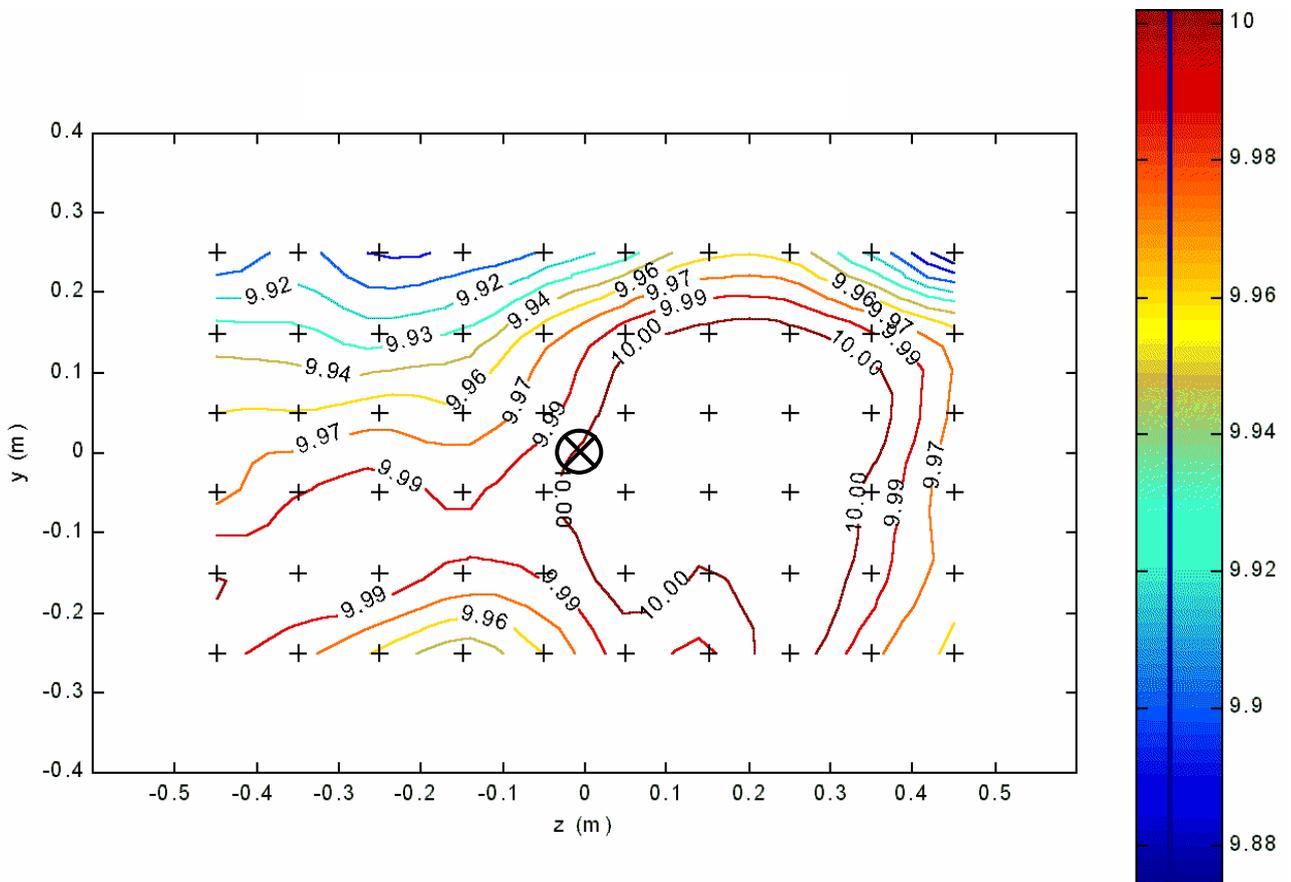


Figura 6.2.4.6 Distribución de velocidad media (m/s), $U = 10\text{m/s}$

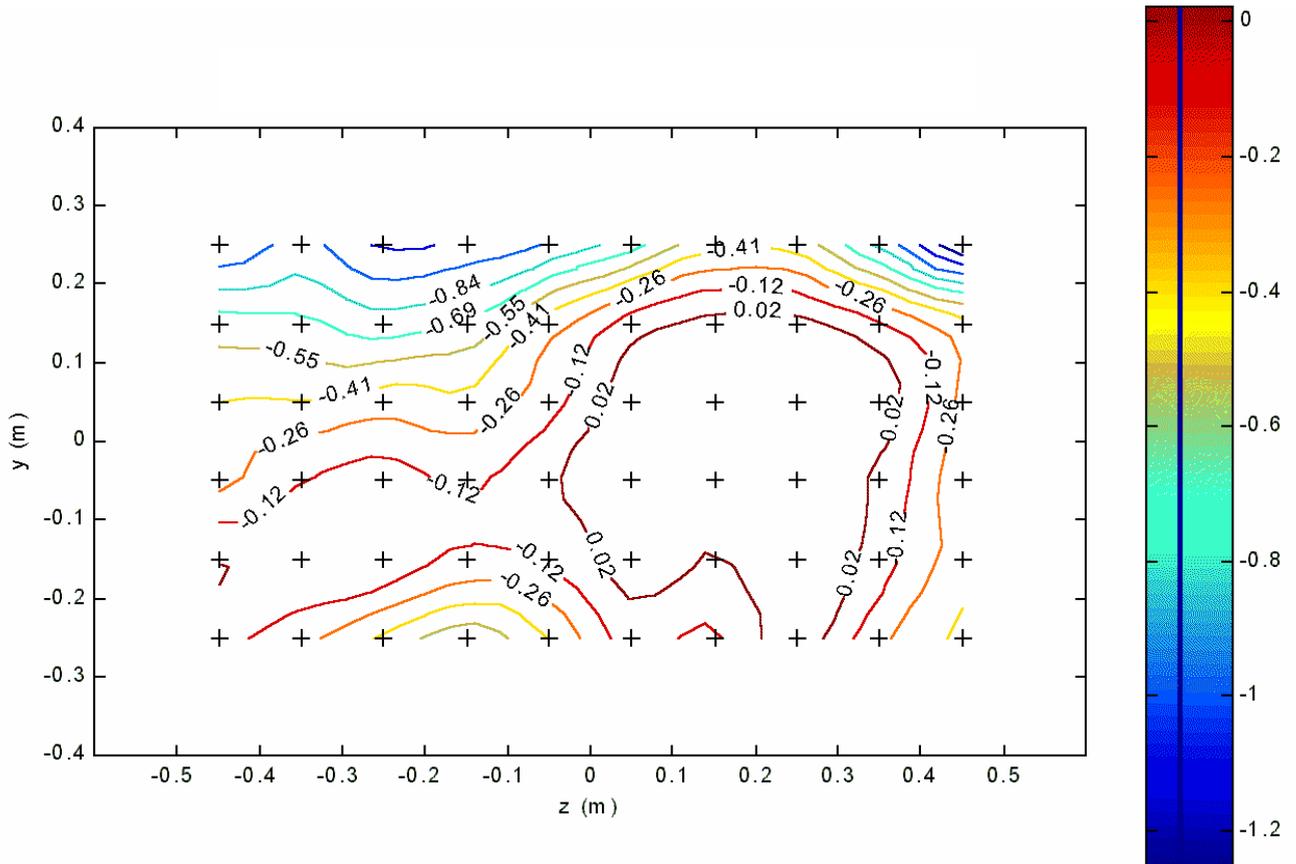


Figura 6.2.4.7 No-uniformidad de la velocidad media (%), $U = 10\text{m/s}$

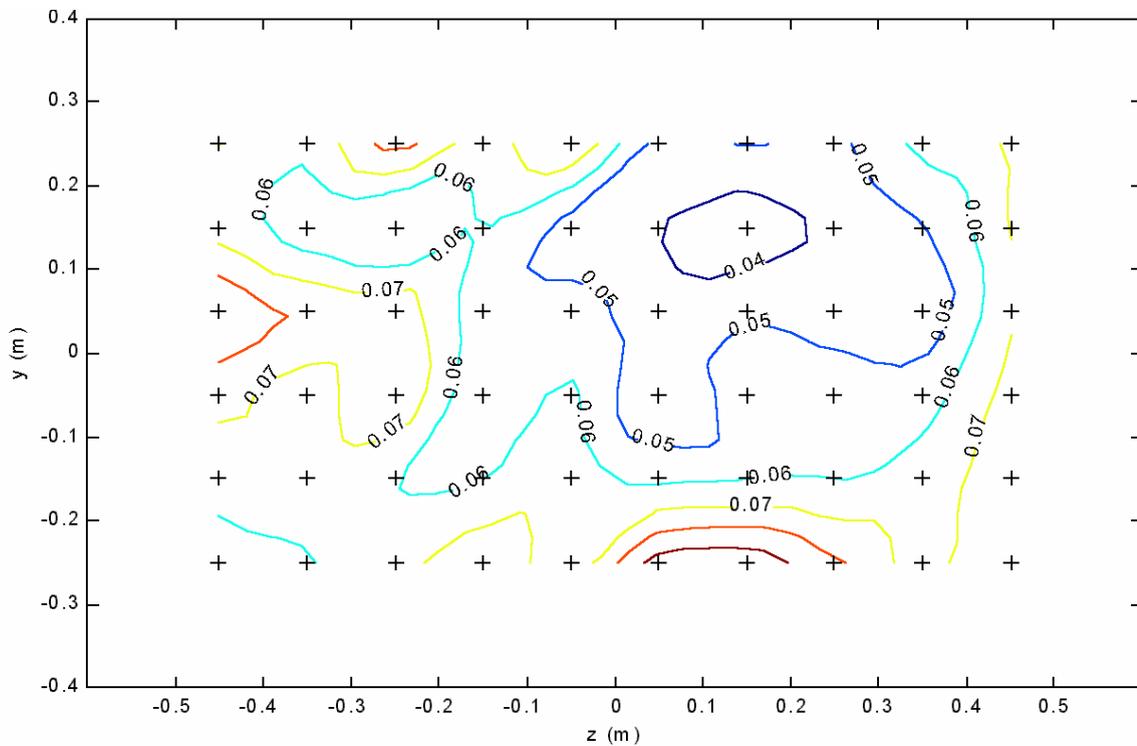


Figura 6.2.4.8 Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal I_u (%), $U = 10\text{m/s}$

Se puede observar en las Figuras 6.2.4.3, 6.2.4.4, 6.2.4.6 y 6.2.4.7 que las distribuciones de velocidad media presentan tanto a 25 como a 10m/s una región bastante amplia donde la velocidad registrada varía en menos de $\pm 0.1\%$. Esta región comprende prácticamente la mitad derecha de la sección estudiada y una pequeña zona a la izquierda de ésta. Contra el techo de la zona de trabajo se puede apreciar en ambos casos la presencia de un déficit de velocidad, más marcado en la mitad superior izquierda de las figuras. Por otra parte, en la mitad inferior izquierda se aprecia una pequeña zona más cerca del piso donde también se registra un déficit de velocidad mayor al citado. Estas características de comportamiento también fueron verificadas por una segunda medida realizada a 25m/s.

A 25m/s la velocidad media en el área estudiada correspondió a 24.91m/s, con una desviación estándar de 0.07m/s. La máxima velocidad media registrada fue 25.02m/s, mientras que la mínima correspondió a 24.65m/s. En el 90% de dicha área, la velocidad media medida fue mayor a 24.85m/s, correspondiendo a una no-uniformidad de $\pm 0.3\%$ aproximadamente respecto de la velocidad media calculada en la sección. Las no-uniformidades registradas respecto a la velocidad media en toda el área se ubicaron entre -1 y $+0.4\%$.

A 10m/s la velocidad media en el área estudiada correspondió a 9.97m/s, con una desviación estándar de 0.04m/s. La máxima velocidad media registrada fue 10.01m/s, mientras que la mínima correspondió a 9.86m/s. En el 90% de dicha área la velocidad media medida fue mayor a 9.91m/s, correspondiendo a una no-uniformidad de $\pm 0.5\%$ aproximadamente respecto de la velocidad media calculada en la sección. Las no-uniformidades registradas respecto a la velocidad media en toda el área se ubicaron entre -1.1 y $+0.45\%$.

Por otra parte, analizando las Figuras 6.2.4.5 y 6.2.4.8 se debe señalar que los niveles de intensidad de turbulencia longitudinal registrados son extremadamente bajos ubicándose en el entorno de 0.03% a 25m/s y cerca de 0.06% a 10m/s. Dichos cálculos fueron realizados sin utilizar filtros pasa-bajos ni pasa-altos. Se puede observar a grandes rasgos que las regiones con menor intensidad de turbulencia corresponden en general a regiones con mayor uniformidad en la distribución de velocidad media.

A 25m/s, la intensidad de turbulencia longitudinal promedio registrada en el área de estudio correspondió a 0.03%, con una desviación estándar de 0.01%. En el 90% del área estudiada la intensidad de turbulencia registrada fue menor a 0.04%, y en el 70%, menor a 0.03%. La región correspondiente a la mínima intensidad de turbulencia medida coincide con la región que presentaba mayor uniformidad en la velocidad media, encontrándose nuevamente algo desplazada a la derecha. Por otra parte, la máxima intensidad de turbulencia registrada correspondió a 0.1%, registrada únicamente en uno de los 240 puntos medidos, y se puede observar en la figura 6.2.4.5 señalada por una serie de curvas de nivel muy cercanas unas a otras a la izquierda de la región central de la sección. En la distribución de velocidad

media (Figura 6.2.4.3) se observa en esa misma zona una pequeña región con un déficit relativo de velocidad media, en el entorno del punto que registró la máxima intensidad de turbulencia. Se debe señalar que en la distribución de velocidad media se observa en varios puntos de medida cercanos a dicho punto un comportamiento cualitativamente diferente al encontrado en los demás puntos de medida. Los siguientes valores registrados de intensidad de turbulencia en la sección correspondieron en orden descendente a 0.065%, 0.06%, 0.055% y 0.049%, correspondiendo a puntos cercanos a los bordes.

En la Figura 6.2.4.9 se presenta la distribución de intensidad de turbulencia sin el punto que registró el máximo valor indicado, para apreciar más claramente dicha distribución en el resto de la sección.

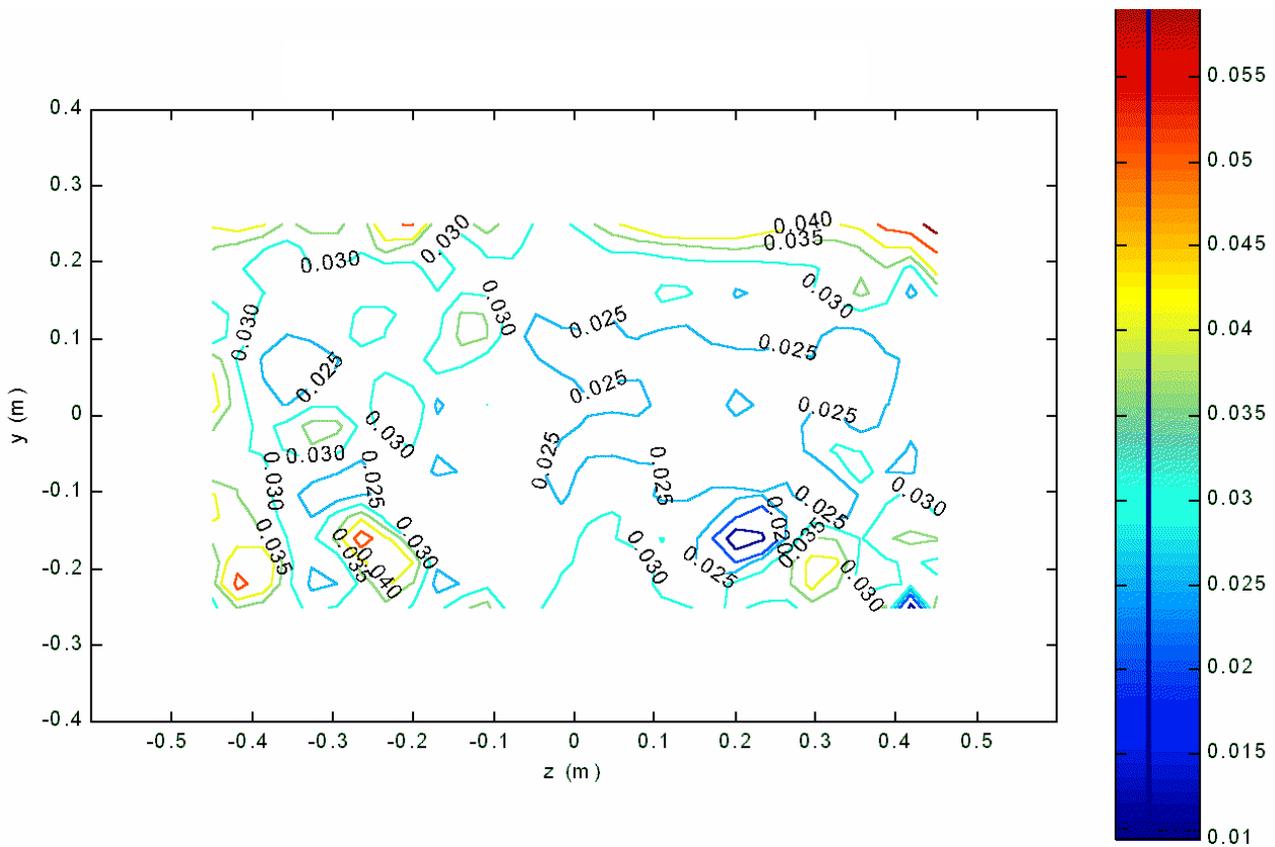


Figura 6.2.4.9 Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal I_u (%) modificada, $U = 25\text{m/s}$

A 10m/s, la intensidad de turbulencia longitudinal promedio registrada en el área de estudio correspondió a 0.06%, con una desviación estándar de 0.01%. En el 90% del área estudiada la intensidad de turbulencia registrada fue menor a 0.08%, y en el 50%, menor a 0.06%. La mayor parte de esta última región coincide con la región que presentó mayor uniformidad en la distribución de velocidad media. La máxima intensidad de turbulencia registrada fue algo menor a 0.1%, pero en este caso se registró sobre el borde del área estudiada. Se debe señalar que aunque en esta medida se utilizó una grilla de 60 puntos (en lugar de 240) que no contuvo al punto que registró la mayor intensidad de turbulencia a 25m/s, también se observa en la distribución de velocidad media (Figura 6.2.4.7) que la

región que presentó la mayor intensidad de turbulencia a 25m/s marca el comienzo de un área con mayor déficit de velocidad media.

Medidas con probeta de hilo caliente doble

Las componentes fluctuantes lateral y vertical de la velocidad se obtuvieron para velocidades de referencia de 25, 10 y 40m/s utilizando la probeta doble anteriormente descrita, en la sección de la zona de trabajo ubicada en $x = 70\text{cm}$. En todos los casos se midió en la grilla de 60 puntos ya indicada.

Nuevamente la probeta fue calibrada antes de cada serie de medidas colocándola en el interior del túnel en el punto central de la sección de estudio, con sus hilos dispuestos en un plano horizontal. Para realizar cada calibración se seleccionó un intervalo de velocidades y un intervalo de ángulos acotados por las velocidades y los ángulos esperados en la sección de medida. En todos los casos se realizó la calibración seleccionando cinco velocidades y cinco ángulos entre -1 y $+1^\circ$. Durante las calibraciones las velocidades a fijar se controlaron automáticamente y sus valores de referencia se midieron con el tubo Pitot, como en el caso anterior. Los ángulos indicados se obtuvieron variando el ángulo α del sistema de posicionamiento.

Nuevamente se fijó la frecuencia de muestreo en 1kHz durante las calibraciones y las series de medidas y se tomaron respectivamente 65536 y 131072 muestras. Debido a que la energía de las componentes fluctuantes de la señal del anemómetro se encontraba concentrada en frecuencias menores a 50Hz tampoco se utilizó filtro durante las medidas.

La relación entre el módulo y la dirección, respecto del cuerpo de la probeta, de la componente de la velocidad perteneciente al plano definido por los hilos de la misma, por un lado, y las tensiones de salida correspondientes a cada hilo de la probeta, E_1 y E_2 , medidas por el anemómetro, por otro, se modeló utilizando polinomios en x e y , donde $x = E_1 + E_2$ e $y = E_1 - E_2$.

El método de calibración utilizado es similar al método presentado en Bruun, 1995 en el apartado 5.4.3.2, y consiste en hallar los coeficientes de los polinomios en x e y que ofrecen el mejor ajuste al módulo y dirección de las velocidades registradas durante las calibraciones (velocidades de referencia y ángulos del sistema de posicionamiento). Luego, durante las series de medidas se utilizó la suma y la resta de las tensiones medidas E_1 y E_2 en cada muestra N_i para calcular $U(N_i)$, la velocidad longitudinal correspondiente a la muestra N_i , y $V(N_i)$, la velocidad lateral o $W(N_i)$, la velocidad vertical, según si los hilos de la probeta se habían posicionado en un plano horizontal o vertical, respectivamente. A partir de las series temporales $V(N_i)$ y $W(N_i)$ obtenidas se calcularon entonces las componentes fluctuantes v' y w' , respectivamente.

A continuación se presentan las distribuciones de la intensidad de turbulencia asociada a las componentes fluctuantes v' y w' medidas en la sección de la zona de trabajo a 25, 10 y 40m/s.

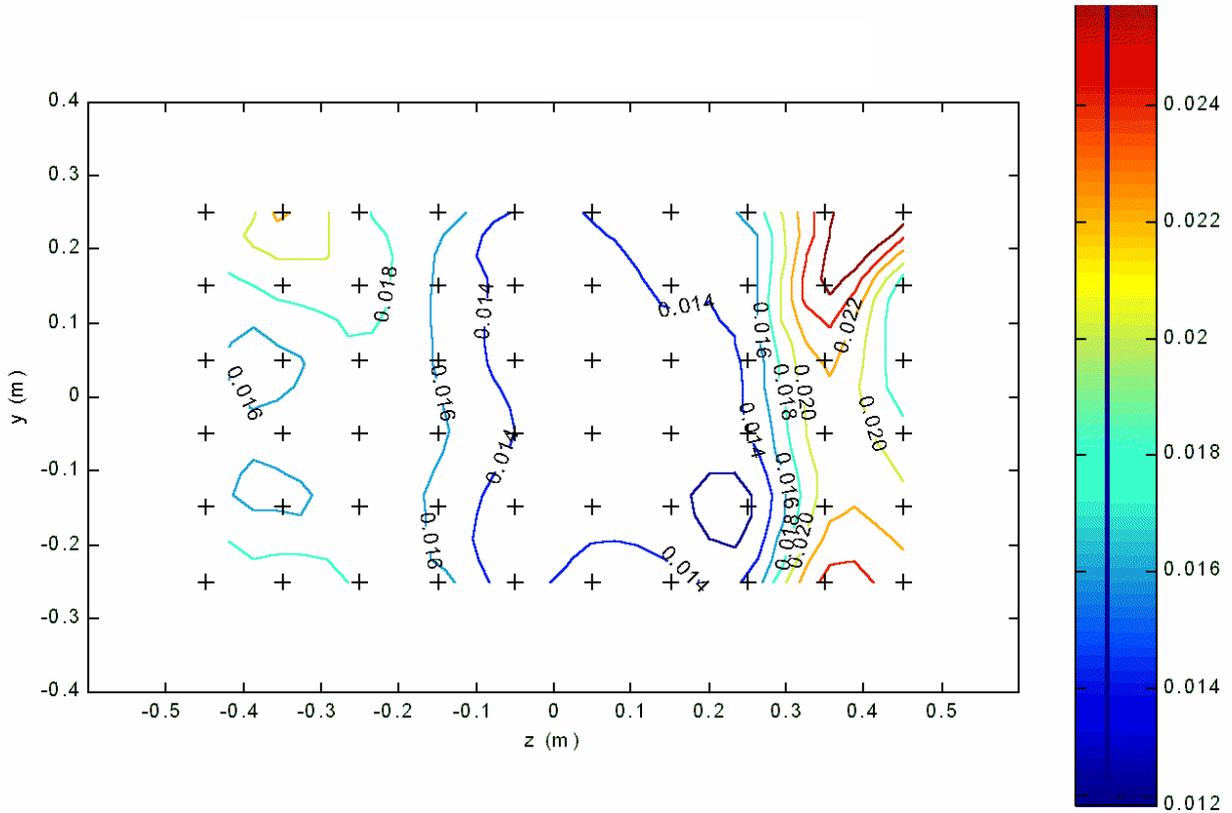


Figura 6.2.4.10 Distribución de intensidad de turbulencia lateral I_v (%), $U = 25\text{m/s}$

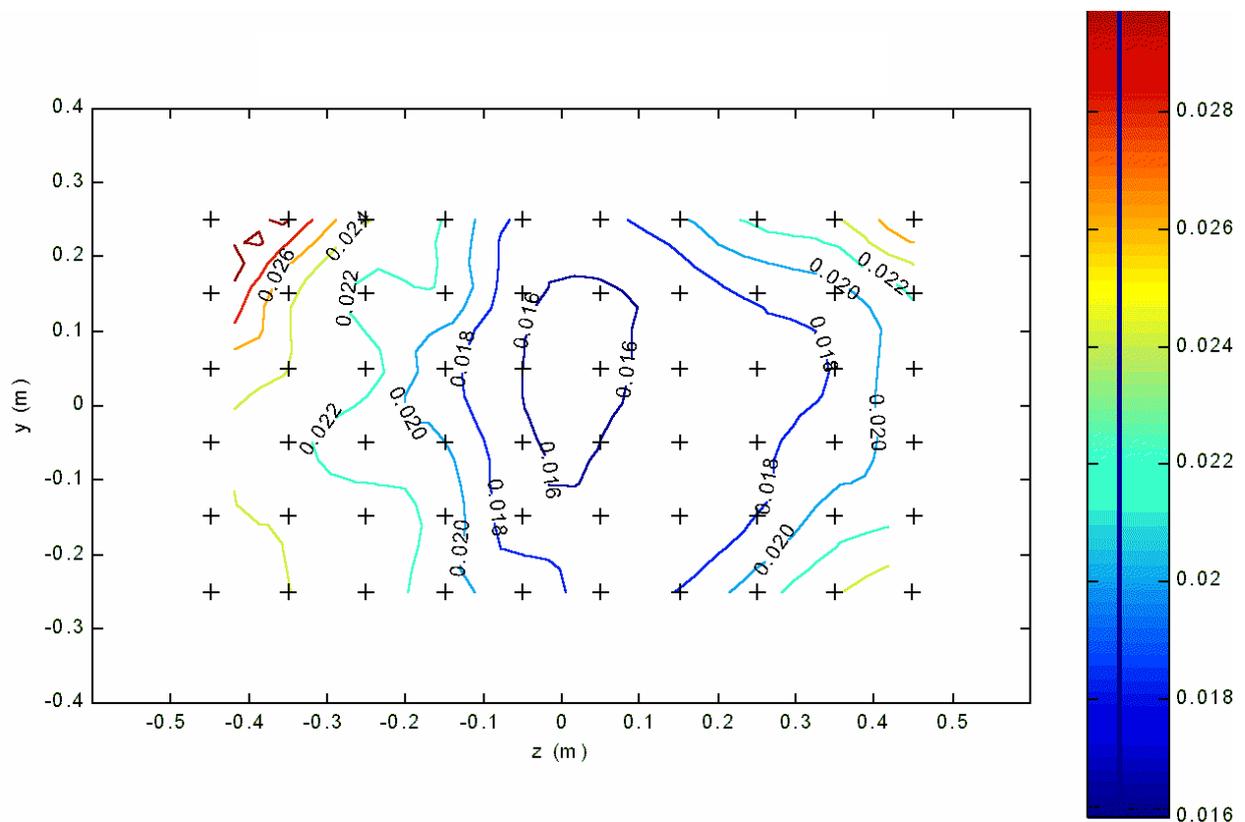


Figura 6.2.4.11 Distribución de intensidad de turbulencia vertical I_w (%), $U = 25\text{m/s}$

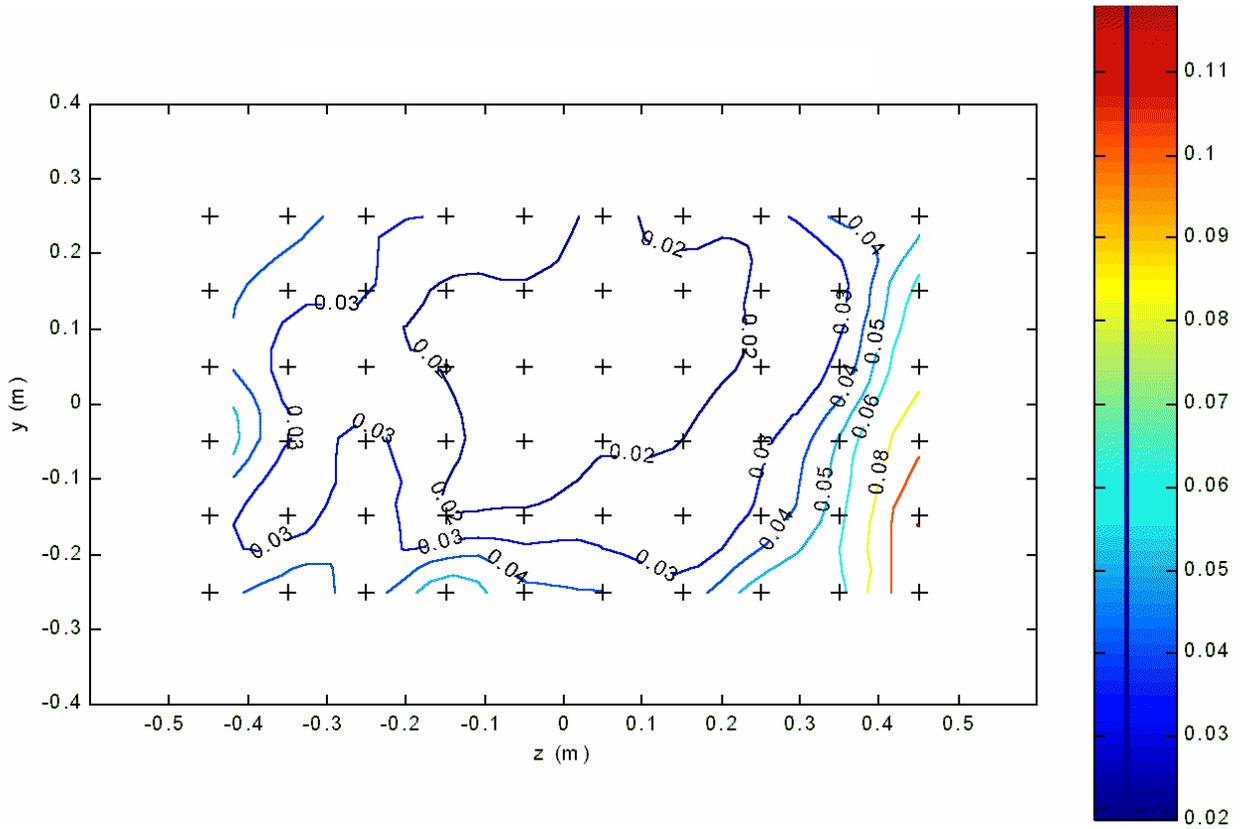


Figura 6.2.4.12 Distribución de intensidad de turbulencia lateral I_v (%), $U = 10\text{m/s}$

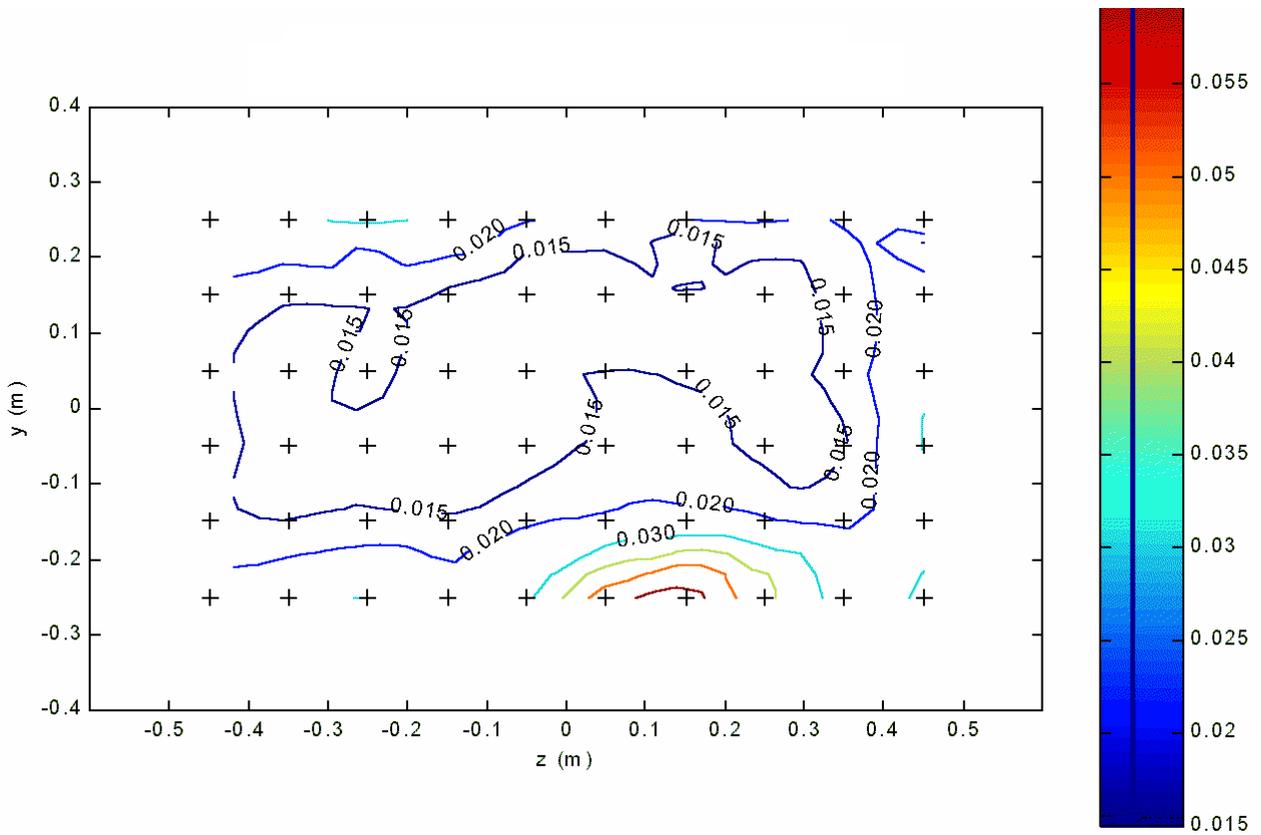


Figura 6.2.4.13 Distribución de intensidad de turbulencia vertical I_w (%), $U = 10\text{m/s}$

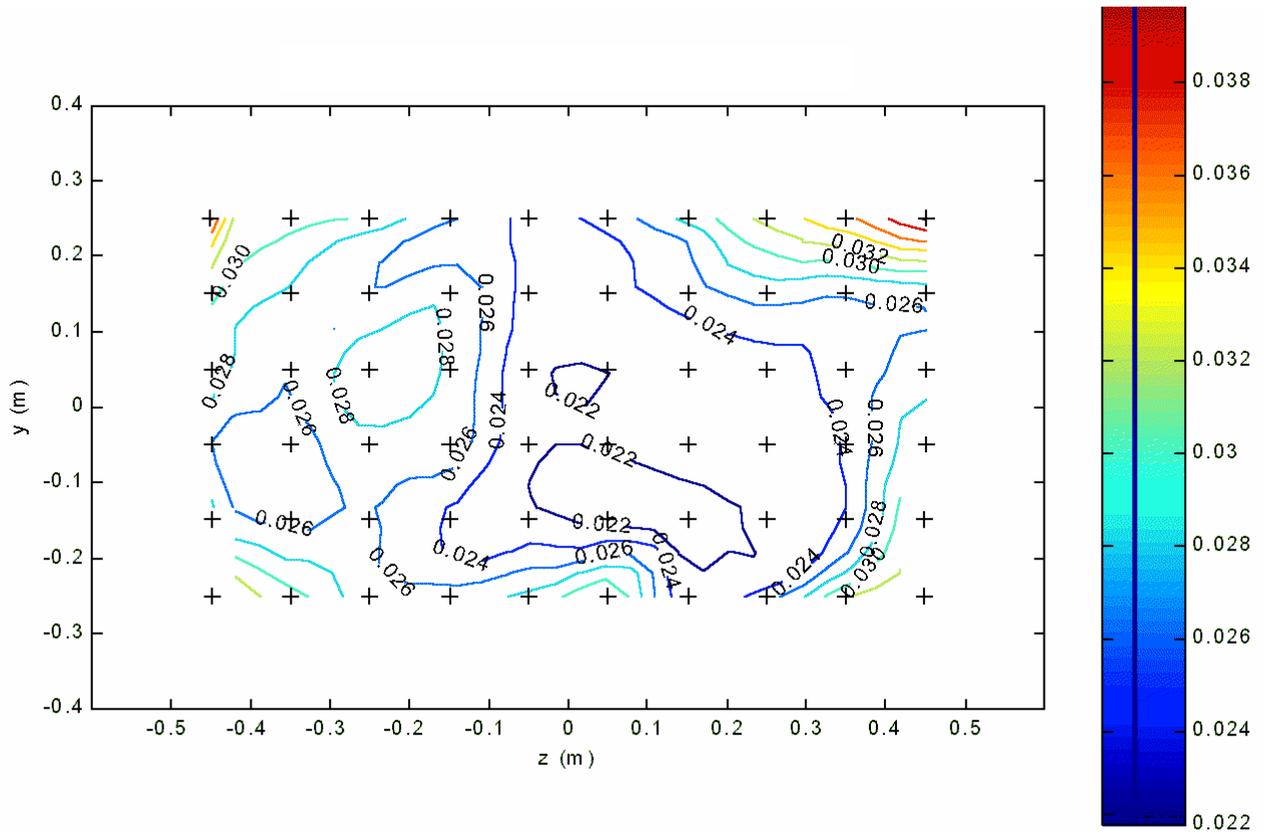


Figura 6.2.4.14 Distribución de intensidad de turbulencia lateral I_v (%), $U = 40\text{m/s}$

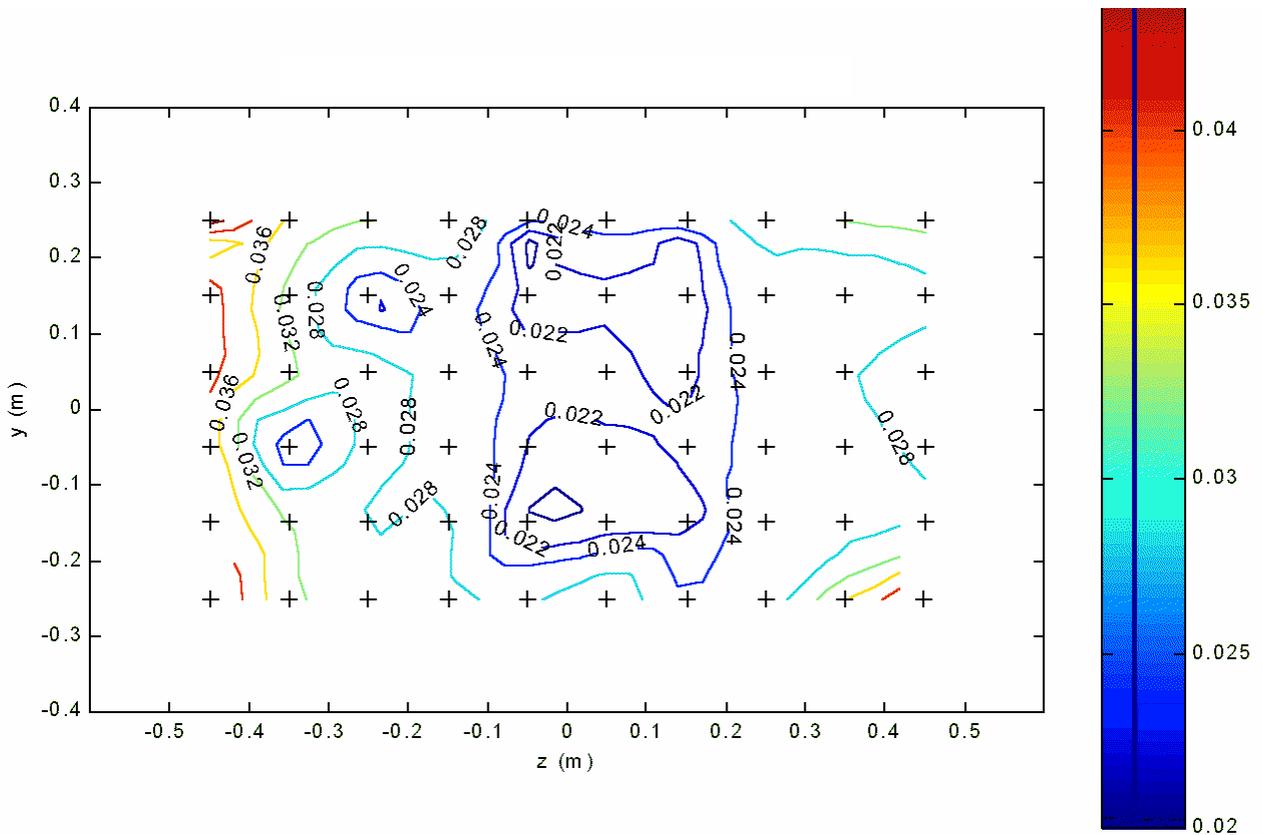


Figura 6.2.4.14 Distribución de intensidad de turbulencia vertical I_w (%), $U = 40\text{m/s}$

Como se puede apreciar en las figuras indicadas, las intensidades de turbulencia lateral y vertical registradas fueron menores en general a 0.04%, excepto a 10m/s donde se midieron valores mayores en los bordes de la sección estudiada, principalmente alrededor del ángulo inferior derecho. En esa región, la componente lateral de la turbulencia presenta valores de intensidad de turbulencia de hasta 0.12%, mientras que la componente vertical alcanza un valor de 0.06%. En todas las distribuciones presentadas se puede observar una región central de menor intensidad de turbulencia, generalmente desplazada a la derecha, nuevamente, y mayores niveles de intensidad de turbulencia cerca de los bordes de la sección estudiada. También se puede observar que la región de menor intensidad de turbulencia vertical aumenta al aumentar la velocidad de referencia, no habiendo una tendencia clara para la intensidad de turbulencia lateral.

Adicionalmente se calcularon las correlaciones entre las componentes fluctuantes registradas en cada serie de medidas, es decir $\overline{u'v'}$ y $\overline{u'w'}$. En todos los casos se pudo comprobar que dichas correlaciones eran menores a $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Conclusiones

De las medidas realizadas con el anemómetro de hilo caliente se puede afirmar que el flujo en la zona de trabajo del túnel de viento MTL presenta niveles de intensidad de turbulencia excepcionalmente bajos. En particular, la intensidad de turbulencia longitudinal registrada fue del orden de 0.03% a 25m/s y de 0.06% a 10m/s y los promedios en la sección para las intensidades de turbulencia lateral y vertical tomaron valores entre 0.015 y 0.03%, salvo a 10m/s donde el promedio de la intensidad de turbulencia lateral en la sección aumentó a 0.04%. En todos los casos se puede identificar una región de menor intensidad de turbulencia generalmente desplazada levemente hacia el lado derecho de la sección. En el caso de la intensidad de turbulencia lateral, se puede observar una región a la derecha de esta última que registra los valores más altos de I_v tanto para 25m/s como para 10 y 40m/s. En cuanto a la intensidad de turbulencia vertical, se puede identificar regiones con mayores niveles de intensidad de turbulencia en las regiones cercanas a las esquinas, nuevamente para las tres velocidades.

Por otra parte se pudo verificar una baja no-uniformidad en la distribución de velocidad del flujo, que se encuentra comprendida aproximadamente entre -1 y $+0.5\%$ respecto de la velocidad media en la sección, tanto a 25 como a 10m/s. La zona con mayor déficit de velocidad se ubica sobre el lado izquierdo de la sección, especialmente en la región superior. A ambas velocidades se registra mayor uniformidad en la región derecha de la sección. En ella se midieron las mayores velocidades registradas, cercanas a la velocidad de referencia correspondiente. Esta región también se corresponde con la región de menor intensidad de turbulencia longitudinal.

Se puede decir que en general todas las medidas realizadas mostraron patrones similares

en cuanto a la distribución de intensidad de turbulencia y uniformidad del flujo: una zona central con un flujo de mayor calidad, generalmente desplazada hacia la derecha de la sección, y bordes y en particular esquinas donde se obtuvieron mayores no-uniformidades y niveles de intensidad de turbulencia en las tres componentes fluctuantes, como era de esperar. La zona central de mayor calidad de flujo generalmente aumenta su tamaño al aumentar la velocidad, al comparar variaciones relativas de los parámetros estudiados.

Se desea mencionar que la autora cree que el valor de intensidad de turbulencia longitudinal cercano al 0.1% registrado en la medida a 25m/s seguramente corresponda a alguna irregularidad del flujo localizada en una pequeña región. La región correspondiente a ese valor de intensidad de turbulencia ocuparía un área menor a unos pocos centímetros cuadrados y aunque sólo se observó cuando se utilizó la grilla de 240 puntos en la medida a 25m/s, se observa que su ubicación en general coincide con regiones donde la calidad del flujo comienza a disminuir. Esto se observa a distintas velocidades en las distribuciones de intensidad de turbulencia longitudinal y lateral y en las distribuciones de velocidad media principalmente.

Johansson, 1992 presenta resultados de medidas de intensidades de turbulencia longitudinal y vertical a 25m/s e indica que se obtuvieron resultados análogos para una velocidad de 50m/s. Los resultados obtenidos durante el presente estudio son similares a los indicados en Johansson, 1992, tal como se discute a continuación. La intensidad de turbulencia longitudinal obtenida durante ese estudio fue menor a 0.03%, mientras que en la presente investigación se obtuvieron valores prácticamente menores a 0.04% para 25m/s. En Johansson, 1992 también se citan valores de intensidad de turbulencia longitudinal menores a 0.015% en una región central de la sección estudiada, mientras que en este caso se obtuvieron valores cercanos a 0.025%. Por otra parte, la intensidad de turbulencia vertical medida en Johansson, 1992 fue menor a 0.02% en una región central de la sección estudiada, valor similar a los obtenidos durante este estudio. En ese caso se indicó que en una región que coincidía con una de las juntas del panel de abejas se alcanzaban valores cercanos a 0.06%. Durante este estudio no se alcanzaron intensidades de turbulencia mayores a 0.04%, aunque ambos valores máximos son similares. Cabe mencionar que durante el estudio presentado en Johansson, 1992, se consideró para el cálculo de las intensidades de turbulencia únicamente a las componentes fluctuantes de la velocidad cuyas escalas se encontraban comprendidas entre 2.5mm y 2.5m, para no considerar fluctuaciones de la velocidad debidas a ondas estacionarias entre esquinas. El procesamiento de la señal realizado disminuyó mayormente a las intensidades de turbulencia longitudinal calculadas. Durante el presente estudio no se utilizó ningún tipo de filtro pasa-bajos ni pasa-altos y esto puede explicar los valores levemente mayores de intensidad de turbulencia longitudinal obtenidos.

También se debe señalar que en Johansson, 1992 no se presentaron resultados de la distribución de velocidad media en la sección, por lo que no fue posible realizar comparaciones de este parámetro.

6.3 Conclusiones

A partir de las medidas realizadas durante la presente investigación, las cuales fueron presentadas en los apartados 6.2.1 a 6.2.4, se puede concluir que el túnel de viento MTL presenta características notables en cuanto a sus bajos niveles de intensidades de turbulencia y una alta uniformidad en sus distribuciones de presión total, dirección del flujo, temperatura y velocidad media.

A modo de resumen se repasan a continuación sus características principales:

- o Presión total: variaciones temporales menores a $\pm 0.1\%$ y espaciales menores a $\pm 0.05\%$
- o Dirección del flujo: ángulos menores a 0.2° respecto al eje del túnel
- o Temperatura: variaciones temporales y espaciales menores a $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ($\pm 0.08^\circ\text{C}$ en la sección a 40m/s)
- o Velocidad media: variaciones temporales menores a $\pm 0.05\%$ y espaciales entre -1 y 0.5%
- o Componentes fluctuantes: menores en general a 0.04% a 25 y a 40m/s y a 0.1% a 10m/s

Así mismo, se encontraron similitudes entre las distribuciones de algunos parámetros relevados, en particular entre las distribuciones de presión, apartado 6.2.1, de dirección del flujo, apartado 6.2.3, y de velocidad media e intensidades de turbulencia, apartado 6.2.4. Por ejemplo, la región que presentó mayor uniformidad en la distribución de presión total en la Figura 6.2.1.8 coincidió con la región que presentó mayor uniformidad en la velocidad media en la Figura 6.2.4.4 como era de esperarse, y a la vez menores ángulos de flujo (Figura 6.2.2.2) y niveles de intensidades de turbulencia (Figura 6.2.4.9). Esta región se corresponde con la región que presentó mayores velocidades medias en la sección estudiada, Figura 6.2.4.3. Las regiones con mayor déficit de velocidad media presentaron en general mayores niveles de intensidad de turbulencia longitudinal, como se puede observar si se comparan las Figuras 6.2.4.4 y 6.2.4.9 o las Figuras 6.2.4.7 y 6.2.4.8. Por otra parte, la región que presentó menor presión total en la Figura 6.2.1.8, ubicada sobre el borde derecho de la sección estudiada, es similar a la que presenta mayor nivel de intensidad de turbulencia lateral, Figura 6.2.4.10.

Sin embargo, se debe recordar que a partir de los resultados presentados en 6.2.1 se esperaban velocidades medias mayores sobre la región izquierda de la sección estudiada si se suponía una distribución de presión estática uniforme en la sección, pero en 6.2.4 se observó que en esa región se registraron velocidades menores. Esto indicaría una distribución de presión estática no uniforme, con presiones estáticas mayores sobre la región izquierda de la sección. Si a la entrada al sistema de control de turbulencia del túnel la velocidad media presentara no-uniformidades cualitativamente similares a las indicadas en las Figuras 6.2.4.4 y 6.2.4.7, se tendrían pérdidas de carga menores sobre la región izquierda de la sección, dando lugar a mayores presiones estáticas y eventualmente se podría llegar a registrar presiones totales mayores, tal como ocurrió. De todas maneras, en este razonamiento la distribución de

presión estática a la entrada al sistema de control de turbulencia debería ser relativamente uniforme o presentar una región con mayores valores sobre la región izquierda.

En general se puede decir que se tiene una zona central con un flujo de mayor calidad, es decir, menores niveles de intensidades de turbulencia, mayor uniformidad en las distribuciones de velocidad media y presión total y menores ángulos del flujo, y bordes y en particular esquinas donde las no-uniformidades y niveles de intensidad de turbulencia aumentan, aunque en todos los casos estos parámetros se mantienen por debajo de valores muy pequeños. Las variaciones temporales de los parámetros estudiados son también excepcionalmente bajos.

Las variaciones temporales y espaciales encontradas durante este estudio son en general similares a las presentadas en Johansson, 1992, indicando que el funcionamiento del túnel no se ha visto afectado con el correr de los años. Por ejemplo, las variaciones espaciales máximas encontradas para la presión total en 6.2.1 son similares e incluso algo menores a las presentadas en Johansson, 1992. Esto indica que el estado general del sistema de control de la turbulencia, por ejemplo, no ha sufrido cambios apreciables. Por otra parte, la metodología de medida utilizada en la investigación actual puede haber mejorado los resultados obtenidos en este caso. Así mismo, las variaciones espaciales máximas de temperatura en ambos estudios son similares. La variación temporal que se tiene actualmente de este parámetro es del orden de cuatro veces menor a la anterior debido a mejoras realizadas en el control del sistema de enfriamiento del túnel de viento. En cuanto a los valores de intensidad de turbulencia medidos, en el presente estudio se obtuvieron valores similares aunque levemente mayores a los medidos anteriormente. Se estima que esto se debe al procesamiento posterior que se realizó a la señal de velocidad en el primer estudio realizado, que afecta de manera más importante a la intensidad de turbulencia longitudinal.

Las mayores diferencias encontradas correspondieron a la distribución cualitativa y a los valores de la desviación angular del flujo presentada en 6.2.3, que fueron del orden del doble de las encontradas anteriormente aunque de todas maneras presentaron valores muy bajos. Esta diferencia seguramente se encuentre relacionada con el posicionamiento de las paredes de la zona de trabajo del túnel y a la apertura de la ranura superior al exterior, que anteriormente se encontraba cerrada.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se puede afirmar sin lugar a dudas que el túnel de viento MTL posee un flujo con una no-uniformidad muy baja en sus distribuciones de presión total, dirección del flujo y temperatura y niveles de intensidad de turbulencia que justifican plenamente su nombre, "Minimum Turbulence Level".

7. Túnel de viento de la Facultad de Ingeniería, Montevideo

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República contaba ya desde la década del '50 con un túnel de viento para realizar estudios vinculados a la Capa Límite Atmosférica (CLA). En este túnel se llevó adelante una serie de trabajos relevantes, tales como la Evaluación del Potencial Eólico Nacional, que tuvo lugar entre 1988 y 1990. Sin embargo, los trabajos realizados en él comenzaron a verse acotados por las dimensiones y la velocidad máxima alcanzable en la zona de trabajo del mismo.

Por esta razón se decidió diseñar y construir un nuevo túnel de viento tipo CLA, de mayores dimensiones y velocidad, proyecto que se realizó entre 1994 y 1996. Este nuevo túnel fue diseñado principalmente para estudiar problemas relacionados a la Ingeniería del Viento y a la Energía Eólica mediante la utilización de modelos físicos. Dentro de sus aplicaciones principales se encuentra, por un lado, la descripción del efecto de obstáculos no aerodinámicos sobre el viento, que permite diseñar sistemas de protección frente a la acción del viento de recintos abiertos (plazas, parques, áreas de tránsito cercanas a edificios altos), cultivos o quintas frutales, seleccionar sitios de interés para la explotación del recurso eólico o corregir medidas de velocidad de viento afectadas por el entorno cercano y, por otro, el estudio del efecto del viento sobre obstáculos, para describir el campo de presiones, esfuerzos o deformaciones de distintos tipos de estructuras debidos al viento. Este túnel también se utiliza para calibrar medidores de velocidad de aire de uso meteorológico e industrial.

En un túnel de viento tipo CLA se debe verificar la calidad del flujo en la zona de trabajo del túnel, con ésta vacía, y la posibilidad de obtener flujos que reproduzcan a una escala seleccionada el viento atmosférico mediante la utilización de algún sistema de simulación adecuado. Con esos objetivos la autora realizó tareas de investigación en esta instalación, como parte de sus actividades de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada.

En este trabajo se recogen las medidas realizadas para evaluar la distribución de velocidad media e intensidad de turbulencia longitudinal del flujo en la zona de trabajo vacía del túnel y las características de la simulación física de tres flujos tipo CLA a escala 1/400.

7.1 Descripción del túnel de viento

El túnel de viento de la Facultad de Ingeniería es un túnel de viento tipo CLA de circuito abierto en succión, con una zona de trabajo de 17m de longitud, 2.25m de ancho y 1.80m de alto a su entrada, y velocidad regulable hasta 30m/s. Este túnel opera en un local especialmente construido de 47m de longitud, 15m de ancho y 6m de altura. Debido a sus aplicaciones principales, el diseño del túnel buscó, además de minimizar las pérdidas de carga, obtener en sus condiciones de diseño un flujo a la entrada a la zona de trabajo con una intensidad de turbulencia menor al 0.5% y una no-uniformidad de la velocidad media menor al 2 a 4%, para una velocidad en la zona de trabajo de 30m/s. En Cataldo y Durañona, 1995, 1996 y 1998 se

presenta el diseño aerodinámico y constructivo de esta instalación. En la Figura 7.1.1 se indican sus componentes principales.

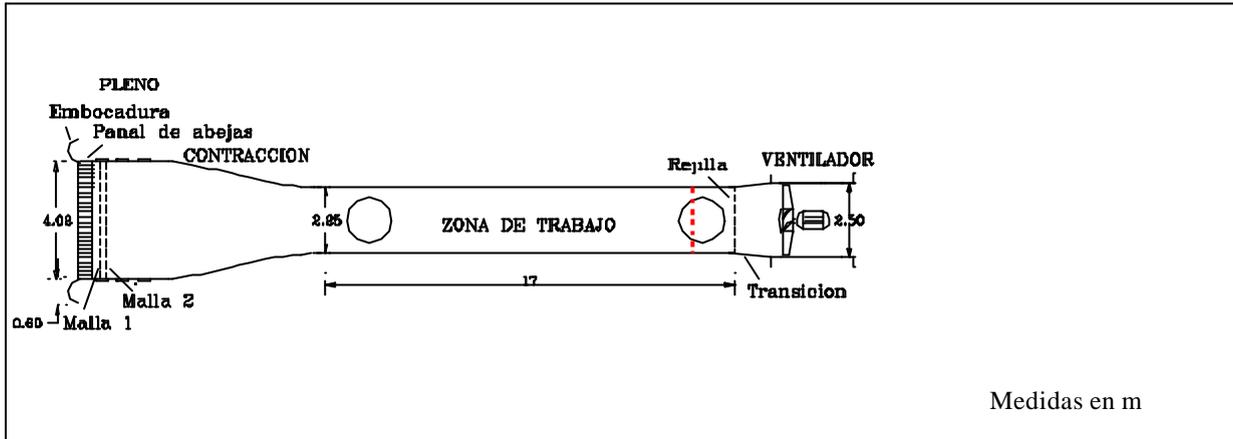


Figura 7.1.1 Diagrama del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería

El ingreso del flujo al interior del túnel se realiza a través de una embocadura especialmente diseñada para conducir a éste al pleno sin asimetrías ni desprendimientos de capa límite. En el pleno, de sección cuadrada, se tiene un sistema de control de turbulencia y no-uniformidad del flujo que consiste en un panel de abejas y un conjunto de hasta seis mallas intercambiables. Las características de las dos mallas instaladas durante la presente investigación se presentan en la Tabla 7.1.1. Luego del pleno, una contracción 4 a 1 diseñada para no generar desprendimientos de capa límite, guía al flujo hacia la zona de trabajo. En ésta se tienen dos mesas giratorias de 2m de diámetro. Debido a las aplicaciones principales de este túnel, la longitud de la zona de trabajo se seleccionó de manera de poder desarrollar flujos tipo CLA y utilizar la segunda mesa giratoria para tales estudios, mientras que en la primera se pueden realizar adicionalmente ensayos aerodinámicos. La altura del techo de la zona de trabajo es de 1.80m a su entrada y 2.10m a su salida, y puede regularse a lo largo de la misma para controlar el gradiente de presiones. El ventilador del túnel, movido por un motor de corriente alterna de 750rpm nominales y 90kW, es de tipo axial. Su velocidad de giro es controlada mediante un variador de frecuencia. En la Figura 7.1.2 se muestra una fotografía del túnel de viento tomada desde el extremo corriente abajo del edificio.

Malla	Paso (mm)	Diámetro del hilo (mm)	Solidez (%)
1	5.4	1	33.6
2	4.2	0.9	38.3

Tabla 7.1.1 Características de las mallas del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería

En los siguientes capítulos se presentan los resultados obtenidos al realizar una primer evaluación del funcionamiento de este túnel. En Durañona & Cataldo, 1999 se realizó una presentación preliminar de algunos de estos resultados.



Figura 7.1.2 Imagen del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería

7.2 Evaluación de las características del flujo en la zona de trabajo

Las características del flujo en la zona de trabajo del túnel se evaluaron en la sección ubicada 60cm corriente arriba del centro de la segunda mesa giratoria, la cual se indica con una línea punteada en rojo en la Figura 7.1.1. Esta sección se encuentra 14m corriente abajo del comienzo de la zona de trabajo y es representativa de la posición donde se instalan los modelos para realizar ensayos vinculados a la CLA. En ella se realizaron medidas de velocidad con la zona de trabajo del túnel vacía y con sistemas de simulación instalados a lo largo de la misma para modelar tres flujos atmosféricos diferentes, para una velocidad de referencia cercana a 15m/s en todos los casos.

Las medidas de velocidad en la sección se realizaron con un anemómetro de hilo/lámina caliente de temperatura constante TSI, modelo IFA 100 y probetas simples de TSI, modelo 1210-20, con sensores de lámina (film) de platino de $50.8\mu\text{m}$ de diámetro y 1.02mm de longitud. Dicho anemómetro posee un filtro y un acondicionador de señal interno. Las medidas de velocidad se adquirieron, procesaron y grabaron mediante el sistema de adquisición A/D y de procesamiento de datos Lab Windows/CVI de National Instruments y una tarjeta convertidora A/D modelo Lab PC++ de National Instruments. En todos los puntos de medida se tomaron 65535 muestras de la tensión de salida del anemómetro con una frecuencia de 500Hz (tiempo de muestreo de 131^{s}). La velocidad media e intensidad de turbulencia longitudinal se calculó a partir del promedio y la desviación estándar de estas series temporales, utilizando las relaciones que se presentan en el Capítulo 8 y la temperatura del aire se midió mediante una termorresistencia ubicada cerca de la sección de medida. Durante estas medidas el filtro pasa-bajos del anemómetro se fijó en 2 kHz.

Durante la evaluación de los tres flujos tipo CLA se realizaron medidas adicionales en puntos seleccionados para calcular el espectro de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. En estos puntos se obtuvo el espectro en dos tramos mediante el método sugerido en Farell & Iyengar, 1994, de manera de lograr una descripción detallada del mismo tanto a frecuencias bajas como a altas. Este análisis se realizó a partir de las series temporales de las señales de tensión adquiridas mediante el programa Lab Windows/CVI, tal como se describe a continuación. Las bajas frecuencias se analizaron realizando muestreos a 1kHz, con el filtro pasa-bajos del anemómetro a 500Hz para evitar efectos de “aliasing”. Las frecuencias mayores se analizaron realizando muestreos a 4kHz con el filtro a 2kHz. En ambos casos se tomaron 65535 muestras, lo que correspondió a tiempos de muestreo de 65.5^s y 16.4^s de duración, respectivamente. Cada serie de medidas se dividió en 32 sub-series consecutivas para disminuir la varianza del espectro calculado. A partir del procesamiento de ambas series de medidas se obtuvo dos espectros para cada punto de medida y el espectro final se obtuvo uniendo estos en el punto correspondiente a una frecuencia de 100Hz. Durante las medidas el espectro fue obtenido además en tiempo real mediante un analizador de espectro Hewlett-Packard modelo 3582A.

Al describir con mayor detalle el espectro de potencia de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad se pudo utilizar los métodos indicados en 5.2 para calcular con menor error la escala integral longitudinal de las fluctuaciones turbulentas, L_u^x , en los punto de medida de interés. Para hallar el pico espectral se graficó en escala logarítmica el espectro adimensionado obtenido para cada punto y el pico espectral se identificó con ayuda de las rectas de pendiente 1 y $-2/3$. En el segundo método, se halló directamente el valor del espectro $S(f)$ en $f = 0\text{Hz}$.

Las probetas de lámina caliente utilizadas se calibraron fuera del túnel utilizando el calibrador TSI modelo 1125 y luego se posicionaron en el interior de la zona de trabajo mediante un sistema especialmente construido para tal fin. Este sistema consistía en una barra vertical ubicada corriente abajo de la sección de estudio, cuyo movimiento vertical se lograba mediante una cremallera. En un brazo solidario a la misma se sujetaba la lanceta del anemómetro y en el extremo de ésta se colocaba la probeta, la que terminaba posicionada en la sección de estudio.

Se debe señalar que el túnel de viento posee actualmente un sistema de posicionamiento de instrumentos de cinco grados de libertad, el cual es comandado desde una computadora, pero durante la realización de las medidas presentadas en este trabajo aun no se encontraba instalado en el túnel.

La velocidad de giro del ventilador se fijó utilizando el variador de frecuencia y la velocidad de referencia en la zona de trabajo se registró con un tubo Pitot instalado cerca de la sección de estudio y un equipo Scanivalve. El muestreo de esta señal se realizó utilizando el

programa LabWindows/CVI con una frecuencia de 300Hz y se tomaron 18000 muestras (tiempo de muestreo de 1min) para calcular la velocidad de referencia.

Durante las medidas realizadas el techo de la zona de trabajo presentaba una pendiente constante a lo largo de la misma.

7.2.1 Zona de trabajo vacía

En este Capítulo se presentan las medidas realizadas para evaluar las características del flujo que se desarrolla con la zona de trabajo del túnel vacía. Su objetivo consistió en caracterizar la distribución de velocidad media e intensidad de turbulencia longitudinal para verificar las condiciones de diseño de la instalación.

En túneles de viento tipo CLA interesa contar con flujos uniformes y de bajos niveles de turbulencia, tal como se presenta en Marshall, 1985 o Bradshaw and Pankhurst, 1964, por lo que se deseaba evaluar los valores máximos de no-uniformidad en la velocidad media e intensidad de turbulencia y analizar si coincidían con los esperados para la instalación.

Las características del flujo se evaluaron realizando medidas de velocidad en la sección de estudio, en tres líneas verticales equidistantes entre sí y de las paredes laterales de la zona de trabajo del túnel. En cada una de ellas se realizaron medidas en 88 puntos para describir el flujo libre en la sección, así como para describir con mayor detalle las capas límites que se desarrollan sobre el piso y el techo de la zona de trabajo. Con esta finalidad se midió desde el piso y desde el techo de la zona de trabajo a partir de los 8 mm de distancia, primero cada 2 mm, luego cada 5, 10, 20, 50 y finalmente cada 100mm, hasta llegar a la mitad de la altura de la zona de trabajo.

A partir de las medidas realizadas en cada punto se calculó la correspondiente velocidad media, U , e intensidad de turbulencia longitudinal, I_u . Las distribuciones en altura correspondientes a cada línea de medida se muestran en las Figuras 7.2.1.1 y 7.2.1.2. La velocidad media se presenta de manera adimensionada con la velocidad de referencia, U_{ref} , medida por el tubo Pitot indicado anteriormente.

A partir de las distribuciones de velocidad media obtenidas se estimó la altura de las capas límites que se desarrollan sobre el piso y el techo de la zona de trabajo y la máxima no-uniformidad del flujo en la sección. En la Figura 7.2.1.1 se pueden identificar las capas límites mencionadas, que presentan una altura menor a los 30cm. Fuera de éstas, la máxima no-uniformidad de la velocidad media registrada en los puntos de medida fue de $\pm 2\%$.

Por otra parte, en la Figura 7.2.1.2 también se observa la influencia de las capas límites. Fuera de las mismas, la intensidad de turbulencia es cercana al 1%.

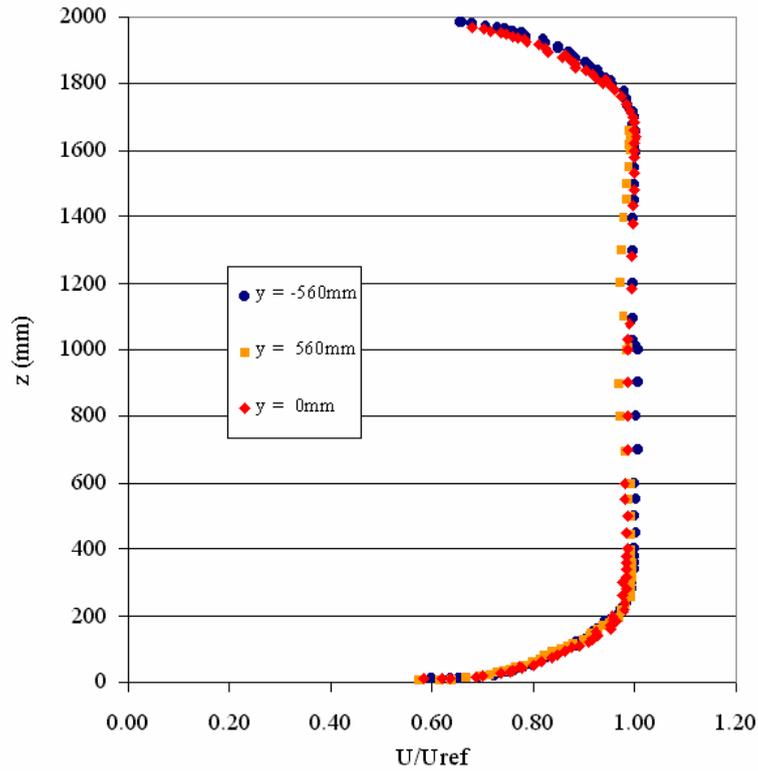


Figura 7.2.1.1 Distribución de velocidad media con zona de trabajo vacía

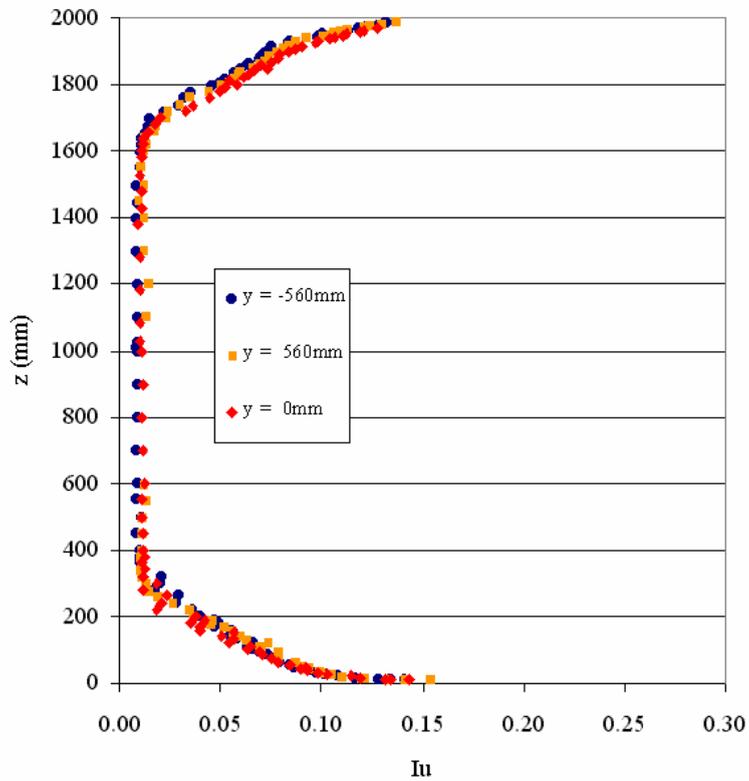


Figura 7.2.1.2 Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal con zona de trabajo vacía

Discusión

Los resultados obtenidos en una sección corriente arriba del centro de la segunda mesa giratoria de la zona de trabajo del túnel muestran un flujo al final de la zona de trabajo con una no-uniformidad máxima de $\pm 2\%$ y un nivel de intensidad de turbulencia del orden del 1% fuera de las capas límites desarrolladas sobre el piso y el techo de la zona de trabajo. La altura medida de las mismas fue menor a los 30cm.

Siguiendo los resultados presentados por Lumley and McMahon, 1967, Schubauer et al., 1948, Groth and Johansson, 1988 y Dryden and Schubauer, 1947, la intensidad de turbulencia al final de la zona de trabajo se pudo estimar en el entorno del 1% para las condiciones de medida (velocidad en la misma de 15m/s y con dos mallas instaladas en el sistema de control de turbulencia del túnel), suponiendo una intensidad de turbulencia longitudinal cercana al 15% y una escala integral de la turbulencia longitudinal del orden de 1m a la entrada a la embocadura del túnel. Este valor concuerda con los valores medidos. De la misma manera los valores medidos de no-uniformidad en la distribución de velocidad media se encuentran dentro de lo esperado. Por otra parte, la altura medida de las capas límites concuerda con lo esperado según White, 1974 para capas límites que se desarrollan sobre superficies rugosas.

Los resultados anteriores permiten afirmar que una vez colocadas las mallas restantes en el sistema de control de la turbulencia y operando el túnel a una velocidad de 30m/s se obtendrán valores cercanos a los de diseño iniciales, es decir, intensidades de turbulencia a la entrada a la zona de trabajo menores al 0.5% y no-uniformidades entre el 2 y el 4%. Estos valores habían sido estimados durante el diseño del túnel siguiendo a las referencias citadas, para el caso de operar el túnel con seis mallas instaladas en su sistema de control de turbulencia.

De cualquier manera, los valores medidos en la configuración actual del túnel ya son lo suficientemente bajos como para desarrollar flujos tipo CLA en su zona de trabajo satisfactoriamente, como se podrá verificar adicionalmente en el siguiente capítulo. Así mismo, siguiendo al boletín n°622 de la OMM se puede afirmar que el flujo en la zona de trabajo del túnel cumple también con los requisitos necesarios para calibrar anemómetros.

7.2.2 Simulación física de tres flujos tipo CLA

En este Capítulo se presenta la evaluación de las características de tres flujos tipo CLA diferentes, simulados a escala 1/400. Estos flujos debían representar al viento atmosférico hasta 160m de altura que se tiene sobre la rambla portuaria de la Bahía de Montevideo desde diferentes direcciones. En la Figura 7.2.2.1 se indican los distintos tipos de exposición al viento correspondientes a dicho sitio.

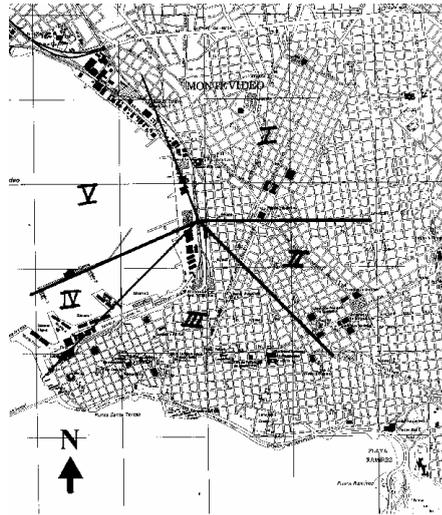


Figura 7.2.2.1. Sitio y zonas de diferente exposición al viento.

De acuerdo a los distintos tipos de exposición al viento posibles del sitio se modelaron tres flujos atmosféricos de diferentes características: un flujo atmosférico proveniente de un terreno urbano (exposición I, II y III de la figura), un flujo atmosférico proveniente de un terreno suburbano seguido por unos 2.5km de mar (exposición V) y un flujo proveniente del mar (exposición IV). En todos los casos se seleccionó una escala de simulación de 1/400.

Tal como se indicó en el capítulo 4.1, referencias como Counihan, 1975, ESDU, 1985, Simiu & Scanlan, 1986, Wang et al., 1996 o Wieringa, 1993 presentan valores de los distintos parámetros que intervienen en la distribución de velocidad media en altura en la sub-capa logarítmica y en la sub-capa potencial de un flujo tipo CLA. La siguiente tabla muestra algunos valores típicos seleccionados para los terrenos que se deseaba modelar:

Terreno	z_0 (cm)	d (m)	n
urbano	200	20	0.35
suburbano	100	10	0.22
mar	1	0	0.10

Tabla 7.2.2.1. Parámetros característicos de distintos tipos de terrenos

El flujo tipo CLA que se desarrolla cuando el viento sopla desde el terreno urbano o desde el terreno suburbano-mar indicados en la figura 7.2.2.1 se modeló utilizando el método artificial perteneciente a Cook, 1973 y que luego fuera presentado en Hunt, 1982. En la Figura 7.2.2.2 se presenta esquemáticamente el sistema de simulación correspondiente a este método. La perturbación del flujo se realizó en estos dos casos utilizando una reja, una barrera dentada y un piso rugoso. Como se indicó en 5.1, el método de Cook se recomienda para modelar el tercio inferior de la CLA, y es aplicable al caso de estudio ya que se deseaba simular flujos atmosféricos hasta una altura de 160m. La simulación tipo mar se obtuvo seleccionando únicamente un piso con la rugosidad adecuada. En los tres casos se buscó que los flujos tipo CLA desarrollados tuvieran las características esperadas en la sección de estudio indicada al comienzo de este capítulo, es decir, aquella ubicada 60cm corriente arriba del centro de la segunda mesa giratoria del túnel.

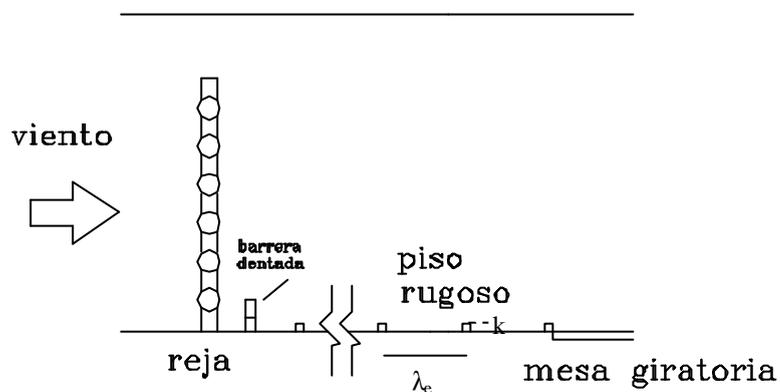


Figura 7.2.2.2 Esquema de sistema de simulación utilizado

El método de diseño de pisos rugosos utilizado en los tres tipos de exposición corresponde al presentado en Gartshore, 1973. En este caso se utilizaron barreras para diseñar los distintos pisos rugosos, tal como muestra la Figura 7.2.2.3, y las dimensiones de las mismas se estimaron de esta referencia.

El sistema de simulación para el terreno tipo urbano consistió en una reja de barras de 25mm de diámetro y 13cm de paso, colocada a una distancia de 6.25m corriente abajo del comienzo de la zona de trabajo, una barrera dentada colocada a 30cm corriente abajo de la reja, con una altura de 15cm y dientes triangulares de igual altura y base de 10cm y un piso rugoso constituido por once barreras de altura $k = 6$ cm, la primera colocada a 32.5cm de la barrera dentada y el resto espaciadas una distancia $\lambda_e = 65$ cm. La última barrera se colocó tangente al comienzo de la mesa giratoria del túnel. En la Figura 7.2.2.3 se muestra una imagen del sistema de simulación utilizado para simular este terreno. Cabe mencionar que la altura de la reja utilizada era menor que la altura total de la zona de trabajo del túnel (2m), tal como se puede observar en las Figuras 7.2.2.2. y 7.2.2.3.



Figura 7.2.2.3 Sistema de simulación para terreno urbano

El sistema de simulación utilizado para modelar la exposición suburbano-mar consistió en la reja descrita anteriormente, una barrera dentada de altura de 10cm y dientes de 75mm y la primera y novena barreras de las mencionadas anteriormente. El sistema de simulación de la exposición mar requirió únicamente una barrera de altura $k = 35\text{mm}$ al comienzo de la zona de trabajo (inmediatamente corriente abajo del final de la contracción).

Las características de los tres flujos tipo CLA simulados se evaluaron realizando medidas de velocidad en la sección de estudio de la zona de trabajo del túnel para verificar que correspondían a simulaciones de los terrenos indicados en la Figura 7.2.2.1 a escala 1/400. Estas medidas se realizaron en la línea central de dicha sección, hasta una altura de 60cm. Se realizaron medidas en 40 puntos para los tres tipos de simulaciones, comenzándose a medir a partir de los 8 mm de altura sobre el piso de la zona de trabajo cada 2 mm y luego cada 5, 10, 20 y finalmente cada 50mm hasta llegar a los 60cm.

A partir de las medidas realizadas en estos puntos con cada sistema de simulación se calculó la correspondiente velocidad media, U , intensidad de turbulencia, I_u , espectro, S , y escala integral de la componente turbulenta longitudinal de la velocidad, L_u^x . Mediante las distribuciones de velocidad media obtenidas se calculó la longitud de rugosidad z_0 , la altura del plano de desplazamiento nulo d , la velocidad de fricción u_* y el exponente de la ley potencial n correspondientes a cada simulación. Para inferir los valores de z_0 , d , u_* y n se utilizó el método indirecto descrito en 5.2, permitiendo un solapamiento de las leyes logarítmica y potencial y encontrando la altura que definía el fin de la sub-capa logarítmica y el comienzo de la sub-capa inercial de manera de minimizar el error medio cuadrático total. La escala de longitudes correspondiente a cada simulación se obtuvo comparando estos valores, así como la distribución de intensidad de turbulencia y escala integral longitudinal, con valores medidos en la CLA por distintos investigadores. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada flujo tipo CLA simulado.

7.2.2.1 Terreno urbano

Al realizar las medidas de velocidad del flujo tipo CLA desarrollado por el sistema de simulación para terreno urbano se constató un alto nivel de turbulencia longitudinal. En la Figura 7.2.2.1.1 se muestra la intensidad de turbulencia en función de la altura en la que se realizó cada medida, calculada de acuerdo con la teoría lineal presentada en Hinze, 1975 y en Smol'yakov & Tkachenko, 1983.

Las medidas de velocidad realizadas con anemómetros de hilo caliente pueden presentar errores cuando la componente fluctuante transversal de la velocidad es importante. Estos errores son más pronunciados cuanto mayor es la componente fluctuante de la velocidad presente en el flujo, pero realizando ciertas suposiciones es posible corregir en parte los mismos, tal como se presenta en el Anexo, Capítulo 8 de este trabajo. Utilizando la metodología descrita en ese capítulo se corrigió el efecto de la componente fluctuante vertical de la velocidad en las medidas de intensidad de turbulencia y velocidad media. Para realizar esta corrección se supuso que la turbulencia presentada por esta capa límite correspondía a un caso intermedio entre turbulencia unidimensional (8.11) e isotrópica (8.12). La intensidad de turbulencia calculada por la teoría lineal, $I_{u \text{ lin}}$, se corrigió según (8.9) de la siguiente manera:

$$I_{u \text{ corr}}^2 \cong \frac{I_{u \text{ lin}}^2}{1 + \frac{23}{8} \cdot I_{u \text{ lin}}^2} \quad (7.2.2.1.1)$$

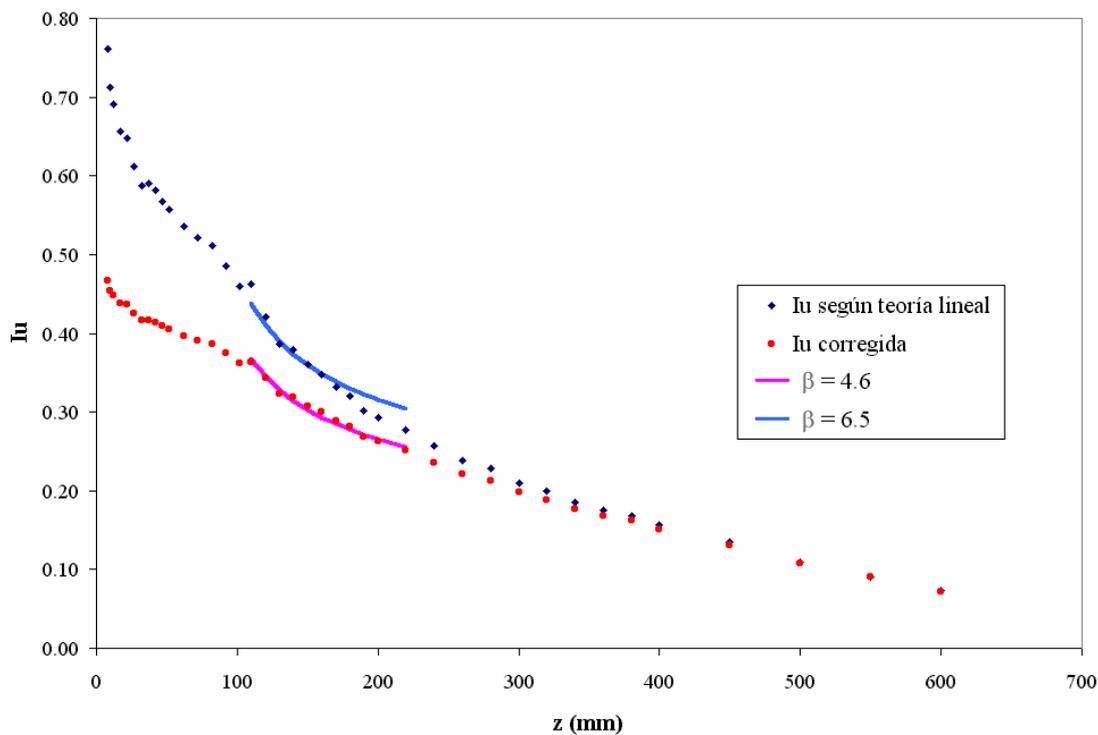


Figura 7.2.2.1.1 Intensidad de turbulencia para terreno urbano

La intensidad de turbulencia corregida siguiendo dicha metodología, $I_{u \text{ corr}}$, también se presenta en la Figura 7.2.2.1.1. Comparando ambas distribuciones, se puede apreciar una baja considerable en la intensidad de turbulencia (del 75% al 47% en la altura $z = 8\text{mm}$) hasta aproximadamente los 150mm sobre el nivel del piso. A partir de los 200mm la diferencia entre la intensidad de turbulencia dada por la teoría lineal y la corregida mediante la expresión (7.2.2.1.1) se hace menor al 10%. Se debe resaltar que la corrección realizada en la intensidad de turbulencia es apoyada por distintos resultados obtenidos a lo largo del análisis de este flujo, como se discutirá más adelante.

De la misma manera, se corrigió la velocidad media calculada mediante la teoría lineal (U_{lin}) utilizando la expresión (8.7). Para ello se supuso que:

$$\overline{v'^2} \cong \frac{1}{4} \cdot \overline{u'^2}$$

en una CLA, como se sugiere en Counihan, 1975.

Sustituyendo la relación anterior en (8.7) y despejando se obtiene que la velocidad media real correspondería a:

$$U_{\text{corr}} \cong \frac{U_{\text{lin}}}{1 - \frac{1}{8} \cdot I_{u \text{ corr}}^2} \tag{7.2.2.1.2}$$

En la Figura 7.2.2.1.2 se presenta el perfil de velocidad media corregida:

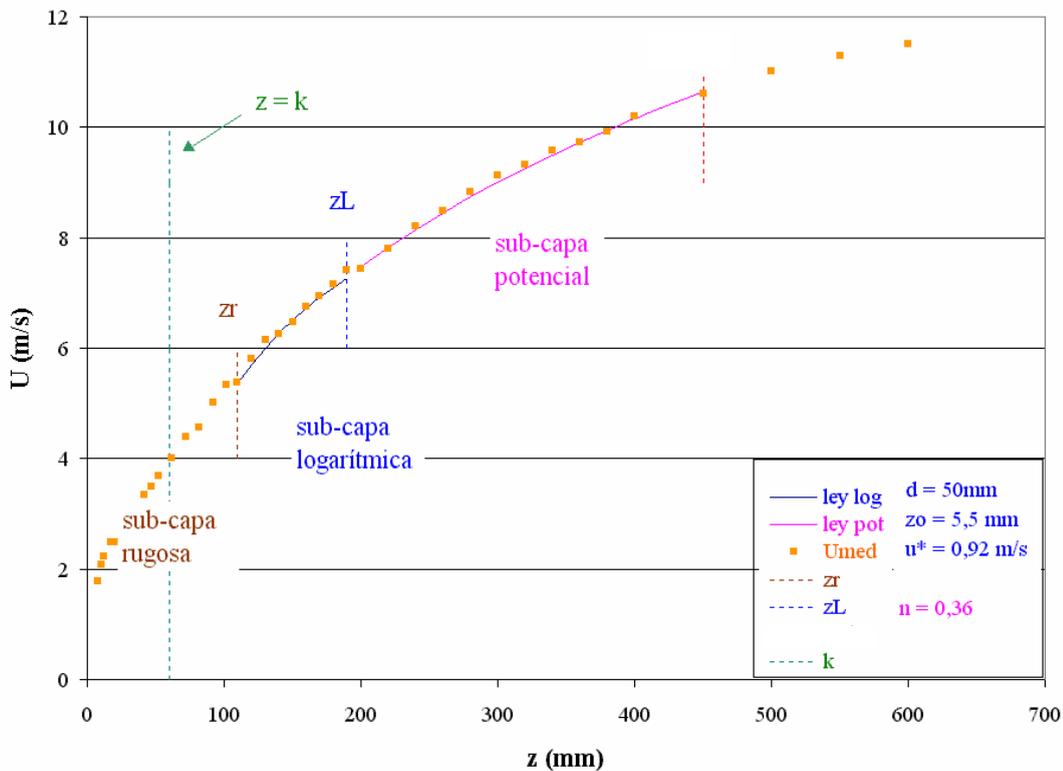


Figura 7.2.2.1.2 Distribución de velocidad media para terreno urbano

Se encontró que los valores de velocidad media calculados según la teoría lineal y los corregidos según (7.2.2.1.2) no diferían más de un 3%, debido a que en esa expresión el término que multiplica a U_{lin} no supera el valor 1.03 en ningún caso.

Análisis de la distribución de velocidades medias. Cálculo de z_0 , d , u^* y n

Siguiendo los métodos descritos en 5.2 para identificar la extensión de la sub-capa logarítmica y de la sub-capa potencial se graficó en escala semi-logarítmica y logarítmica la distribución de velocidad en función de la altura adimensionada $(z-d)/H$ para distintos valores de d , con una altura de referencia $H = 400\text{mm}$. En las Figuras 7.2.2.1.3 y 7.2.2.1.4 se presenta en escala semi-logarítmica y logarítmica, respectivamente, la distribución de velocidad media para $d = 50\text{mm}$, valor correspondiente al mejor ajuste estadístico admitiendo un solapamiento de ambas sub-capas. En ellas también se indican los ajustes logarítmico y potencial encontrados.

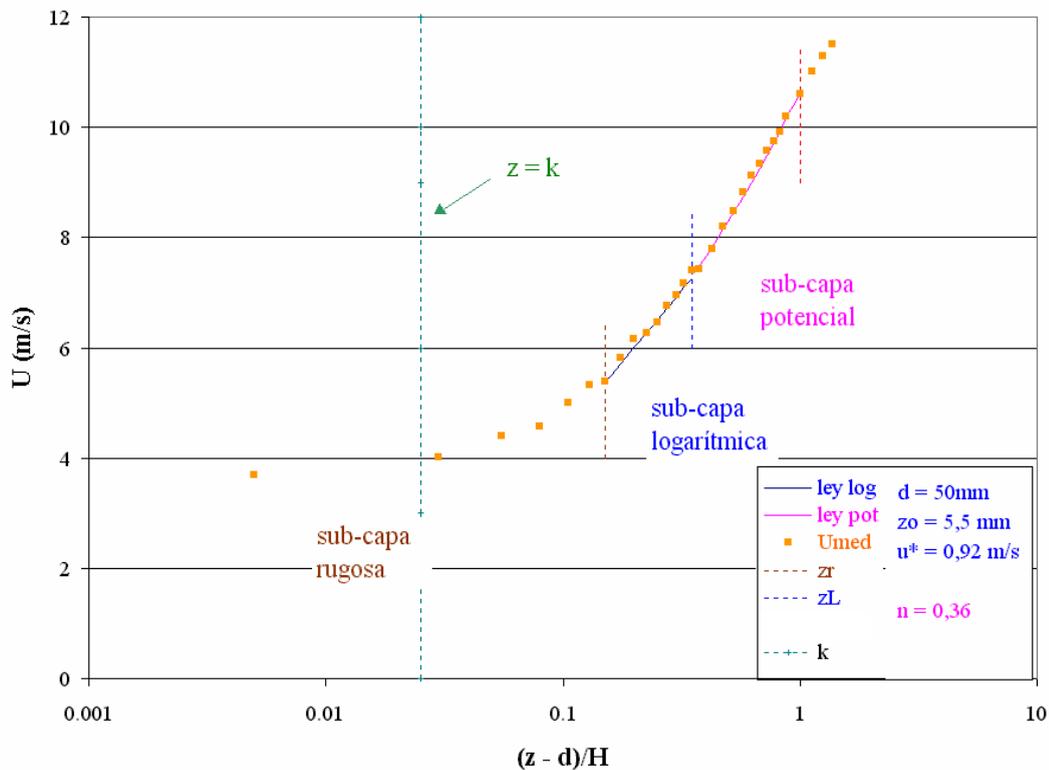


Figura 7.2.2.1.3 Distribución de velocidad media para terreno urbano, escala semi-logarítmica

Como se aprecia en estas Figuras y en la Figura 7.2.2.1.2, en la capa límite simulada se distingue claramente la presencia de las tres sub-capas descritas en el Capítulo 4.1: la sub-capa rugosa, la sub-capa logarítmica y la sub-capa inercial. Cabe recordar que debido al método de simulación seleccionado no se está modelando la totalidad de la CLA, sino

aproximadamente su tercio inferior, que comprende la sub-capa rugosa, la sub-capa logarítmica y parte de la sub-capa inercial.

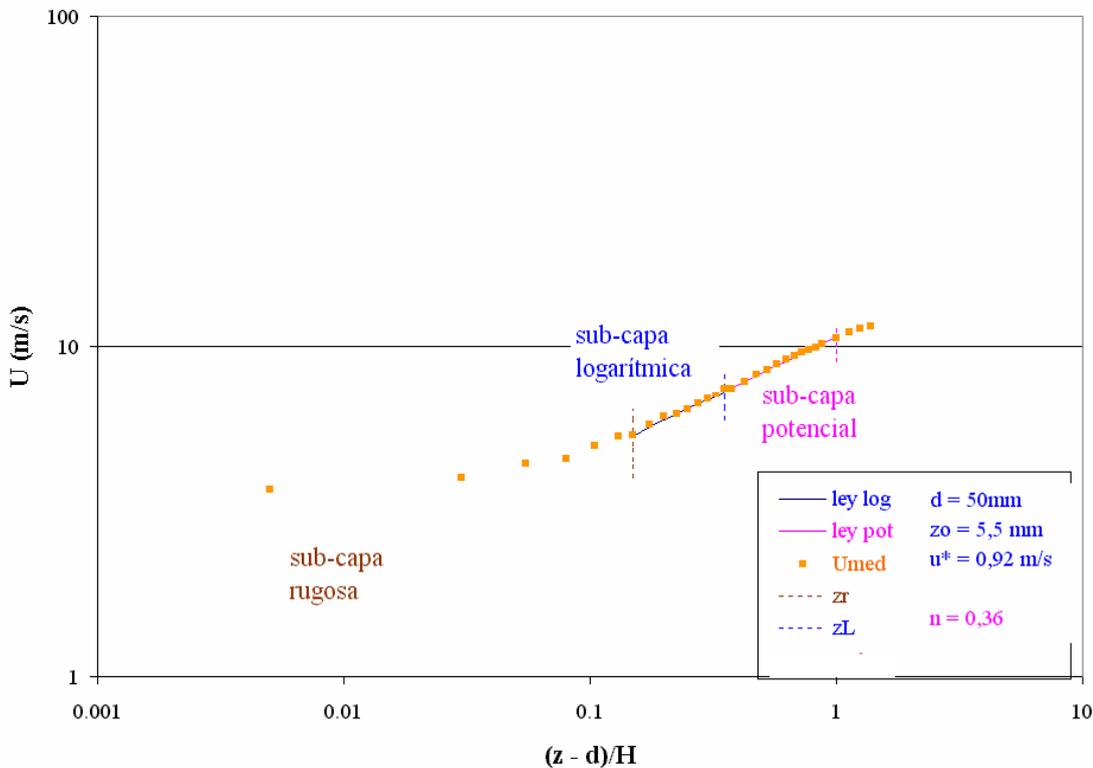


Figura 7.2.2.1.4 Distribución de velocidad media para terreno urbano, escala logarítmica

Utilizando los criterios indicados, el ajuste logarítmico se realizó entre $z_r = 110\text{mm}$ y una altura igual a 220mm según (5.2.2), dando $u_* = 0.92\text{ m/s}$ y $z_0 = 5.5\text{mm}$, mientras que el ajuste potencial se realizó entre 190mm y 450mm según (5.2.5), dando $n = 0.36$ y $b = 0.047$. El valor seleccionado para z_L fue 190mm , correspondiendo al menor error medio cuadrático total. Cabe mencionar que en la sub-capa logarítmica las velocidades calculadas mediante el ajuste logarítmico y el ajuste potencial son muy parecidas, indicando una región con características comunes a ambos tipos de distribución de velocidad, como también indican Farrell & Iyengar, 1999.

En la sub-capa rugosa, los gradientes de velocidad obtenidos fueron menores que los presentados por la sub-capa logarítmica, como Farrell & Iyengar, 1999, Raupach et al., 1991 y otros autores ya indicaron anteriormente. Por otra parte se obtuvo $z_r/k = 1.8$, valor que se encuentra dentro de lo esperado, tal como se presenta en Raupach et al., 1991. Allí se indican valores obtenidos en campo de la altura de la sub-capa rugosa (z_r) entre 1 y 5 veces la altura de los elementos de rugosidad (k). Así mismo, la capa límite simulada por Farrell & Iyengar, 1999 correspondiente a un terreno urbano con $n = 0.28$, presenta un valor de $z_r/k = 1.6$.

En la sub-capa logarítmica se obtuvo una altura de desplazamiento nulo correspondiente a $d/k = 0.83$. Wieringa, 1993 propone para estos parámetros valores comprendidos en el intervalo $d/k \cong 0.7 \pm 0.1$. Esta relación permite verificar si el análisis de la distribución de velocidades para hallar los parámetros correspondientes a la sub-capa logarítmica fue adecuado. Como se menciona en esta referencia, los valores de z_0 y d obtenidos de perfiles de velocidad media se encuentran inversamente correlacionados y si se realizara un análisis inadecuado de la distribución de velocidades para hallar estos parámetros obteniendo, por ejemplo, un valor muy alto para d , el valor de z_0 correspondiente sería muy bajo. Por otra parte, es de esperar que el comienzo de la sub-capa logarítmica se encuentre en una altura comprendida entre 20 y 50 z_0 (Wieringa, 1993). En este caso se obtuvo $z_L = 35 z_0$, lo que sigue indicando un buen análisis de la distribución de velocidades. Así mismo, en el intervalo de alturas hallado para esta sub-capa se obtuvo una componente fluctuante de la velocidad $u' = 1.99 \pm 0.04$ m/s, como se observa en la Figura 7.2.2.1.5, correspondiendo a una variación de $\pm 2\%$. A partir de los 220mm la componente fluctuante longitudinal de la velocidad decrece apreciablemente. Como se mencionó anteriormente, dentro de la sub-capa logarítmica se encuentra una región donde las fluctuaciones de velocidad son esencialmente constantes, lo cual apoya el intervalo de alturas hallado para la sub-capa logarítmica.

Por otra parte, los valores obtenidos de n y u_* mediante la metodología utilizada son cercanos a los esperados según Gartshore, 1973 para $\lambda_e/k \cong 10$ y $\delta/k \cong 20$, donde λ_e y k fueron definidos en 7.2.2. Para estimar la altura que le correspondería a la capa límite simulada parcialmente se utilizó la relación $z_L/\delta \cong 0.15$, obteniéndose $\delta \cong 1300$ mm y mediante la ley potencial se calculó la velocidad correspondiente a esa altura, dando $U_\delta \cong 16$ m/s.

Finalmente cabe mencionar que a partir de los valores hallados se puede verificar que en esta simulación el número de Reynolds asociado a la rugosidad ($Re_r = u_* \cdot z_0/\nu = 330$), corresponde, como era de esperar, a un flujo aerodinámicamente rugoso tal como indica Plate, 1982, en los que las características del flujo no dependen de la velocidad.

Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. Cálculo de L_u^x

Como indica la Figura 7.2.2.1.5, en la distribución de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad se observa una primera región creciente en altura, que coincide con la extensión de la sub-capa rugosa. En la sub-capa logarítmica hallada u' no presenta variaciones apreciables, y los valores obtenidos corresponden a una relación $u'/u_* = 2.15 \pm 0.05$, dentro de lo sugerido para terreno urbano por Counihan, 1975, Raupach et al., 1991 y otros autores. El valor correspondiente del parámetro β según (4.2.2) es cercano a 4.6 y en la sub-capa logarítmica la expresión (4.2.3) para la intensidad de turbulencia ajusta a la distribución de intensidad de turbulencia corregida si se utilizan los valores $z_0 = 5.5$ mm y $d = 50$ mm hallados para esta sub-capa, como se muestra en la Figura 7.2.2.1.1. Luego de la sub-

capa logarítmica, esta componente presenta un comportamiento decreciente, como era de esperarse. La intensidad de turbulencia longitudinal, por su parte, es siempre decreciente, pero presenta a partir del entorno cercano a $z = 200\text{mm}$ una pendiente menor.

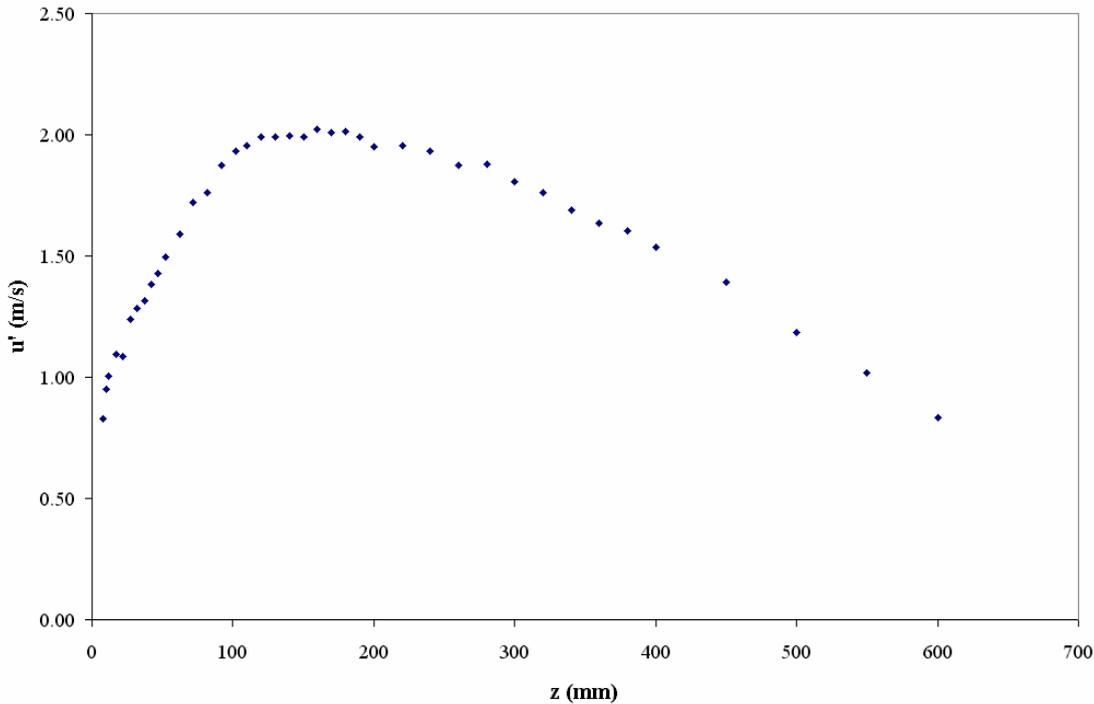


Figura 7.2.2.1.5 Distribución de la componente fluctuante longitudinal, terreno urbano

El espectro de potencia de las fluctuaciones longitudinales de velocidad obtenido en dos tramos se observa en la Figura 7.2.2.1.6 en escala logarítmica, para una altura de 140mm. Comparando con lo indicado en 4.2, claramente se observa el rango inercial del espectro, con una pendiente de $-5/3$, que se extiende aproximadamente entre los 15 y 800Hz. En esta Figura también se observa un leve apartamiento del comportamiento lineal del espectro antes del comienzo del rango disipativo. Este comportamiento también fue observado por Farell & Iyengar, 1995 y como allí se cita, por Saddoughi & Veravali, 1994 para valores del número de Reynolds altos. En la Figura 7.2.2.1.7 se observa el espectro adimensionado en escala logarítmica para la misma altura y las rectas de pendiente 1 a bajas frecuencias y $-2/3$ en el rango inercial. En las Figuras referidas, rms corresponde al valor de $\overline{u'^2}$ a la altura z indicada.

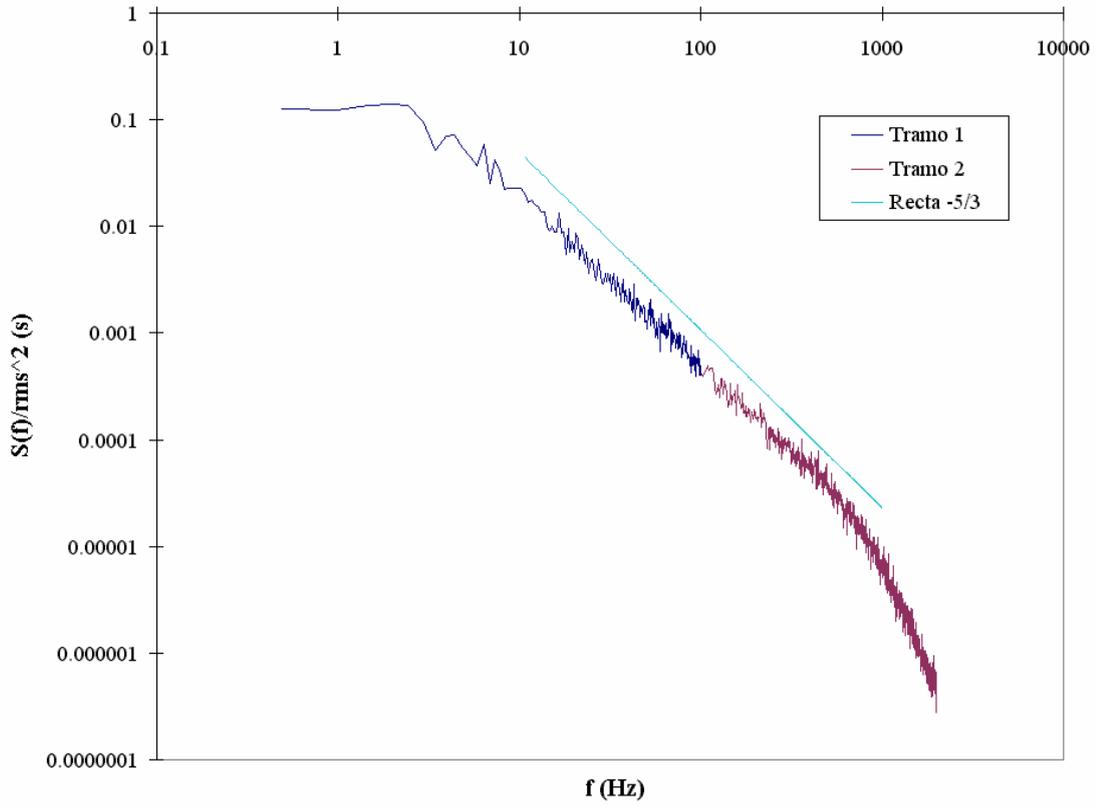


Figura 7.2.2.1.6 Espectro de potencia para terreno urbano, $z=140\text{mm}$

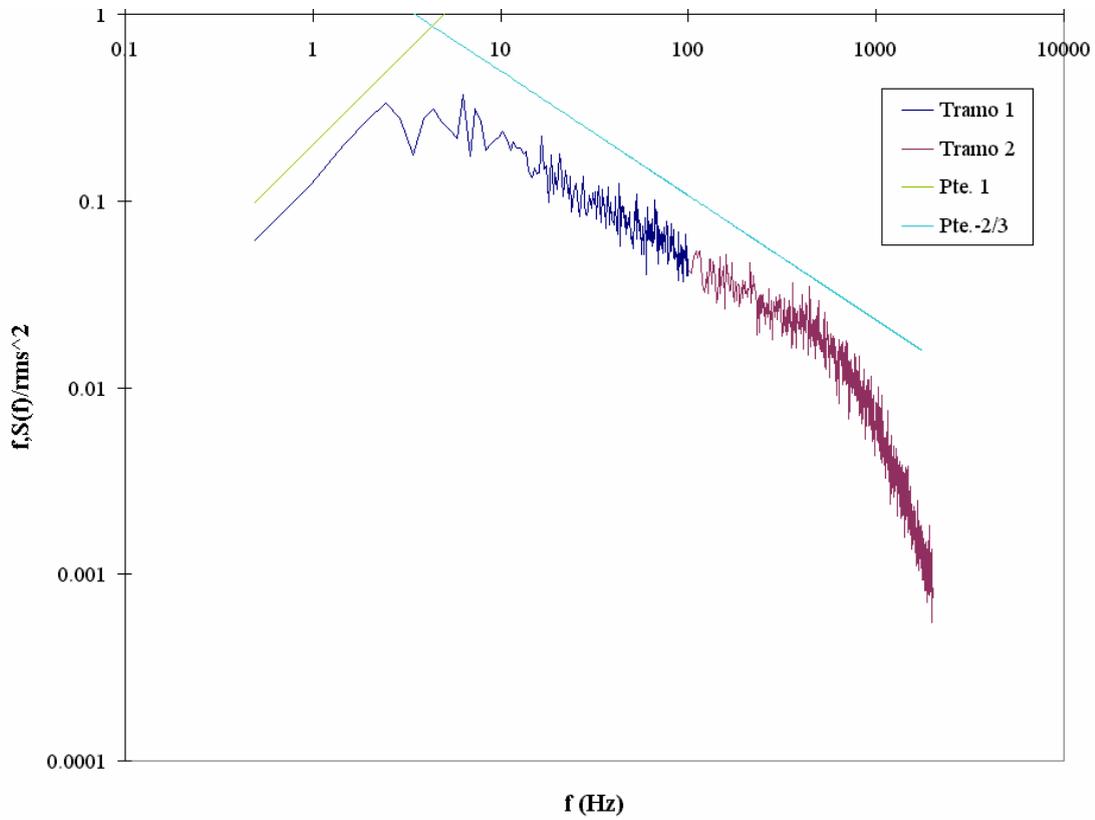


Figura 7.2.2.1.7 Espectro de potencia adimensionado para terreno urbano, $z=140\text{mm}$

El cálculo de la escala integral en cada punto se realizó mediante las ecs. (5.2.8) y (5.2.9). Utilizando gráficos como la Figura 7.2.2.1.7 en cada punto medido se estimó el valor del pico espectral \hat{f} en cada punto, mientras que con gráficos como la Figura 7.2.2.1.6 se estimó el valor del espectro para $f = 0$ Hz, $S(0,z)$, para cada punto. Estos resultados se muestran en la Figura 7.2.2.1.8. En esta Figura se puede observar un comportamiento de la escala integral de la turbulencia creciente en altura, hasta una altura de aproximadamente 220mm. Según las medidas que presenta Counihan, 1975 se esperaría que este comportamiento creciente se diera hasta alturas algo mayores, pero esta referencia también indica que los resultados presentan mucha dispersión. Se debe mencionar además, que Farell & Iyengar presentan resultados de medidas de L_u^x correspondientes a una simulación de terreno urbano de $n = 0.28$, donde el comportamiento en altura es similar al encontrado en el presente trabajo. En sus medidas, L_u^x es creciente en altura hasta aproximadamente el fin de la sub-capa logarítmica (en este caso, los 220mm), a partir de la cual su valor se mantiene, o disminuye levemente, como también ocurre en el presente trabajo en el intervalo de alturas correspondiente.

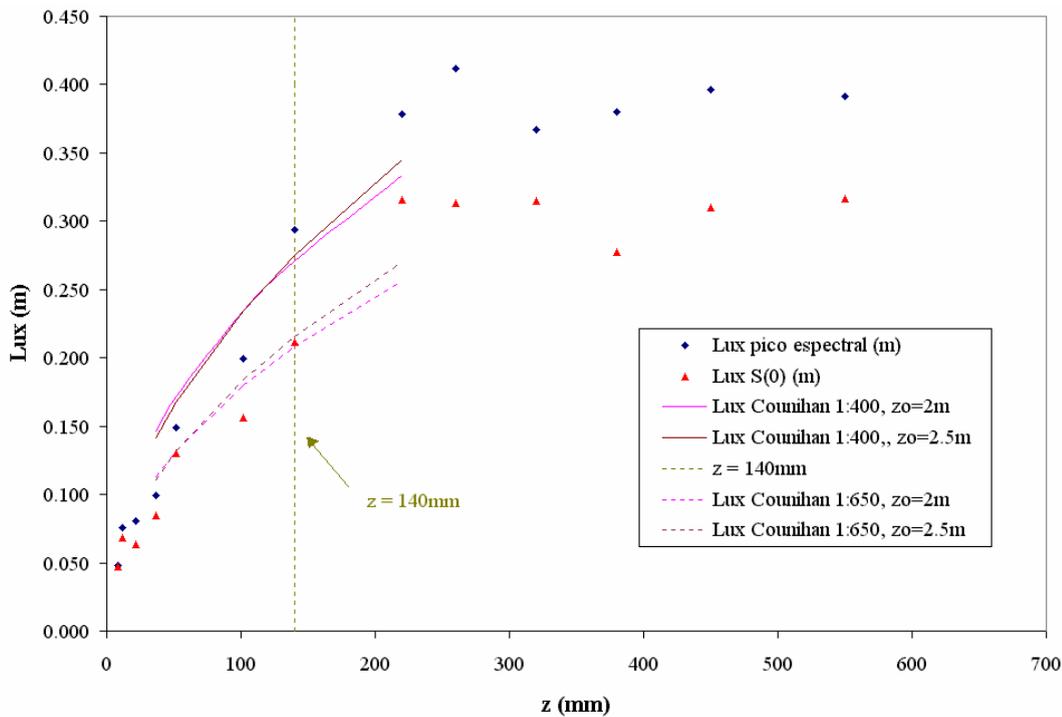


Figura 7.2.2.1.8 Distribución de la escala integral para terreno urbano

En las Figuras 7.2.2.1.9 y 7.2.2.1.10 se comparan sobre los mismos gráficos el espectro adimensionado medido y el espectro de von Karman para $z = 140$ mm, este último calculado según (4.2.8) utilizando los valores de las escalas integrales longitudinales obtenidos a 140mm mediante los dos métodos indicados anteriormente (ecs. (5.2.8) y (5.2.9)). En ambos casos se observa un buen ajuste, pero este ajuste es cualitativamente mejor en las menores frecuencias para el segundo caso.

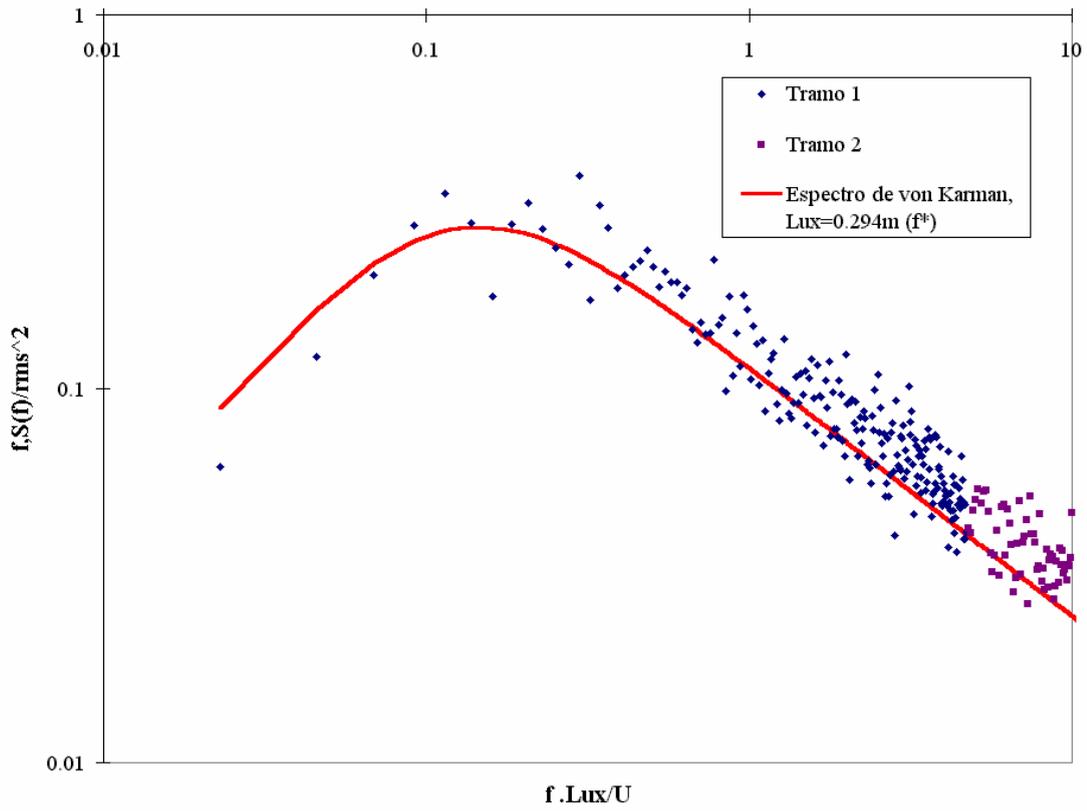


Figura 7.2.2.1.9 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, primer método

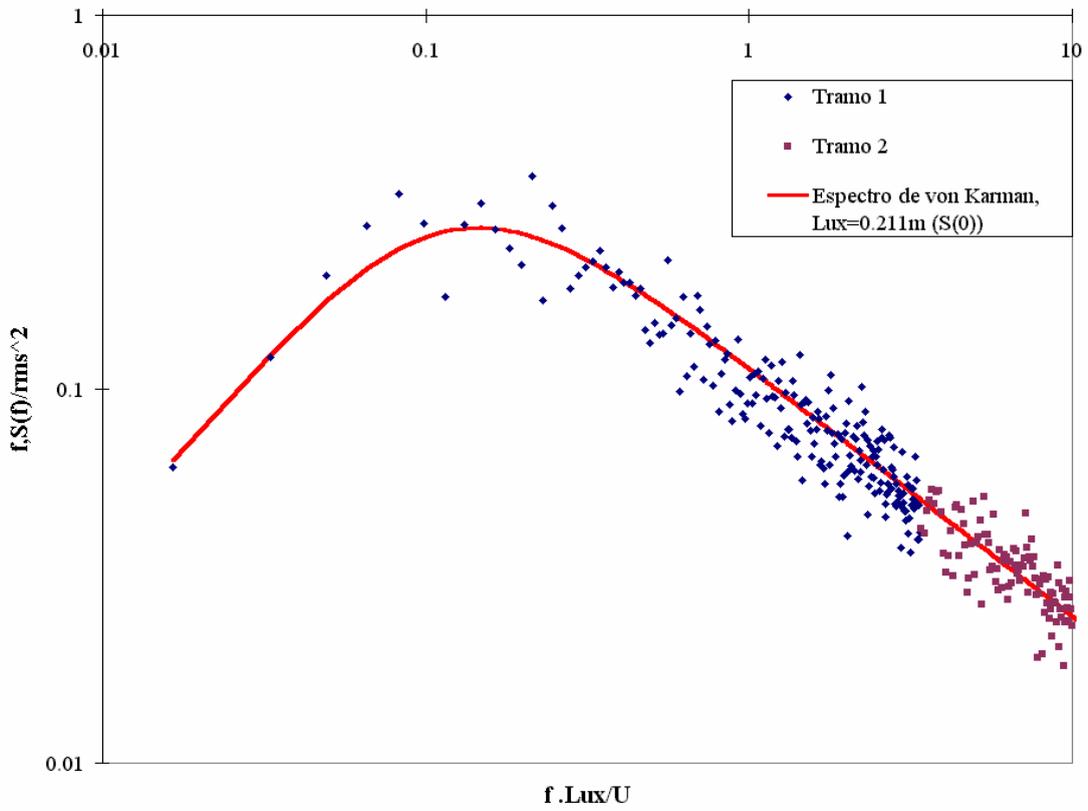


Figura 7.2.2.1.10 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, segundo método

Estimación de la escala de simulación

Como se indicó anteriormente, la longitud de rugosidad hallada para la simulación de este terreno fue de $z_0 = 5.5\text{mm}$, mientras que la altura del plano de desplazamiento nulo fue de 50mm. Counihan, 1975, indica para terrenos urbanos valores de longitud de rugosidad en prototipo que varían de 1m a 4m. Wieringa, 1992 presenta la clasificación de terrenos de Davenport actualizada. En ella propone valores de longitud de rugosidad cercanos a 1m para terrenos cubiertos totalmente y de manera regular con obstáculos grandes y de tamaño similar, con espacios abiertos de tamaño comparable a las alturas de los obstáculos. Dentro de los casos típicos cita bosques maduros y regulares, ciudades o pueblos homogéneos. La siguiente categoría pertenece a terrenos con valores de z_0 mayores o iguales a 2m. Dentro de la misma se ubicarían los centros de ciudades con mezcla de edificios altos y bajos, así como bosques irregulares con muchos espacios abiertos. Por otra parte, ESDU, 1985 recomienda valores de z_0 de 0.7m para centros de ciudades y bosques y un valor de d entre 15 y 25m. En Farell & Iyengar, 1995 se señala que los valores de z_0 presentados en ESDU, 1985 son considerablemente menores que los presentados por otros autores, como Counihan, 1975, Wieringa, 1992 y Simiu & Scanlan, 1986. Simiu & Scanlan, 1986, cita un valor de $d \cong 20\text{m}$ para terrenos urbanos. A la ciudad de Montevideo, por lo tanto, podría corresponderle una longitud de rugosidad de entre 2 y 2.5m, por la heterogeneidad de la altura de sus edificios, por lo que la escala de modelo según z_0 se encontraría entre 1/360 y 1/450. A estas escalas de simulación, el valor hallado de altura del plano de desplazamiento nulo se encontraría entre 18 y 23m, lo que también está de acuerdo con los valores citados.

Finalmente se presenta la escala determinada por el cociente de la escala integral de la turbulencia longitudinal L_u^x medida en el túnel de viento y la calculada utilizando la relación propuesta por Counihan, 1975, presentada en el Capítulo 5.2. Para $z_0 = 2\text{m}$, esta referencia sugiere un valor de $C = 17$ y de $1/n = 0.46$. En el rango de alturas en que la escala integral L_u^x es creciente en las medidas realizadas (hasta 220mm) y desde los 50mm, la escala así calculada varía entre 1/310 y 1/540 si se utilizan los valores de L_u^x calculados a partir del pico espectral y entre 1/440 y 1/850 si se utilizan los valores calculados a partir de $S(0,z)$. Si se utiliza para los cálculos $z_0 = 2.5\text{m}$ (lo que da $C = 14.7$ y $1/n = 0.5$), esta escala varía entre 1/330 y 1/560 y entre 1/480 y 1/900, respectivamente. En la Figura 7.2.2.1.8 se presentan las curvas propuestas por Counihan para $z_0 = 2$ y 2.5m a escala 1/400 y 1/650. En ella se aprecia que la escala de longitudes inferida de la distribución de la escala integral podría encontrarse entre esos dos valores.

Discusión

La forma de los perfiles de velocidad, intensidad, y escala integral de la turbulencia longitudinal obtenidos mediante la simulación de un terreno urbano fue cualitativamente correcta, siendo sus características las correspondientes a una capa límite. Los espectros de la

turbulencia longitudinal obtenidos también presentaron las características esperadas.

Por otra parte, el valor del índice potencial $n = 0.36$ obtenido se corresponde con los propuestos en la bibliografía para centros urbanos ($n = 0.28$ hasta $n \cong 0.35-0.40$ para grandes ciudades), lo que verifica que se logró modelar una CLA que se desarrolla sobre un terreno urbano. Por ejemplo, Biétry et al., 1978 sugiere que para grandes ciudades se utilice $n \cong 0.35$. La exposición A en ASCE Standard 7-93, 1994 está definida como centros de grandes ciudades con al menos el 50% de los edificios de altura mayores a 21m. En ese caso, este tipo de terreno debe prevalecer corriente arriba del sitio de estudio por lo menos durante 800m o 10 veces la altura del edificio o estructura, lo que sea mayor. En estas condiciones, el valor recomendado es $n = 0.33$. Simiu & Scanlan, 1986 indica que Davenport, 1965 y ANSI, A58.1, 1982 sugieren para terrenos urbanos (grandes ciudades) exponentes de la ley potencial de 0.4 y 0.33. Así mismo, el valor del índice potencial obtenido en la presente simulación se encuentra comprendido entre los indicados por distintos autores para valores de z_0 entre 2 y 2.5m, lo cual verifica la escala de simulación encontrada. En Counihan, 1975, por ejemplo, se presentan valores sugeridos por distintos autores para el índice de la ley potencial según la longitud de rugosidad del tipo de terreno estudiado.

En cuanto a la altura de la CLA, distintos autores sugieren como altura típica valores comprendidos entre 500 y 600m. Por ejemplo, Simiu & Scanlan, 1986 indica que Davenport, 1965 y ANSI, A58.1, 1982 sugieren una altura de capa límite para terrenos urbanos (grandes ciudades) de 520m y 460m, respectivamente. Counihan recomienda una altura de 600m para vientos moderados a fuertes. Si se considera que la altura de la sub-capa logarítmica corresponde a una altura del 15% de la altura de la CLA, se podría estimar $z_L \cong 75 - 90$ m. La altura de la sub-capa logarítmica modelada correspondió a 190mm, por lo que se tendría $z_{LM}/z_{LP} \cong 1/395$ a $1/475$.

Adicionalmente, la corrección realizada a los altos valores de intensidad de turbulencia medidos pudo ser verificada. Como se mencionó al realizar el análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad, los valores de intensidad de turbulencia corregidos según (7.2.2.1.1) verifican la expresión (4.2.3) en la capa de rasante constante perteneciente a la sub-capa logarítmica con $\beta = 4.6$. Este valor se calculó utilizando (4.2.2) y los valores de u' medidos en modelo y luego corregidos mediante (7.2.2.1.1) y es representativo de una CLA que se desarrolla sobre un terreno urbano, como indica Simiu & Scanlan, 1986. En la Figura 7.2.2.1.1 se puede observar que la expresión (4.2.3) con $\beta = 4.6$ ajusta la distribución de intensidad de turbulencia corregida en la mayor parte de la sub-capa logarítmica. Si no se realizara la corrección planteada, el parámetro β calculado a partir del valor de u' medido en modelo sería igual a 6.5, valor representativo de un terreno rural, en discordancia con los demás resultados obtenidos al evaluar este flujo. En este caso el ajuste de (4.2.3) a la distribución de intensidad de turbulencia sin corregir, indicado en la Figura 7.2.2.1.1, no es tan bueno como en el caso anterior.

De lo indicado en los puntos anteriores se puede concluir que la simulación de la CLA correspondiente a una ciudad con $z_0 \cong 2m$ y $n \cong 0.35$ fue satisfactoria y que la escala de simulación es cercana a 1/400. La escala de longitudes dada por $z_{0M}/z_{0P} \cong 1/400$, y a esa escala, el valor de la ley potencial $n = 0.36$ hallado está de acuerdo con el valor de z_0 y de d hallados. Por otra parte, la relación z_{LM}/z_{LP} es cercana a 1/400 de acuerdo a recomendaciones en la bibliografía existente. La escala de longitudes dada por $L_u^x M/L_u^x P$ presentó mayor variabilidad, pero su intervalo de variación igualmente contiene al valor 1/400. Si se utiliza la relación $L_u^x M/L_u^x P$ a partir de los valores obtenidos mediante la ubicación del pico espectral, la escala de longitudes corresponde a cerca de 1/400.

Aunque los métodos utilizados para estimar u , z_0 , d y n , por un lado, y L_u^x , por otro pueden estar sujetos a errores, se debe notar que las escalas de longitudes inferidas a partir de estos coinciden en indicar una escala cercana a 1/400, que además es verificada por otras características de la capa límite, como la intensidad de turbulencia y el valor de z_L hallados.

7.2.2.2 Mar

En las Figuras 7.2.2.2.1, 7.2.2.2.2, 7.2.2.2.3 y 7.2.2.2.4 se indican las distribuciones de velocidad media en escala lineal, semi-logarítmica y logarítmica y la distribución de intensidad de turbulencia longitudinal de la capa límite correspondiente a la simulación de mar. En las tres primeras figuras se puede apreciar claramente las sub-capas correspondientes a las distribuciones de velocidad logarítmica y potencial caracterizadas en 4.1.

Análisis de la distribución de velocidades medias. Cálculo de z_0 , u_* y n

El análisis de la distribución de velocidad se realizó fijando $d = 0\text{mm}$, valor correspondiente para mar como indica por ejemplo Wieringa, 1993, y siguiendo el método indirecto descrito en 5.2 que permite solapamiento entre la sub-capa logarítmica y la sub-capa potencial.

El mejor ajuste logarítmico correspondió al intervalo comprendido entre 17 y 280mm, obteniéndose $u_* = 0.59\text{m/s}$ y $z_0 = 0.021\text{mm}$, mientras que el mejor ajuste potencial se encontró para el intervalo comprendido entre 27 y 280mm, obteniéndose $n = 0.12$ y $b = 0.034$. El z_L correspondiente al mínimo error cuadrático total se obtuvo para una altura de 130mm.

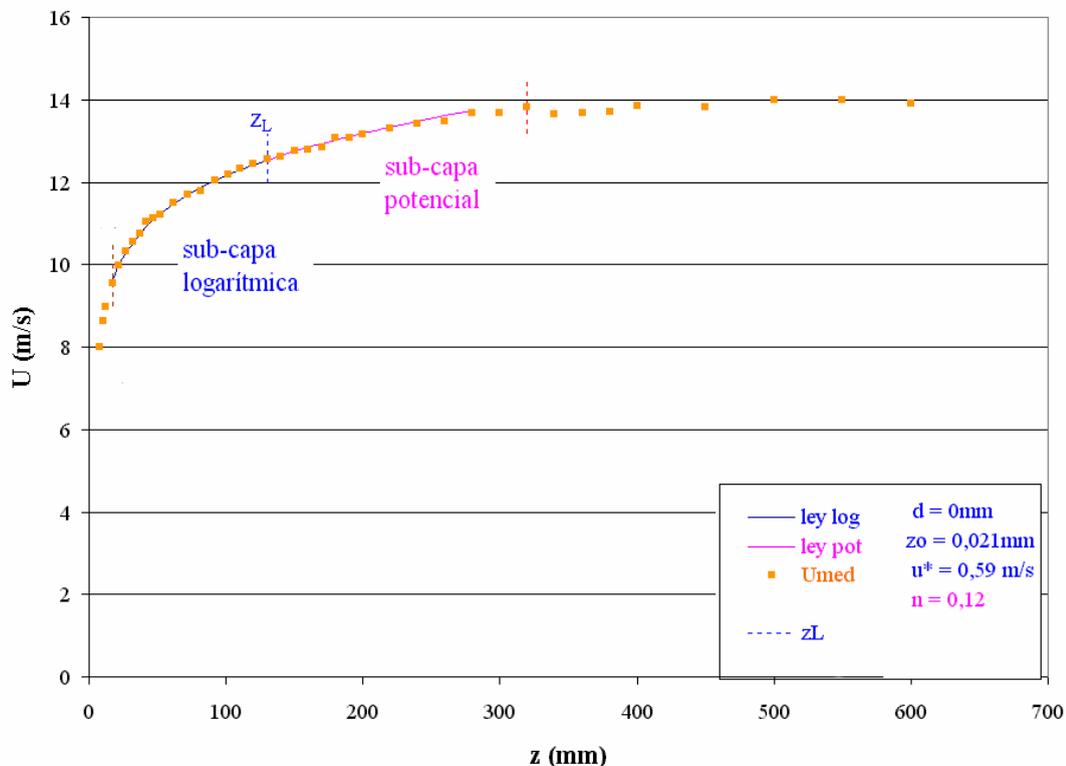


Figura 7.2.2.2.1 Distribución de velocidad media para mar

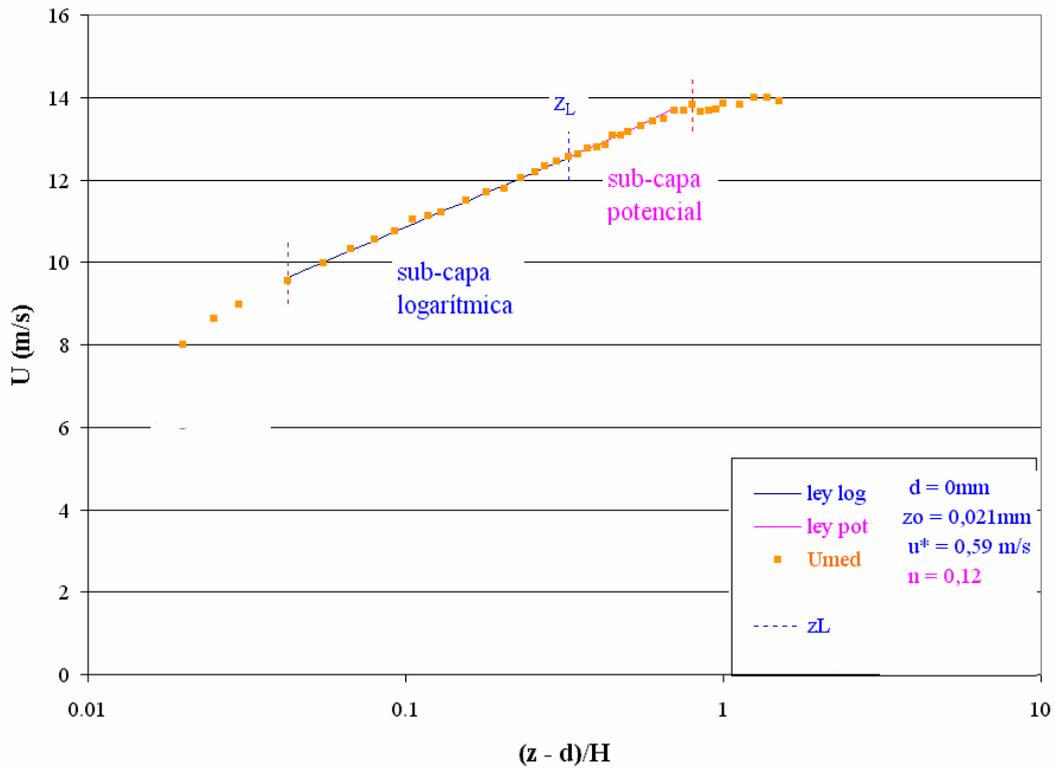


Figura 7.2.2.2.2 Distribución de velocidad media para mar, escala semi-logarítmica

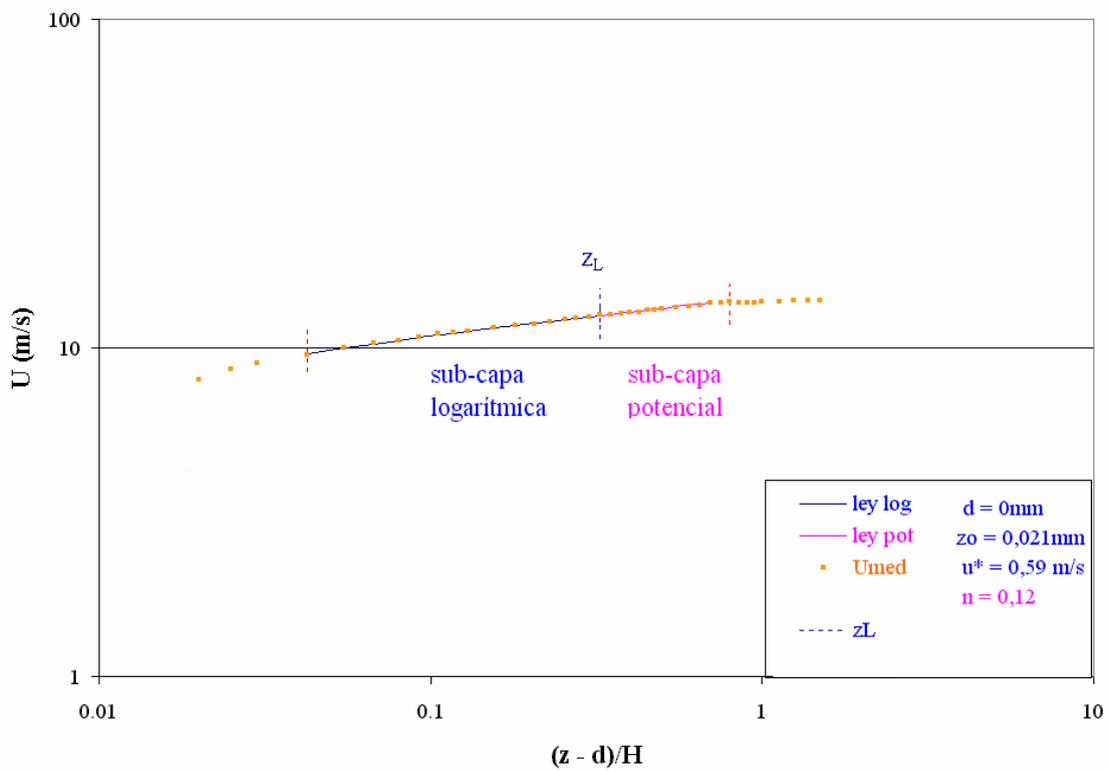


Figura 7.2.2.2.3 Distribución de velocidad media para mar, escala logarítmica

Ambos ajustes dieron resultados muy similares, como se aprecia en los gráficos anteriores de distribución de velocidad, y los valores de velocidad correspondientes a una misma altura difieren en menos del 1% en ese intervalo.

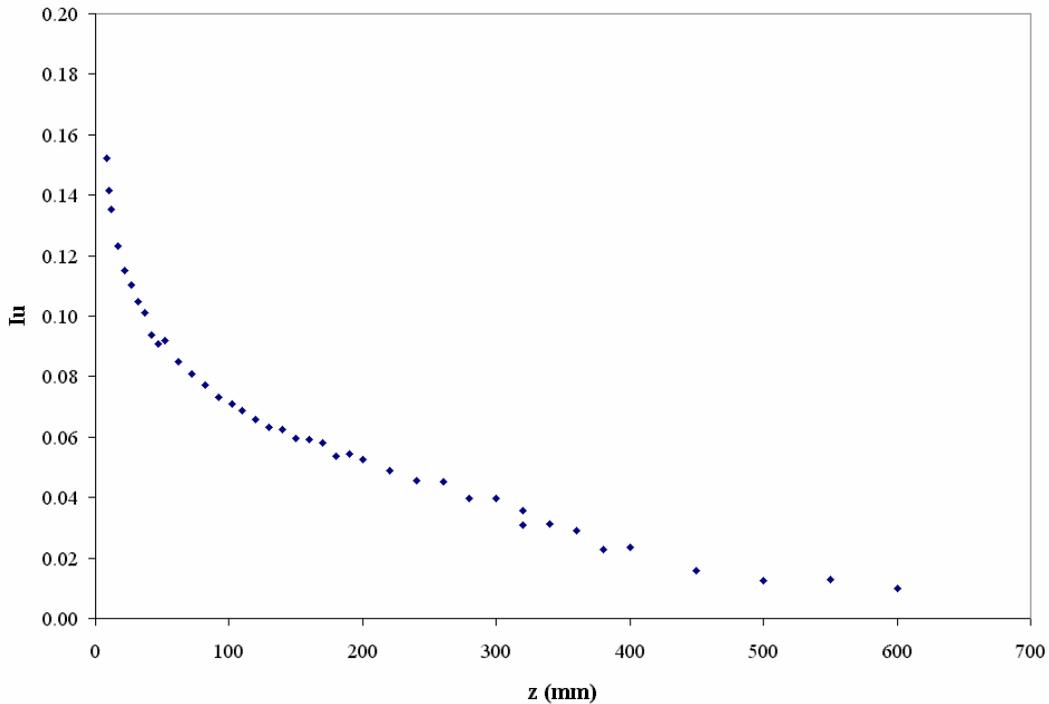


Figura 7.2.2.2.4 Distribución de intensidad de turbulencia longitudinal para mar

Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. Cálculo de L_u^x

En la Figura 7.2.2.2.4 se observa que los valores de intensidad de turbulencia longitudinal son sensiblemente menores a los presentados por el sistema de simulación del terreno urbano.

La Figura 7.2.2.2.5 muestra el espectro de potencia a una altura de 140mm obtenido en dos tramos. Nuevamente se observa el rango inercial del espectro, esta vez entre los 20 y 700Hz, aproximadamente. Cerca de los 2000Hz se observa el efecto del filtro pasabajos del anemómetro. En la Figura 7.2.2.2.6 se observa el espectro adimensionado en escala logarítmica para la misma altura y las rectas de pendiente 1 y $-2/3$.

Se estimó la escala integral mediante los métodos descritos en 5.2. Los resultados se muestran en la Figura 7.2.2.2.7.

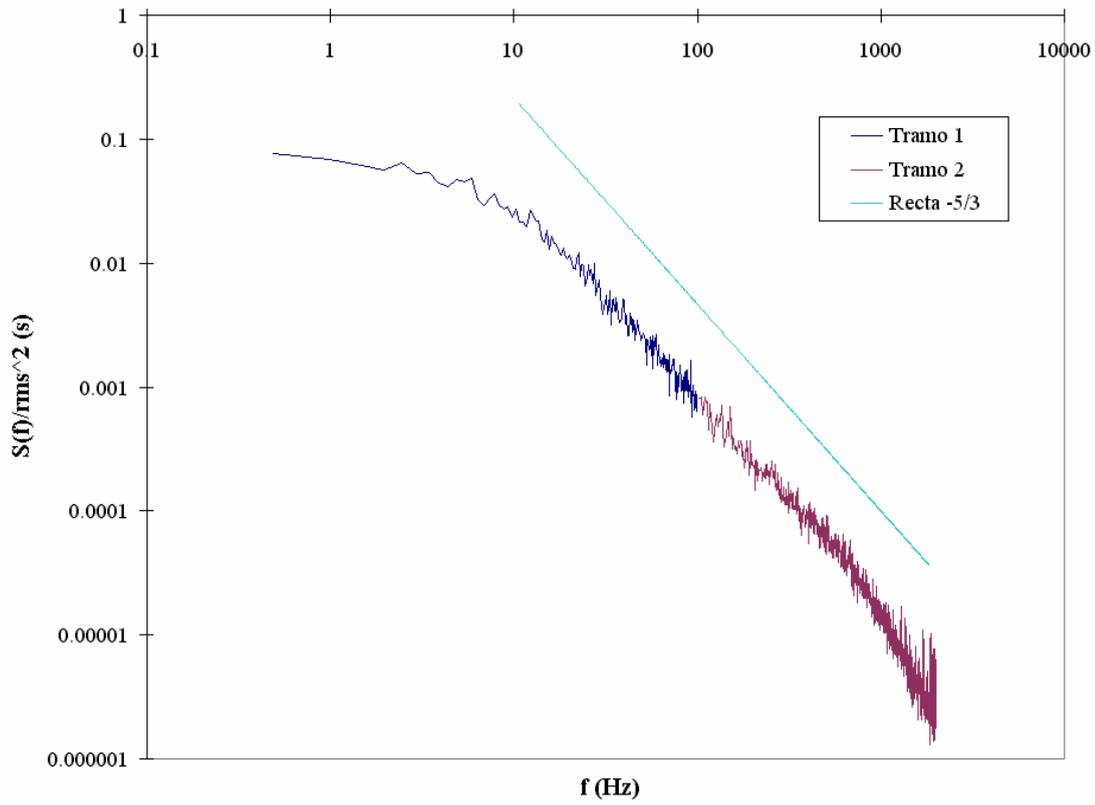


Figura 7.2.2.2.5 Espectro de potencia para mar, $z=140\text{mm}$

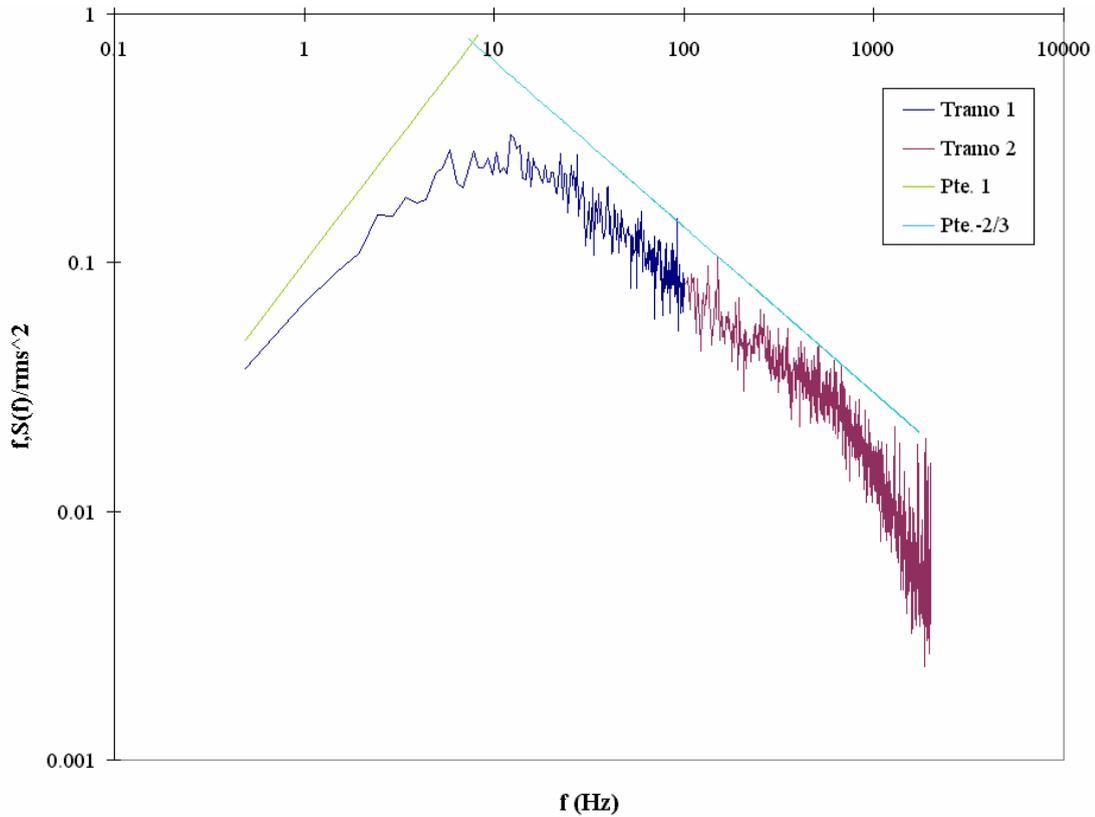


Figura 7.2.2.2.6 Espectro de potencia adimensionado para mar, $z=140\text{mm}$

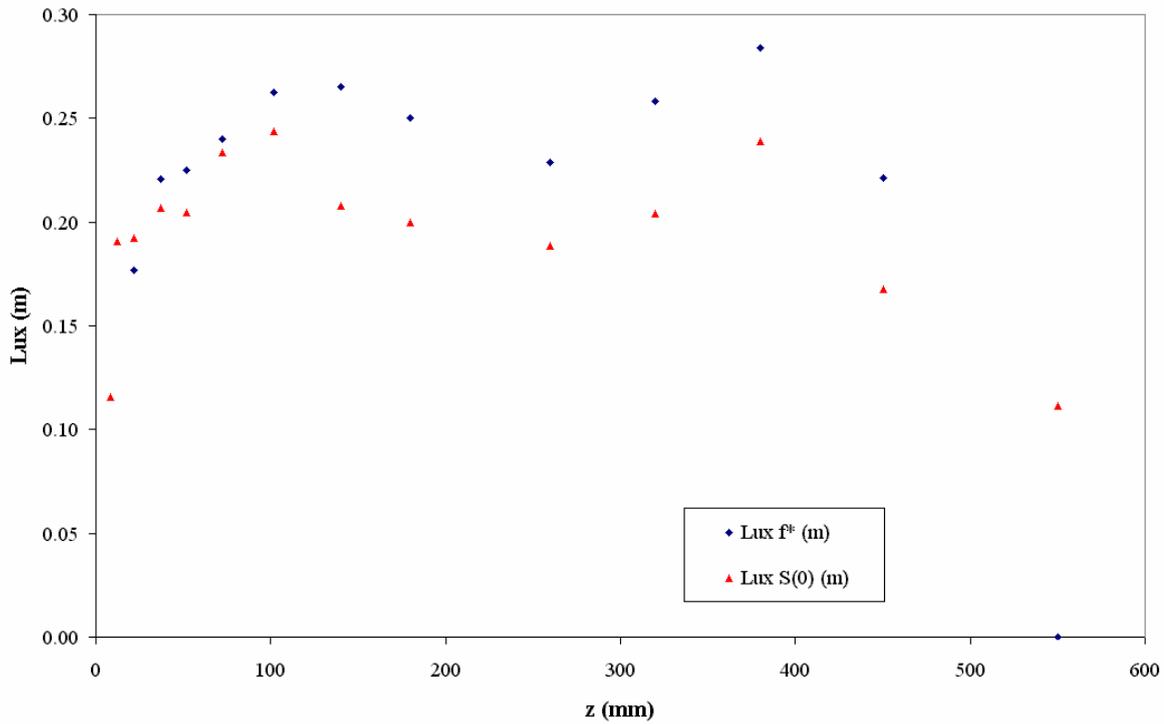


Figura 7.2.2.2.7 Distribución de la escala integral para mar

En esta última figura se observa un comportamiento creciente de las escalas hasta algo más de los 100mm de altura. A partir de esa altura, cercana nuevamente al fin de la sub-capa logarítmica, las escalas integrales disminuyen en valor hasta los 300mm, de manera similar al caso del terreno urbano.

En las Figuras 7.2.2.2.8 y 7.2.2.2.9 se comparan sobre los mismos gráficos, para la altura de 140mm, nuevamente el espectro adimensionado medido y el espectro de von Karman calculado según (4.2.8) a partir de las escalas integrales longitudinales obtenidas a 140mm mediante (5.2.8) y (5.2.9). Se observa que en este caso el valor de la escala integral que mejor ajusta el espectro de von Karman a los valores medidos en todo el intervalo de frecuencias mostrado corresponde a $L_u^x = 0.21m$, calculado con el valor del espectro en $f = 0Hz$.

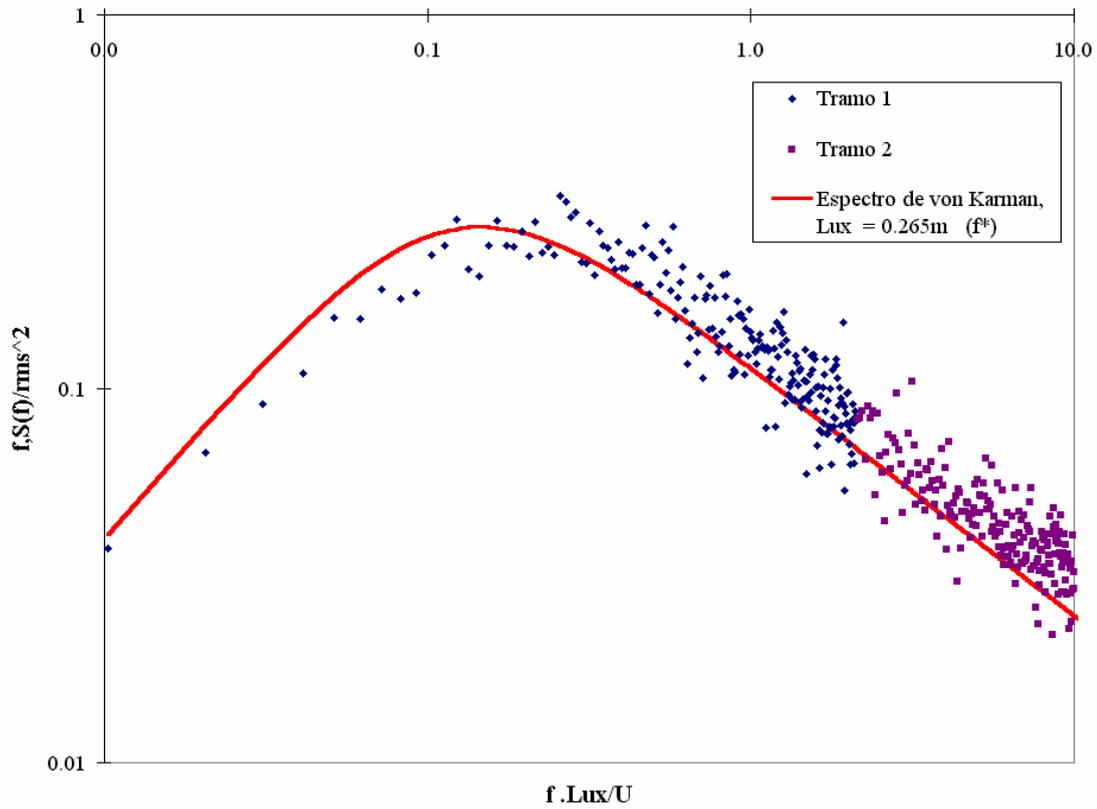


Figura 7.2.2.2.8 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, primer método

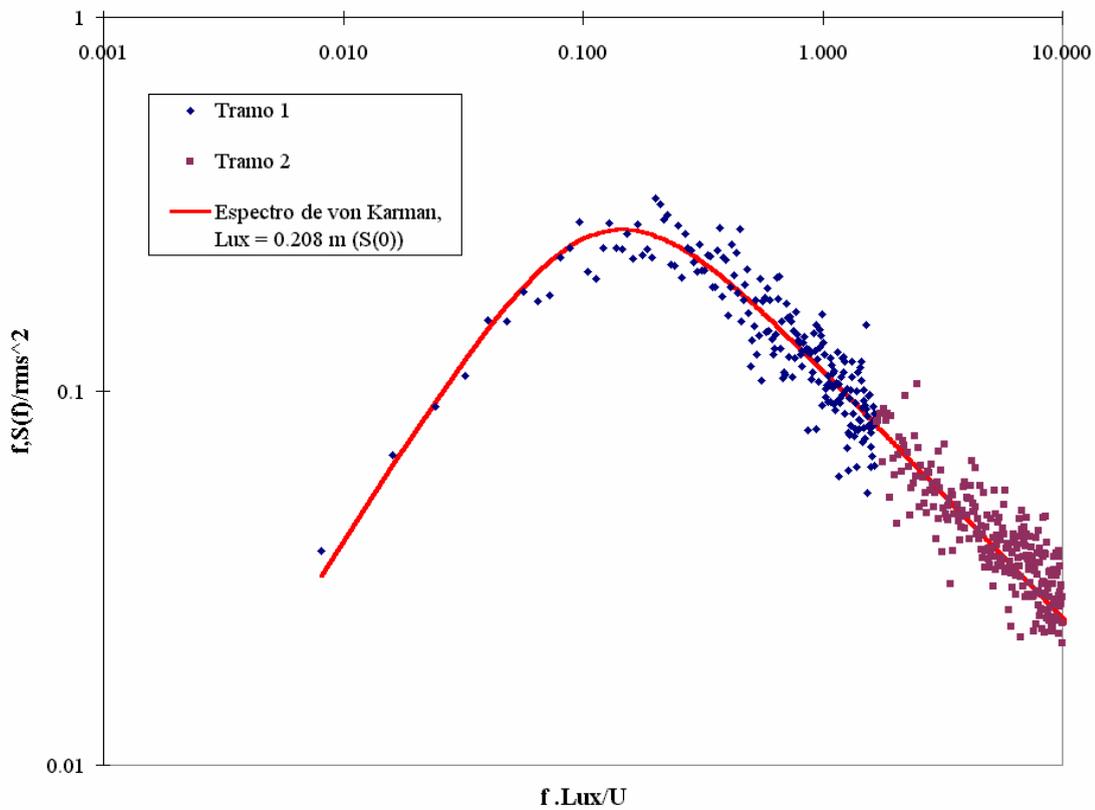


Figura 7.2.2.2.9 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, segundo método

Estimación de la escala de simulación

Counihan, 1975 cita valores de z_0 para una CLA que se desarrolla sobre mar entre 0.001 y 2cm, junto con hielo, barro y nieve en una misma categoría, mientras que Biétry et al., 1978 propone para mar abierto $z_0 = 0.5\text{cm}$. Por otra parte, ESDU, 1985 propone longitudes de rugosidad para mar en el caso de tormentas anuales de 0.3cm, y de 1cm para tormentas cincuentenarias. Wieringa, 1992 propone un z_0 de 0.02cm para mar abierto o lagos, pero en Wieringa, 1993 se indica que el valor dependería cuadráticamente de la velocidad de fricción.

Para el sistema de simulación de mar se había obtenido una longitud de rugosidad $z_0 = 0.021\text{mm}$. A una escala de 1/400 le correspondería un $z_0 = 0.8\text{cm}$ en prototipo, valor cercano al indicado en la Tabla 7.2.2.1 y que se encuentra comprendido en el intervalo de valores sugeridos por distintos autores. Esta longitud de rugosidad seguramente corresponda a casos de velocidad de viento elevada.

Por otra parte se calculó la escala de la simulación a partir de los valores medidos de la escala integral longitudinal. Nuevamente se utilizaron los resultados presentados en Counihan, 1975 para calcular los valores de escala integral correspondientes a prototipo. Para $z_0 = 0.8\text{cm}$ en prototipo se obtiene $C = 120$ y $1/n = 0.12$ y las escalas de simulación correspondientes varían entre 1/500 y 1/600 para el intervalo de alturas en que la escala integral presenta un comportamiento creciente.

Discusión

La forma de los perfiles de velocidades, intensidad, y escala integral de la turbulencia longitudinal obtenidos mediante la simulación de mar fue cualitativamente correcta. Los espectros de la turbulencia longitudinal obtenidos también presentaron las características esperadas.

En cuanto al índice potencial obtenido, Counihan, 1975 recomienda para el caso de mar exponentes de la ley potencial entre 0.08 y 0.12, Biétry et al., 1978 propone $n = 0.10$ y Simiu & Scanlan, 1986 cita de ANSI, 1982 un valor de 0.10. Del ajuste potencial en la capa inercial de esta simulación se obtuvo $n = 0.12$, valor comprendido entre los propuestos. Cabe señalar adicionalmente que el valor en prototipo de $z_0 = 0.8\text{cm}$ se corresponde con este valor de n , siguiendo a Counihan, 1975.

Como se indicó anteriormente, la altura de la sub-capa logarítmica para la simulación de mar fue de 130mm, que correspondería a una altura de 52m para una escala de simulación de 1/400.

Suponiendo una escala de simulación 1/400, el valor de intensidad de turbulencia a 30m

correspondería al 8%. A esa altura, Counihan, 1975 sugiere intensidades de turbulencia entre 8 y 12%, verificando la escala de simulación indicada, mientras que ESDU, 1985 cita valores del 12% para mar durante tormentas anuales. Adicionalmente, la distribución de intensidad de turbulencia en altura presenta un comportamiento cualitativamente similar al indicado en ESDU, 1985.

De lo indicado en los puntos anteriores se puede concluir que la simulación de la CLA correspondiente a mar con $z_0 \cong 1\text{cm}$ y $\alpha \cong 0.10$ fue satisfactoria y que la escala de simulación se encontraría entre 1/400 y 1/600. La escala de longitudes dada por z_M/z_{0P} sería cercana a 1/400, mientras que la calculada a partir de las escalas integrales (L_M^x/L_P^x) sería cercana a 1/550. La intensidad de turbulencia que presenta este flujo también se encontraría dentro de los intervalos esperados.

7.2.2.3 Terreno suburbano – mar

El sistema de simulación correspondiente a esta exposición debía modelar una capa interior correspondiente a un terreno tipo mar y por encima de ésta un flujo característico de un terreno suburbano.

En las Figuras 7.2.2.3.1, 7.2.2.3.2, 7.2.2.3.3, 7.2.2.3.4 y 7.2.2.3.5 se indican, respectivamente, las distribuciones de velocidad media en escala lineal, semi-logarítmica y logarítmica y las distribuciones de intensidad de turbulencia y de la componente fluctuante longitudinal obtenidas para la capa límite correspondiente a la simulación del terreno suburbano-mar. Se puede apreciar en todas las gráficas indicadas que ocurre un cambio de comportamiento entre los 100 y 150mm.

Observando la distribución de velocidad en escala semi-logarítmica, Figura 7.2.2.3.2, se puede identificar un cambio de pendiente cerca de $z = 100\text{mm}$ y otro alrededor de $z = 150\text{mm}$. Entre estos dos puntos el gráfico presenta una doble curvatura que lleva de la pendiente menor (hasta los 100mm) a la mayor (desde los 150mm), como se esperaría a partir de lo indicado en 4.1. Las características de esta distribución de velocidad son similares a las observadas por Antonia & Luxton, 1972, y a los indicados tanto en Antonia & Luxton, 1971, en el Cap. 7 de Plate, 1982 y en Garratt, 1990, pero con las pendientes cambiadas, ya que estos últimos autores presentan resultados correspondientes a un aumento y no a una disminución de rugosidad tal como corresponde en este caso.

La intensidad de turbulencia, Figura 7.2.2.3.4, presenta también tres regiones de características diferentes cuyos límites coinciden con los observados en la distribución de velocidad. La intensidad de turbulencia de la región cercana al suelo correspondería a un terreno de menor rugosidad, mientras que la correspondiente a la región superior correspondería a un terreno de mayor rugosidad. Entre los 100 y 150mm se identificaría una

zona de transición entre ambas regiones.

La capa interior se extendería entonces hasta una altura h_s cercana a $z = 100\text{mm}$, que marca el fin de la región correspondiente a la simulación mar, y a partir de esa altura se observaría la región de transición hasta una altura δ_I cercana a $z = 150\text{mm}$, que señala el comienzo de la capa exterior, correspondiente a la simulación de un terreno suburbano.

Debido a los valores moderados de intensidad de turbulencia presentados por esta simulación no se hizo necesario realizar la corrección indicada anteriormente para el terreno urbano.

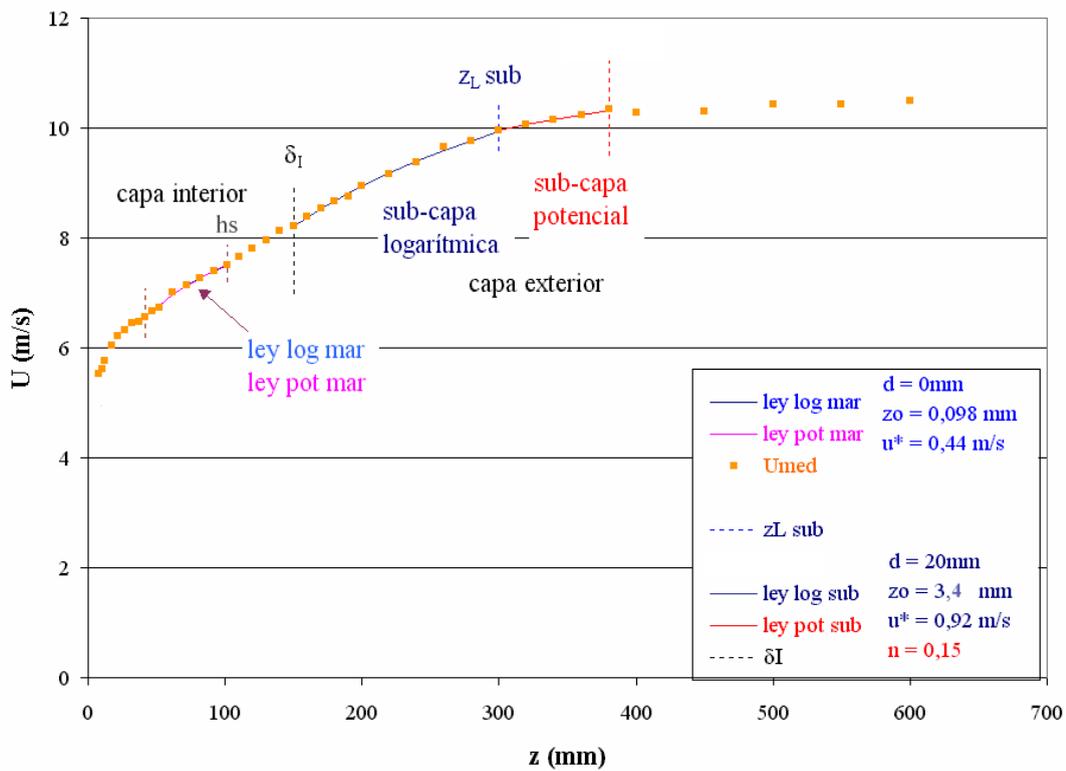


Figura 7.2.2.3.1 Distribución de velocidad media para terreno suburbano-mar

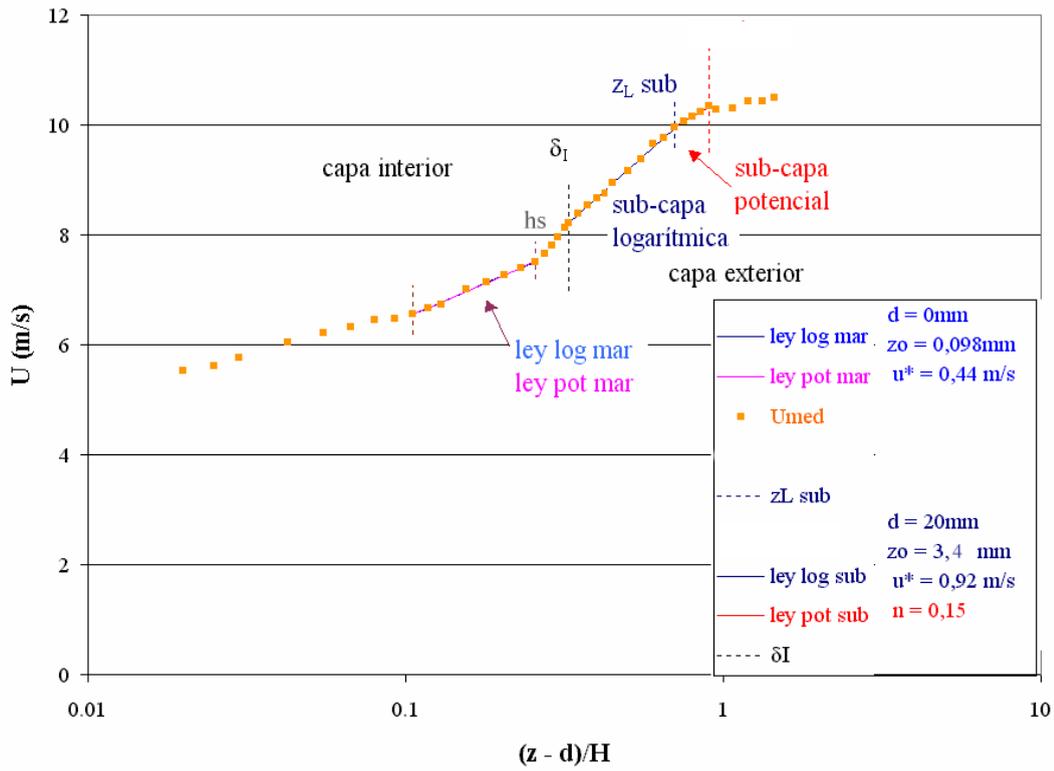


Figura 7.2.2.3.2 Distribución de velocidad media para terreno suburbano-mar, escala semi-logarítmica

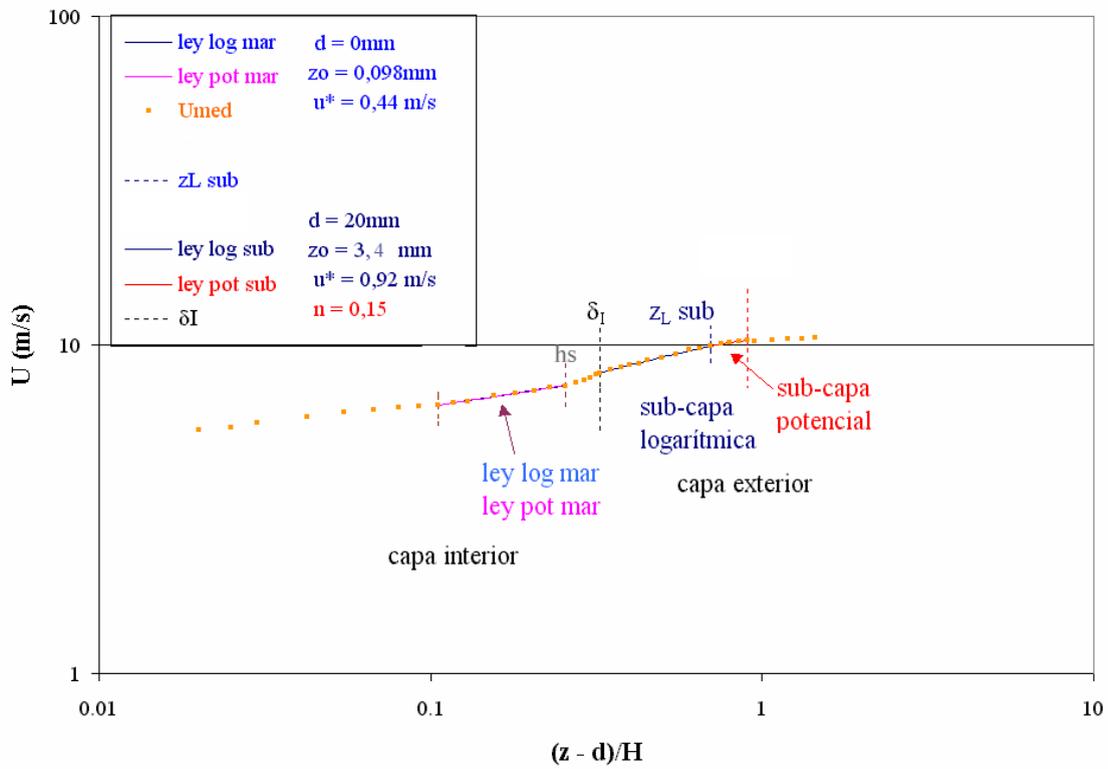


Figura 7.2.2.3.3 Distribución de velocidad media para terreno suburbano-mar, escala logarítmica

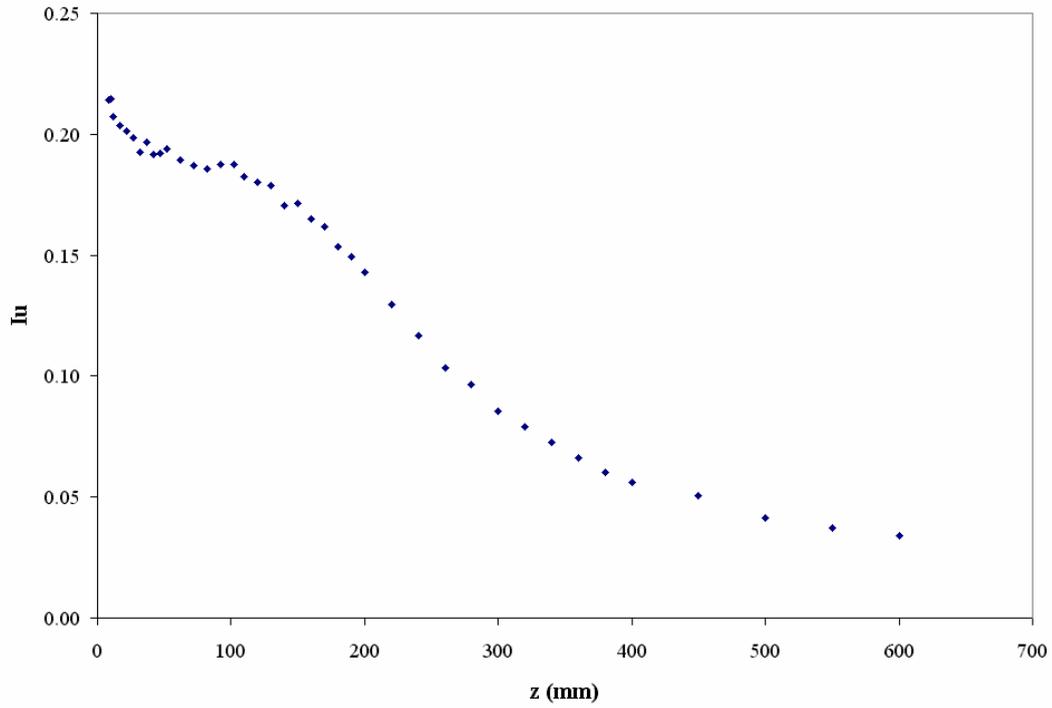


Figura 7.2.2.3.4 Distribución de intensidad de turbulencia para terreno suburbano-mar

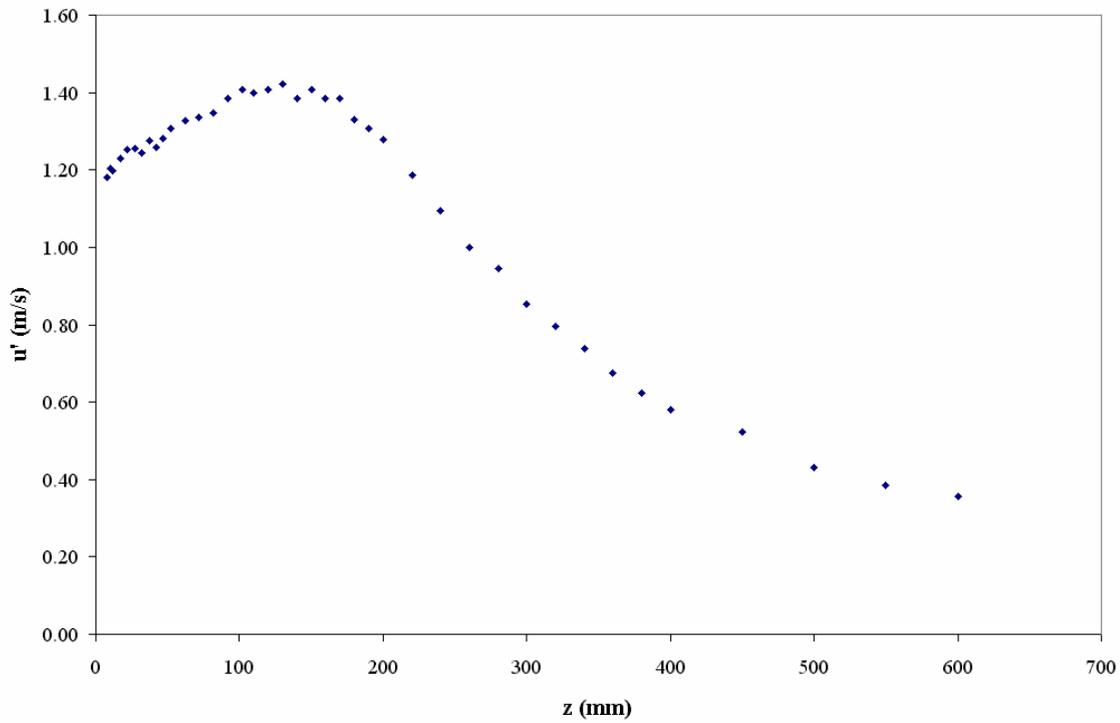


Figura 7.2.2.3.5 Distribución de la componente fluctuante longitudinal para terreno suburbano-mar

Análisis de la distribución de velocidad media. Cálculo de z_0 , d , u_* y n

Capa interior - mar

Se realizó un análisis de la distribución de la velocidad media dentro de la capa interior hasta una altura $h_s = 102\text{mm}$. Como se mencionó anteriormente, a esta altura se produce un cambio en el comportamiento de la distribución de velocidad media e intensidad de turbulencia y en la escala integral longitudinal, como se podrá observar más adelante. Al igual que para la exposición mar presentada en 7.2.2.1 se supuso en este caso $d = 0\text{mm}$ y siguiendo al método indirecto descrito en 5.2 que admite solapamiento se identificó dentro de esta capa el intervalo comprendido entre 42 y 102mm como el correspondiente al mejor ajuste logarítmico. Se obtuvo entonces $z_0 = 0.098\text{mm}$ y $u_* = 0.44\text{m/s}$ para dicho intervalo.

Por otra parte, también se realizó un ajuste potencial a la distribución de velocidad dentro de la capa interior. El mejor ajuste hallado en este caso correspondió a $n = 0.154$ ($b = -0.103$) para el intervalo de 42 a 102mm nuevamente.

En las Figuras 7.2.2.3.1, 7.2.2.3.2 y 7.2.2.3.3 se observan los dos ajustes indicados. Como se aprecia en estas figuras, ambos ajustes dieron resultados muy similares como en el caso de la simulación mar presentada en 7.2.2.2, y los valores de velocidad correspondientes difirieron en menos de 0.1% en ese intervalo. En el intervalo mencionado no fue posible encontrar la altura de la sub-capa logarítmica correspondiente a mar mediante el método indicado en 5.2 de minimizar el error medio cuadrático total. Probablemente la altura de esta sub-capa logarítmica, que se desarrolla en la capa interior de esta simulación, sea superior a $z = 102\text{mm}$. Con una CLI de mayor altura (mayor distancia al cambio de rugosidad, es decir, entre la última barrera del sistema de simulación y la sección de medida) esta sub-capa logarítmica terminaría desarrollándose completamente. Por lo dicho anteriormente, el valor hallado de n podría presentar una incertidumbre mayor a la habitual.

Capa exterior – terreno suburbano

En las Figuras 7.2.2.3.1, 7.2.2.3.2 y 7.2.2.3.3 se puede identificar las sub-capas logarítmica y potencial presentes en la capa exterior. Esta capa exterior representa al flujo que se desarrolla corriente arriba del cambio de rugosidad y debería presentar características propias de un terreno suburbano. Se estudió el intervalo comprendido entre 150 y 400mm para realizar los ajustes logarítmico y potencial correspondientes, ya que a partir de esta última altura la distribución de velocidad se apartaba claramente de su comportamiento anterior

Se halló el mejor ajuste logarítmico y el mejor ajuste potencial y sus intervalos correspondientes para varios valores de d , y luego el valor de d que ofrecía el mínimo error

cuadrático total. Con este último cálculo también se pudo determinar la altura z_L de la sub-capa logarítmica presente en la capa exterior. De esta manera se obtuvo: $d = 20\text{mm}$, $z_0 = 3.4\text{mm}$, $u_* = 0.92\text{m/s}$, $z_L = 300\text{mm}$ y $n = 0.15$ ($b = 0.02$). El ajuste logarítmico se realizó entre 150 y 320mm y el potencial se realizó entre los 300 y 380mm, obteniéndose entonces $\delta_I = 150\text{mm}$.

En las figuras 7.2.2.3.2 y 7.2.2.3.3 el eje de las abscisas se adaptó para representar adecuadamente $(z-d)/H$ en ambas regiones del flujo.

Análisis de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. Cálculo de L_u^x

En la Figura 7.2.2.3.4 se observa que los valores de intensidad de turbulencia longitudinal son nuevamente menores a los presentados por el sistema de simulación correspondiente al terreno urbano. Entre los 100 y 150mm se observa una región donde los flujos correspondientes a los dos tipos de rugosidad se adaptan en este caso, la cual corresponde a la zona de transición. Un comportamiento similar se observa en Antonia & Luxton, 1971.

Así mismo, en la Figura 7.2.2.3.5 se observa la distribución de la componente fluctuante longitudinal de la velocidad. En ella se puede observar que $u' = 1.34 \text{ m/s} \pm 6\%$ en la sub-capa logarítmica perteneciente a la capa interior, pero con un comportamiento siempre creciente. En la zona de transición se tiene u' relativamente constante, correspondiendo a esta zona los máximos valores de las fluctuaciones de velocidad.

Por otra parte, la Figura 7.2.2.3.6 muestra el espectro de potencia de la componente turbulenta longitudinal en escala logarítmica obtenido en dos tramos, para una altura de 140mm. Se observa claramente el rango inercial del espectro entre los 10 y 600Hz, aproximadamente. En la Figura 7.2.2.3.7 se observa el espectro adimensionado en escala logarítmica para la misma altura y las rectas de pendiente 1 y $-2/3$.

A partir de figuras como las 7.2.2.3.6 y 7.2.2.3.7 se estimó la escala integral mediante los métodos descritos en 5.2. Estos resultados se presentan en la Figura 7.2.2.3.8. En ella se observa un comportamiento creciente de las escalas hasta los 200mm aproximadamente. Luego de esa altura las escalas integrales mantienen aproximadamente su valor, y a partir de los 320 a 380mm éste decrece. Se debe mencionar que esta disminución se da aproximadamente a partir del fin de la sub-capa logarítmica (correspondiente a la capa exterior), análogamente a los casos urbano y mar. También se puede apreciar un cambio en la pendiente de la distribución de la escala integral cerca de $z = 100\text{mm}$. Este comportamiento coincide con el presentado por la distribución de la longitud de mezcla en Antonia & Luxton, 1972 en la región cercana al fin de la capa interior.

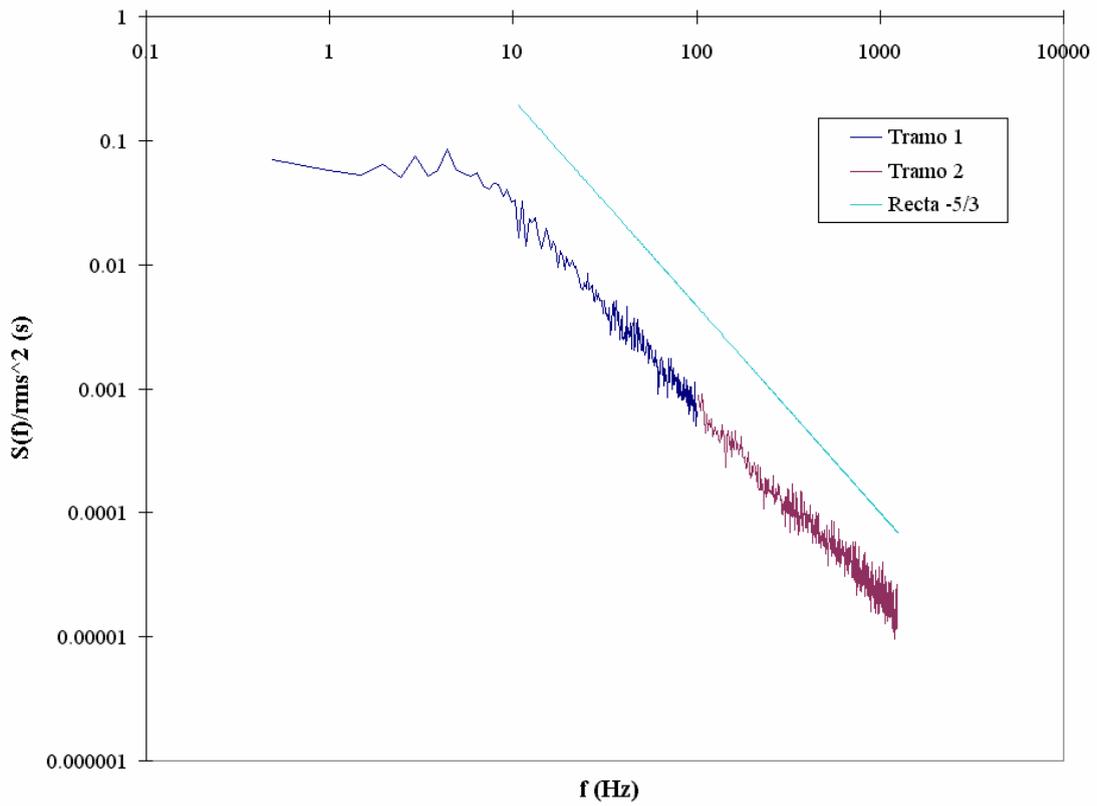


Figura 7.2.2.3.6 Espectro de potencia para terreno suburbano-mar, $z=140\text{mm}$

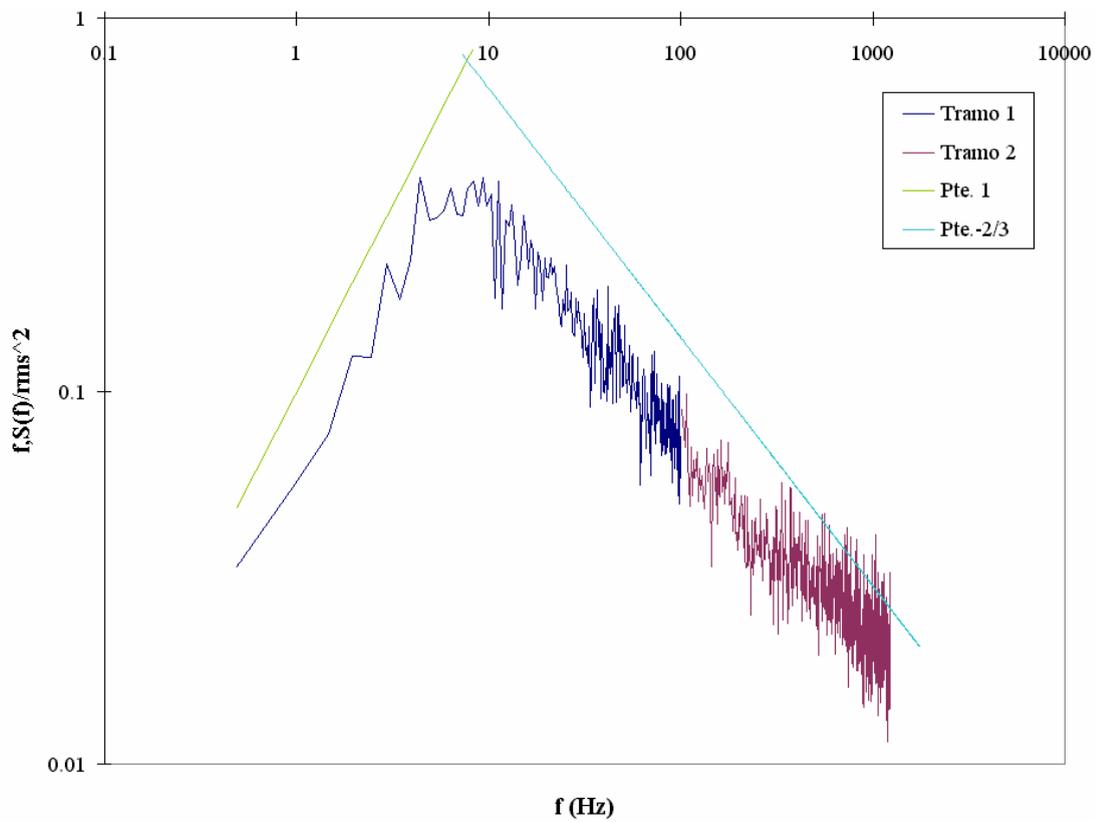


Figura 7.2.2.3.7 Espectro de potencia adimensionado para terreno suburbano-mar, $z=140\text{mm}$

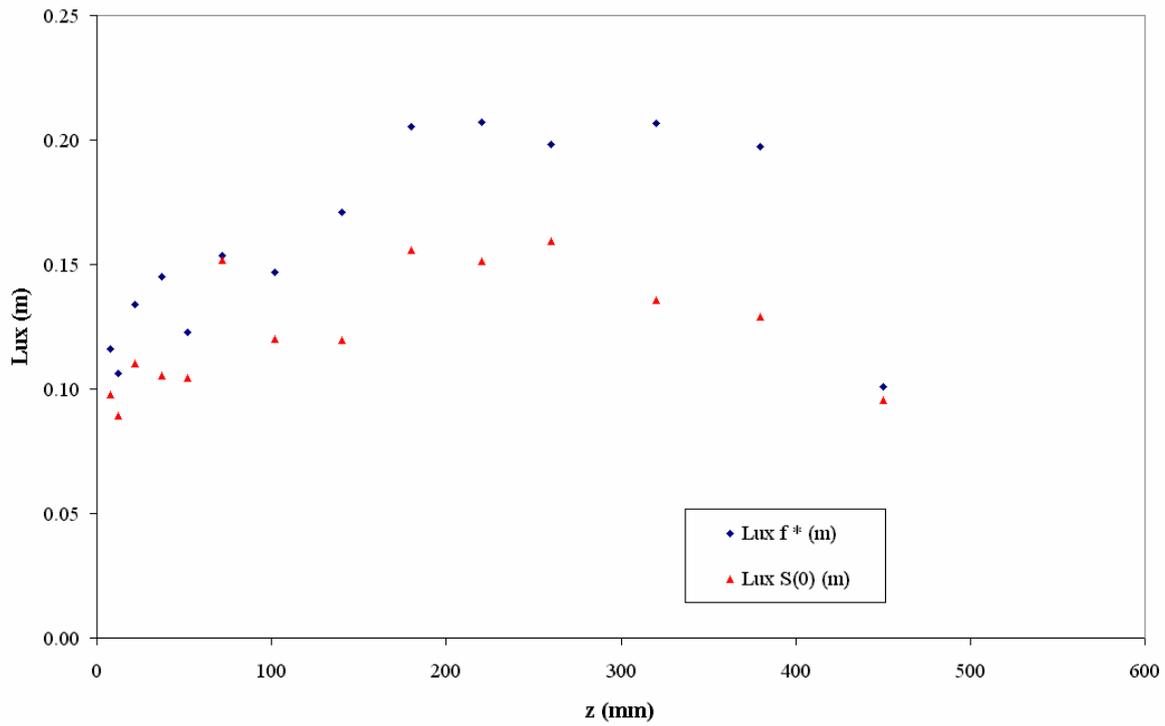


Figura 7.2.2.3.8 Distribución de la escala integral para terreno suburbano-mar

Finalmente, en las Figuras 7.2.2.3.9 y 7.2.2.3.10 se comparan sobre los mismos gráficos nuevamente el espectro adimensionado medido y el espectro de von Karman para la altura de 140mm, calculado este último utilizando los valores de las escalas integrales longitudinales obtenidos a 140mm mediante (5.2.8) y (5.2.9).

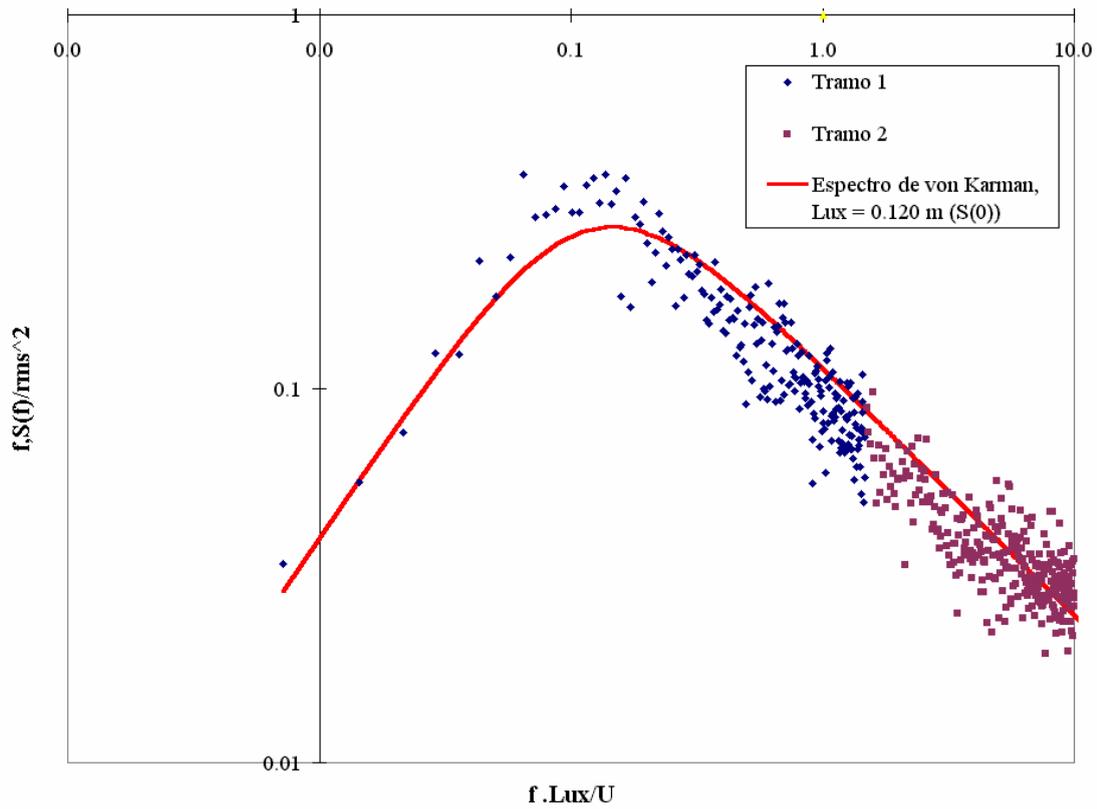


Figura 7.2.2.3.9 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, primer método

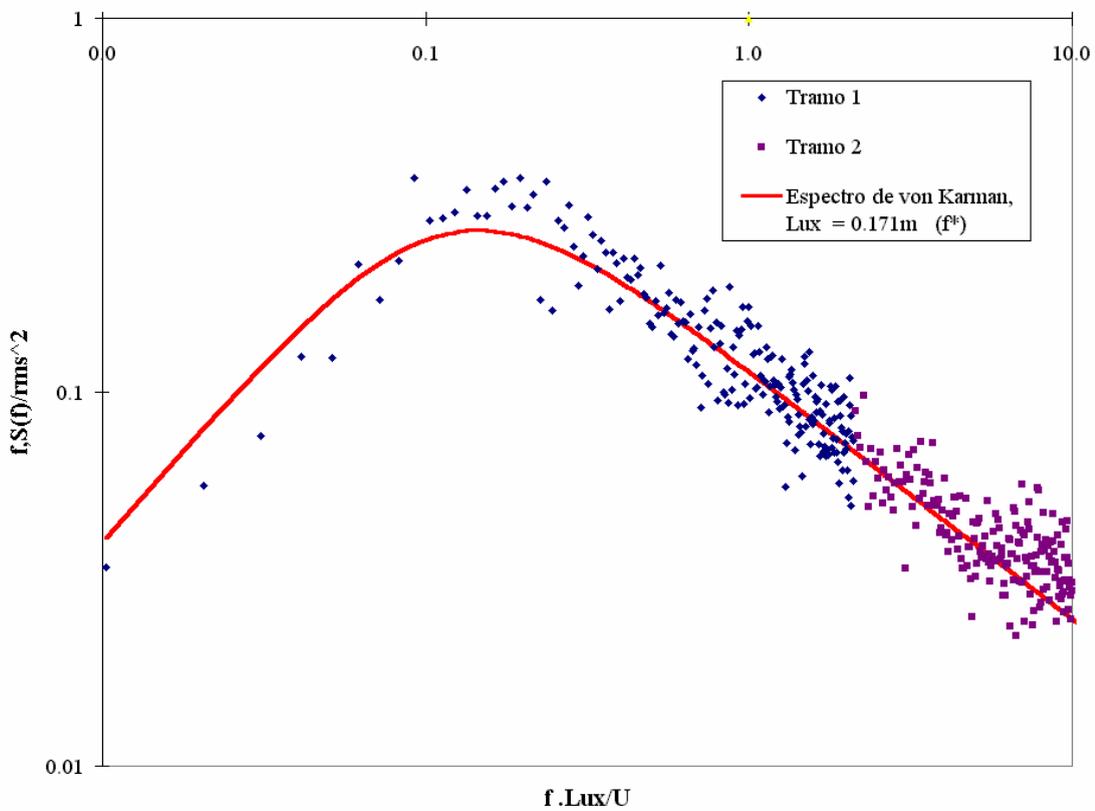


Figura 7.2.2.3.10 Comparación con espectro de von Karman a $z=140mm$, segundo método

Estimación de la escala de simulación

Se debe señalar que los valores de z_0 y n , sugeridos para la CLA bajo distintas condiciones de exposición en la bibliografía citada en este trabajo así como las distribuciones de I_u y L_u^x , corresponden en general a situaciones donde se tiene corriente arriba terrenos homogéneos, es decir, sin cambios de rugosidad importantes durante cierta distancia, lo cual no concuerda con este caso de estudio. Por esta razón, algunas comparaciones cuantitativas de esos parámetros que se realizan a continuación para la simulación del terreno suburbano-mar podrían no ser aplicables. Como se mencionó en 4.1, las observaciones realizadas en la CLA sobre cambios de rugosidad han sido limitadas y la autora no pudo encontrar referencias aplicables al caso estudiado.

Como se indicó anteriormente, en esta simulación se obtuvo para la sub-capa logarítmica presente en la capa interior una longitud de rugosidad $z_0 = 0.098\text{mm}$. Si la escala fuera 1/400 a esta simulación le correspondería entonces un valor de z_0 en prototipo de 4cm, valor que se encuentra por encima de los mencionados en 7.2.2.2 para una exposición tipo mar. Sin embargo, este resultado está de acuerdo con lo sugerido en Cataldo, 1998: el valor de z_0 de una superficie no dependería únicamente de las características de la misma, sino que sería función también de las características del flujo que se desarrolla más lejos de ésta. Para flujos que presentan características distintas lejos de la superficie se obtienen valores diferentes de z_0 al ajustar una distribución de velocidad logarítmica a los perfiles de velocidad obtenidos cerca de la superficie. Esto se puede observar en Cataldo, 1998 donde se indican medidas realizadas para un mismo piso rugoso con y sin generadores de vorticidad de Counihan corriente arriba del mismo. La presencia de los generadores afecta la región más lejos del piso, con efecto similar al que produce la reja del sistema de simulación utilizado en el presente estudio. En esa referencia se obtienen valores mayores de z_0 al utilizar generadores que cuando estos se quitan, lo cual está de acuerdo con la tendencia que presentan los valores de z_0 de mar hallados en este estudio para la simulación suburbano-mar (con reja, z_0 mayor) y la simulación mar (sin reja, z_0 menor). De manera análoga, cabría esperar un comportamiento similar en prototipo.

Por otra parte, para un terreno suburbano Counihan, 1975 propone valores de z_0 entre 1 y 1.5m, mientras que Biétry et al., 1978 sugiere un z_0 de 0.3m para suburbios y terreno rural y de 1m para pueblos. ESDU, 1985 indica para pueblos, suburbios de ciudades y terrenos densamente arbolados valores del orden de 0.3m para z_0 y alturas del plano de desplazamiento nulo entre 5 y 10m, mientras que Simiu & Scanlan, 1986 propone para suburbios no muy poblados valores de z_0 entre 0.2 y 0.4m y para aquéllos densamente poblados, valores entre 0.8 y 1.2m. Wieringa, 1992 cita valores de 0.5m para terrenos cultivados, con grupos de grandes obstáculos separados por distancias del orden de 10 veces la altura de los mismos, y valores de 1m para terrenos total y uniformemente cubiertos con grupos de objetos grandes de tamaño similar, separados por espacios abiertos del orden de la altura de los obstáculos (poblados y ciudades homogéneas). Esta última descripción se adapta más a la categoría a la

que pertenece el terreno suburbano real simulado. Para terrenos de rugosidad del orden de 1m, Wieringa, 1993 propone valores de d entre 8 y 12m. En la sub-capa logarítmica presente en la capa exterior se había obtenido $z_0 = 3.4\text{mm}$ para $d = 20\text{mm}$. Como menciona Farell & Iyengar, 1999, se ha encontrado que ESDU, 1985 presenta valores bajos de longitudes de rugosidad, en relación con otros autores. Si se descarta el valor propuesto en esta referencia y se ajusta la descripción del sitio que se deseaba modelar, se encuentra que este tipo de terreno presentaría valores de longitud de rugosidad entre 1 y 1.5m. Tomando estos valores para prototipo se obtendría una escala de simulación comprendida entre 1/300 y 1/450, cuyo intervalo contiene a 1/400 (que corresponde a 1.35m). Suponiendo una escala 1/400, el valor hallado de d correspondería a 8m en prototipo, valor razonable para este tipo de terreno.

A pesar de que la distribución de la escala integral en la capa interior y exterior en presencia de un cambio de rugosidad como el estudiado puede diferir de la distribución esperada respectivamente para exposiciones mar y suburbano homogéneas, se presenta a continuación el cálculo de la escala de la simulación a partir de los valores medidos de la escala integral longitudinal en cada capa. Nuevamente se utilizaron los resultados presentados en Counihan, 1975 para calcular los valores de escala integral correspondientes a prototipo. En la capa interior, para $z_0 = 4\text{cm}$ se estimó de esta referencia $C = 87$ y $1/n = 0.21$ y las escalas obtenidas en el intervalo de alturas comprendido en la capa interior se mantuvieron entre 1/1000 y 1/1300 en el caso de estimar la escala integral utilizando el valor del pico espectral, y entre 1/1400 y 1/1700 en el caso de utilizar el valor correspondiente a $f = 0$ Hz del espectro. En la capa exterior, para $z_0 = 1.35\text{m}$ se obtuvo $C = 20.5$ y $1/n = 0.45$. De esta manera se obtuvieron escalas de simulación entre 1/700 y 1/850 en el primer caso y entre 1/900 y 1/1100 en el segundo, para el intervalo de alturas en que la escala integral presenta un comportamiento creciente. En ambas capas se obtuvo entonces escalas integrales menores a las esperadas para una simulación 1/400, comparando con los datos de las referencias disponibles.

Finalmente se presentan distintos cálculos de la altura de la CLI que se tendría 2.5km corriente abajo de un cambio de rugosidad, al pasar de un terreno suburbano con $z_{01} = 1.35\text{m}$ a una exposición mar con $z_{02} = 4\text{cm}$. Se comparan también esos resultados obtenidos con el caso $z_{02} = 2\text{cm}$.

Fórmulas de cálculo	d_I (m)	
	$z_{01} = 1.35\text{m}$ a $z_{02} = 4\text{cm}$	$z_{01} = 1.35\text{m}$ a $z_{02} = 2\text{cm}$
Elliott (4.1.6)	235	210
Panofsky & Dutton (4.1.8)	170	157
Hunt & Simpson (4.1.7)	140	126
Teoría clásica de desarrollo de una capa límite (White)	($k=0.4\text{m}$) 76	($k=0.2\text{m}$) 54

Tabla 7.2.2.3.1 Cálculos de la altura de la capa límite interna, δ_I

Como se presentó en 4.1, tanto Walmsley, 1989 como Theurer et al., 1992 encontraron que el modelo propuesto por Panofsky & Dutton, 1984 se ajustaba mejor que el de Elliott, 1958 a las alturas de algunas CLI estudiadas en la CLA por estos autores. Garratt, 1990 indicaba, por otra parte, que en ambos casos las CLI estudiadas correspondían a distancias relativamente cortas corriente abajo del cambio de rugosidad (hasta los 200m) y en este caso de estudio la distancia simulada corresponde a 2.5km. Así mismo, la fórmula de Hunt & Simpson, 1982 fue derivada para cambios moderados de rugosidad y en este caso se tiene $z_{01}/z_{02} \cong 35$ (para $z_{02} = 4\text{cm}$). Para cambios de rugosidad importantes, tanto Hunt & Simpson, 1982, como con Antonia & Luxton, 1971, indican que la altura de la CLI se estima mejor calculando la altura de una capa límite que se desarrolla sobre una superficie rugosa mediante la teoría clásica. Este cálculo daría alturas del orden de la mitad de las obtenidas siguiendo a Hunt & Simpson, 1982. Se calculó entonces la altura de la capa límite que se desarrollaría sobre el mar luego de 2.5km de exposición siguiendo a White, 1974, para dos alturas k de elementos de rugosidad, 20 y 40cm. Se puede observar en la Tabla 7.2.2.3.1 que en los dos casos las alturas de las CLI calculadas según esta última referencia son del orden de la mitad de las alturas calculadas según Hunt & Simpson, tal como se esperaba. La altura de la CLI obtenida en este estudio se estimó en $\delta_1 = 150\text{mm}$, por lo que tomando una altura de rugosidad para el mar de $k = 0.3\text{m}$ se obtiene una escala de 1/465 y con una altura de rugosidad igual a $k = 0.1\text{m}$ se obtiene una escala de 1/390. La escala 1/400 correspondería a $k = 0.12\text{m}$, valor que podría representar igualmente a la rugosidad del mar.

Discusión

Como ya se indicó, las características cualitativas de las distribuciones de velocidad media, intensidad de turbulencia y escala integral correspondieron a las esperadas en las capas interior y exterior y en la zona de transición durante el desarrollo de una CLI debido a una disminución de la rugosidad del terreno. El espectro de las fluctuaciones turbulentas también presentó el comportamiento esperado. La relación entre los valores de z_0 hallados para mar en esta simulación y en la exposición homogénea mar en 7.2.2.1 concuerda con los resultados indicados en Cataldo, 1998.

En cuanto al exponente de la ley potencial, en la capa interior se obtuvo un valor de n cercano a 0.15. Counihan, 1975 propone para mar índices entre 0.10 a 0.12. La siguiente categoría considera terrenos con pasto corto o de tipo rural, con valores de n comprendidos entre 0.13 y 0.16 y la siguiente categoría considera terrenos suburbanos, con valores entre 0.20 y 0.23. Biétry et al., 1978, por su parte, propone también para mar valores cercanos a 0.10, mientras que para terrenos abiertos propone valores de 0.14 y para suburbios cita valores de este exponente en el entorno de 0.20 a 0.23. Simiu & Scanlan, 1986 cita de ANSI, 1982 $n = 0.10$ para mar y $n = 0.22$ para terrenos suburbanos. El valor obtenido para la capa interior de esta simulación se encuentra entonces algo por encima de los valores citados para mar, presentando la misma tendencia que el valor obtenido de z_0 , lo que podría deberse a las mismas causas. Se debe mencionar adicionalmente que su valor guarda relación con el valor

de longitud de rugosidad hallado para prototipo de 4cm, suponiendo una escala cercana a 1/400, como se puede verificar en la gráfica de Counihan, 1975 que presenta n en función de z_0 para distintos tipos de terreno.

Aunque el valor de z_0 hallado para la sub-capa logarítmica presentada por la capa exterior (1.35m suponiendo una escala 1/400) corresponde a un terreno suburbano como el que se quería modelar, el índice potencial correspondiente a esta capa es algo menor a lo deseado (0.15 en lugar de 0.20), representando más un terreno rural. A una escala 1/400 el valor de z_0 hallado (1.35m) no se corresponde exactamente con este valor de n , sino que se correspondería de mejor manera con $n \cong 0.22$.

Si se calcula la escala de simulación de cada capa a partir de la longitud de rugosidad y de la distribución de la escala integral longitudinal esperada para el caso de terreno homogéneo, las escalas de simulación calculadas presentan diferencias entre sí. Así mismo, seleccionado uno de estos criterios, estas escalas tampoco concuerdan en las dos capas. Para la capa interior se obtendrían escalas entre 1/50 y 1/200 dependiendo de los valores de z_0 seleccionados y entre 1/1000 y 1/1700 analizando las escalas integrales, mientras que para la capa exterior se obtendrían valores entre 1/300 y 1/450 y entre 1/700 y 1/1100, respectivamente. Aunque la escala 1/400 se encuentra comprendida entre los valores máximo y mínimo calculados, se observa la gran variabilidad obtenida al realizar esta comparación. Ahora bien, teniendo en cuenta el resultado indicado en Cataldo, 1998, el valor de z_0 hallado en la capa interior podría llegar a representar un flujo que se desarrolla sobre el mar a escala 1/400, pero que posee un flujo por encima de éste con características muy diferentes. De esta manera, los valores de z_0 hallados en ambas capas representarían correctamente a los terrenos simulados con cambio de rugosidad a escala 1/400. Así mismo, el valor de d hallado para la capa exterior concuerda con el esperado para un terreno suburbano a escala 1/400 y la altura de la CLI hallada concuerda con la altura de una capa límite que se desarrolla sobre 2.5km de mar, a escala 1/400. Sería interesante poder contar con otros resultados que permitieran conocer cómo afecta un cambio de rugosidad a los índices potenciales y a las escalas integrales asociadas a cada tipo de terreno para poder llegar a conclusiones más definitivas.

Finalmente, la intensidad de turbulencia presentada por la capa interior a los 75mm (correspondiente a 30m en prototipo a escala 1/400) fue de 19%, valor en el límite superior, pero comprendido dentro del intervalo esperado para mar, como se indica en Counihan, 1975.

Se concluye entonces, aunque teniendo presente la limitación de información mencionada, que se logró modelar satisfactoriamente un cambio de rugosidad de un terreno suburbano a una exposición tipo mar de 2.5km de longitud.

7.3 Conclusiones

Las medidas de las distribuciones de velocidad media e intensidad de turbulencia longitudinal que presenta la zona de trabajo del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería cuando ésta se encuentra vacía, las cuales fueron presentadas en el capítulo 7.2.1, permitieron corroborar la metodología empleada para el diseño aerodinámico de los distintos componentes del túnel y verificar que el diseño constructivo también había sido adecuado. Por otra parte, los valores máximos medidos de la no-uniformidad de la velocidad media y de la intensidad de turbulencia que presenta el flujo se encuentran dentro de lo recomendado para túneles de viento tipo CLA. A partir de los resultados citados se esperaba lograr simulaciones exitosas de flujos tipo CLA desarrollados a lo largo de la zona de trabajo, como se pudo corroborar en el capítulo 7.2.2. Así mismo se pudo verificar que el túnel de viento presenta características adecuadas para calibrar anemómetros.

El análisis realizado a los tres flujos tipo CLA que fuera presentado en 7.2.2 permitió concluir que en los tres casos sus características se correspondieron satisfactoriamente con las esperadas para los tipos de exposición indicados en la Figura 7.2.2.1, a una escala cercana a 1/400, a pesar de las dificultades usualmente encontradas para lograr la obtención simultánea de distribuciones correctas de velocidad, intensidad de turbulencia y energía turbulenta en altura y frecuencias, como había sido indicado previamente en 5.2.

En particular, la técnica de simulación adoptada fue exitosa al reproducir el perfil de velocidades medias y las características de la turbulencia de una capa límite representativa de un terreno urbano, estas últimas tanto en su distribución en altura como en frecuencia. Los análisis realizados tanto de la longitud de rugosidad como de la distribución de la escala integral longitudinal indican que se logró modelar adecuadamente las características principales de una capa límite de este tipo a escalas cercanas a 1/400.

En el caso de la simulación mar, se debe señalar que también se obtuvo distribuciones de velocidad media, intensidad de turbulencia y escala integral de la turbulencia cualitativamente correctas. Los parámetros característicos del perfil de velocidades medias logrado son correctos y la escala de la simulación calculada a partir de la longitud de rugosidad y de las escalas integrales es cercana a 1/400.

En cuanto a la simulación del terreno suburbano-mar, se puede concluir que las características presentadas por el flujo modelado concuerdan con el desarrollo de una capa límite interior como consecuencia de una disminución de rugosidad en el sentido del flujo. Las distribuciones de velocidad media, intensidad de turbulencia y escala integral mostraron las características cualitativas esperadas, tal como las indicadas por autores como Antonia & Luxton, 1972 o Garratt, 1990. Aunque se obtuvo algunas diferencias entre los índices potenciales y las escalas integrales obtenidas y las indicadas en la bibliografía para terrenos homogéneos, se pudo concluir que tanto la capa interior como la capa exterior de esta

simulación corresponden razonablemente a una escala de simulación 1/400.

Como conclusión general se puede indicar entonces que el método de simulación utilizado permite reproducir adecuadamente las características de capas límites atmosféricas que se desarrollan sobre terrenos de características muy diferentes e inclusive simular cambios de rugosidad. En general se logran distribuciones de velocidad, intensidad de turbulencia y escala integral adecuadas en altura, y distribuciones de la energía turbulenta en frecuencia similares a las representativas de distintos tipos de terrenos. Se debe mencionar adicionalmente que el método de simulación utilizado fue desarrollado principalmente para modelar la sub-capa logarítmica, pero con éste se logra también simular parcialmente la sub-capa potencial, como se pudo observar en los tres casos. Por lo tanto, el método de simulación empleado se puede utilizar para realizar estudios relacionados con la interacción entre el viento y distintos obstáculos no aerodinámicos sumergidos en la sub-capa logarítmica o algo más altos, donde se deba modelar la distribución de velocidad media, intensidad de turbulencia, escala integral y/o la distribución de la energía turbulenta en frecuencia.

Se concluye entonces que las características que presenta el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República permiten simular con facilidad flujos atmosféricos de muy variadas características.

8. Anexo

El funcionamiento de un anemómetro de hilo/lámina caliente de temperatura constante se basa en un sensor cuya temperatura se mantiene en un valor constante y elevado a través de un puente de Wheatstone. Este sensor básicamente pierde calor debido al pasaje de fluido cerca del mismo y recibe calor por efecto Joule de la corriente eléctrica que circula por él. La cantidad de energía eléctrica disipada en el sensor para mantener su temperatura constante es una medida del enfriamiento y se puede vincular con la velocidad del flujo que afecta al mismo, tal como se indica en Hinze, 1975.

En las condiciones más generales de funcionamiento el enfriamiento del sensor se realiza por convección forzada. Una de las fórmulas existentes para expresar el calor intercambiado cuando se alcanza el equilibrio térmico es la siguiente:

$$I^2 \cdot R_{op} = \frac{\pi \cdot l \cdot k}{b} \cdot \frac{(R_{op} - R_{\infty})}{R_0} \cdot [0.42 \cdot (Pr)_f^{0.20} + 0.57 \cdot (Pr)_f^{0.33} \cdot (Re)_f^{0.50}] \quad (8.1)$$

donde:

I es la corriente eléctrica que circula por el sensor

R_{op} es la resistencia del sensor a la temperatura a la que se encuentra el sensor, T_{op}

R_{∞} es la resistencia del sensor a la temperatura a la que se encuentra el fluido, T_{∞}

R_0 es la resistencia del sensor a una temperatura de referencia T_0

b es una constante de proporcionalidad. ($R(T) = R_0(1 + b(T - T_0) + b_1 \cdot (T - T_0)^2 + \dots)$)

l es la longitud del sensor

k es la conductividad térmica del fluido

Pr es el número de Prandtl del fluido

$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\mu}$ es el número de Reynolds del fluido, referido al diámetro d del sensor y a la

velocidad media del fluido, U , que se supone perpendicular al sensor, y ρ y μ , la densidad y la viscosidad dinámica del fluido, respectivamente.

En este caso, las propiedades del fluido se deberían evaluar a la temperatura de film $T_f = \left(\frac{T_{\infty} + T_{op}}{2} \right)$, según indica Hinze, 1975.

La ecuación anterior se puede describir en función de la salida de tensión del puente $E = R_{op} \cdot I$, que es lo que generalmente indica el anemómetro.

Por otra parte, se puede ver que la expresión (8.1) es análoga a la siguiente:

$$\frac{I^2 \cdot R_{op}}{R_{op} - R_{\infty}} = A + B \cdot (U)^{\frac{1}{2}} \quad (8.2)$$

donde A y B toman las siguientes expresiones:

$$A = 0.42 \cdot \frac{\pi \cdot l \cdot k}{b \cdot R_0} \cdot (\text{Pr})_f^{0.20}$$

$$B = 0.57 \cdot \frac{\pi \cdot l \cdot k}{b \cdot R_0} \cdot (\text{Pr})_f^{0.33} \cdot \left(\frac{\rho \cdot d}{\mu}\right)^{0.50}$$

El número de Prandtl es prácticamente independiente de la temperatura, mientras que $k \cdot \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^n$ depende sólo muy levemente de la temperatura para n cercanos a 0.5, en particular para el aire. Por estas razones, de los factores A y B que aparecen en (8.2), sólo A, que sería directamente proporcional a k , es sensible a cambios de temperatura.

En investigaciones más recientes se ha tratado al exponente de valor $\frac{1}{2}$ que aparece en (8.2) como una variable, tal como se menciona en Bruun, 1995.

Por otra parte, se puede deducir la siguiente relación entre la componente fluctuante de la velocidad, u' , y la componente fluctuante de la tensión indicada por el anemómetro, e' , siguiendo a Smol'yakov & Tkachenko, 1983:

$$\sqrt{u'^2} = \frac{\sqrt{e'^2}}{\frac{\partial E}{\partial U}} = \frac{4 \cdot E \cdot \sqrt{e'^2} \cdot \sqrt{U}}{B \cdot R_{op} \cdot (R_{op} - R_{\infty})}$$

Estas relaciones son válidas cuando la componente fluctuante de la velocidad es pequeña frente a la velocidad media (teoría lineal). Cuando la intensidad de turbulencia es alta, tanto la velocidad media como la componente fluctuante de la velocidad deducidas a partir de la medida de la tensión media y su componente fluctuante están sujetas a distorsiones.

En realidad, en lugar de considerar únicamente el aporte de la velocidad media U al enfriamiento del sensor, se deben tener en cuenta adicionalmente las componentes fluctuantes de la velocidad transversales al flujo medio, tal como indica Hinze, 1975. Como el sensor es sensible a las componentes de velocidad perpendiculares a éste esencialmente, y la componente paralela al mismo sólo tiene efecto apreciable sobre el enfriamiento cuando ésta es muy grande, se define una velocidad efectiva que afecta al sensor de la siguiente manera:

$$U_{ef} = \sqrt{(U + u')^2 + v'^2} \quad (8.3)$$

donde:

$U_{ef} \equiv U_{lin}$ es la velocidad media que se mediría mediante la teoría lineal

u' es la componente fluctuante longitudinal de la velocidad

v' es la componente fluctuante lateral de la velocidad perpendicular al sensor

Desarrollando (8.3) en series se obtiene:

$$U_{ef} = U \cdot \left(1 + \frac{u'}{U} + \frac{v'^2}{2 \cdot U^2} - \frac{u' \cdot v'^2}{2 \cdot U^3} + \dots \right) \quad (8.4)$$

La tensión indicada por el anemómetro se relacionaría, entonces, con:

$$\sqrt{U_{ef}} = \left[(U + u')^2 + v'^2 \right]^{\frac{1}{4}} = \sqrt{U} \cdot \left(1 + \frac{u'}{2 \cdot U} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u'^2}{U^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{v'^2}{U^2} + \frac{1}{16} \cdot \frac{u'^3}{U^3} + \dots \right) \quad (8.5)$$

Promediando (8.5) se obtiene:

$$\overline{\sqrt{U_{ef}}} = \sqrt{U} \cdot \left(1 - \frac{1}{8} \cdot \frac{\overline{u'^2}}{U^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\overline{v'^2}}{U^2} + \frac{1}{16} \cdot \frac{\overline{u'^3}}{U^3} + \dots \right), \quad (8.6)$$

por lo que se podría corregir la velocidad media calculada mediante la teoría lineal de la siguiente manera:

$$U_{lin} \equiv U \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{\overline{u'^2}}{U^2} + \frac{\overline{v'^2}}{2 \cdot U^2} \right) \quad (8.7)$$

El siguiente término de la serie es menor a 0.02, incluso para flujos muy turbulentos. La distorsión causada por los dos términos que se dejaron se puede detectar, por ejemplo, en flujos con separación, en la parte exterior de chorros y estelas y en capas límites.

Por otra parte, sustituyendo (8.5) en (8.2) se obtiene:

$$\frac{I^2 \cdot R_{op}}{R_{op} - R_{\infty}} = A + B \cdot \sqrt{U_{ef}} = \left[A + B \cdot \sqrt{U} \cdot \left(1 + \frac{u'}{2 \cdot U} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u'^2}{U^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{v'^2}{U^2} + \dots \right) \right] \quad (8.8)$$

Y sustituyendo R_{op} por $\overline{R_{op}} + r_{op}$ y promediando, se obtiene una expresión para $I^2 \cdot \overline{R_{op}}$. $\overline{R_{op}}$ es el valor medio real de la resistencia del sensor a la temperatura de operación y r_{op} , su componente fluctuante.

Se puede ver que $\overline{R_{op}}$ difiere del valor medio de la resistencia que se obtendría de acuerdo a la teoría lineal, $\overline{R_{op, lin}}$, por lo que (8.2) se debería describir de la siguiente manera:

$$I^2 \overline{R}_{op\ lin} = (A + B \cdot \sqrt{U}) (\overline{R}_{op\ lin} - R_\infty)$$

Luego de ciertas operaciones, de las expresiones anteriores se puede deducir una relación para corregir el valor de intensidad de turbulencia calculado a partir de la teoría lineal, como se muestra en Hinze, 1975:

$$\left(\frac{\overline{u'^2}}{U^2} \right)_{lin} = \left(\frac{\overline{u'^2}}{U^2} \right)_{corr} \cdot [1 - \Psi(u', v')] \quad (8.9)$$

En esta expresión, $\Psi(u', v')$ es una función de los valores medios de u'^2 , v'^2 y de las correlaciones $u'^m \cdot v'^n$, donde m y n son números enteros. De aquí se deduce que lo que realmente se mide como componente fluctuante de la velocidad es una combinación entre la componente u' y la componente v' .

Para estimar el error que se comete al calcular la intensidad de turbulencia longitudinal de acuerdo a la teoría lineal, se puede estimar $\Psi(u', v')$ para casos particulares de flujos turbulentos.

En el caso de turbulencia unidimensional ($v' = 0$), suponiendo que u' tiene distribución Gaussiana, se puede mostrar que:

$$\Psi(u', v') \cong -\frac{27}{8} \cdot \frac{\overline{u'^2}}{U^2} \quad (8.10)$$

Para el caso de turbulencia isotrópica, suponiendo que u' y v' se distribuyen de forma Gaussiana y que estas componentes están normalmente correlacionadas, se tendría:

$$\Psi(u', v') \cong -\frac{19}{8} \cdot \frac{\overline{u'^2}}{U^2} \quad (8.11)$$

Se observa que en estos dos casos $\Psi(u', v')$ toma valores negativos. Esto quiere decir que la teoría lineal da valores altos de intensidad de turbulencia. Por ejemplo, cuando la intensidad de turbulencia es del 20%, el error cometido sería del 13% en el caso de turbulencia unidimensional y del 10% para el caso de turbulencia isotrópica.

Cuando la intensidad de turbulencia es alta, se utilizan las ecuaciones (8.9), (8.10) y (8.11) para corregir los cálculos efectuados mediante la teoría lineal si se puede suponer que la turbulencia es unidimensional o isotrópica. Esto se hace necesario si no se cuenta con una unidad de linealización especial, tal como se indica en Smol'yakov & Tkachenko, 1983.

Nomenclatura

a : constante que interviene en expresión de cálculo de la altura de la sub-capa logarítmica

a, b : constantes que intervienen en la ley logarítmica

b, b_1 : constantes de proporcionalidad entre la resistencia de un material y la temperatura

A, B : constantes que intervienen en ley de intercambio de calor entre probeta de hilo caliente y fluido

c : constante que interviene en expresión de cálculo de la altura de la sub-capa logarítmica

C : parámetro que interviene en expresión de cálculo de la escala integral longitudinal de la turbulencia, siguiendo a Counihan, 1975

c_p : calor específico a temperatura constante

d : altura del plano de desplazamiento nulo

d : diámetro de sensor

e' : componente fluctuante de la tensión entre extremos de probeta de anemómetro de hilo caliente

E, E_1, E_2 : tensión entre extremos de hilo(s) de anemómetro de hilo caliente

E_c : número de Eckert

f : frecuencia

f : parámetro de Coriolis

f^* : frecuencia correspondiente a máximo de espectro de potencia adimensionado

g : aceleración de la gravedad

H : altura de referencia

I_u, I_v, I_w : intensidad de turbulencia longitudinal, lateral y vertical, respectivamente

k : altura de los elementos de rugosidad

k : conductividad térmica

l : longitud de sensor

L : longitud característica

L_u^x : escala integral longitudinal de la turbulencia

n : índice de la ley potencial,

n : exponente de la ley de intercambio de calor entre probeta de hilo caliente y fluido

N_i : número de muestra

p : presión

Pr : número de Prandtl

R : resistencia

Re : número de Reynolds

Ri : número de Richardson

Ro : número de Rossby

S : espectro longitudinal de potencia

St : número de Strouhal

- T: temperatura media local
t: tiempo característico
U, V, W: componentes longitudinal, lateral y vertical de la velocidad media, respectivamente
 U_{ef} : velocidad efectiva que afecta a sensor de anemómetro
 U_{ref} : velocidad media de referencia
 u' , v' , w' : componentes fluctuantes longitudinal, lateral y vertical de la velocidad, respectivamente
 u_* : velocidad de fricción
x, y: suma y resta respectivamente de E_1 y E_2
x, y, z: coordenadas
Y: frecuencia adimensionada
z: altura
 z_L : altura de la sub-capa logarítmica
 z_0 : longitud de rugosidad
 z_r : altura de la sub-capa rugosa
1/n: parámetro que interviene en expresión de cálculo de la escala integral longitudinal de la turbulencia, siguiendo a Counihan, 1975
- α : constante de Kolmogorov, coordenada de sistema de posicionamiento de túnel de viento MTL
 β : parámetro que depende de z_0
 ε : disipación de la turbulencia
 δ : altura de la Capa Límite Atmosférica
 δ_I : altura de la capa límite interior
 Δ : diferencia
 ϕ : latitud
 φ : coordenada de sistema de posicionamiento de túnel de viento MTL
 κ : constante de von Karman
 λ_e : distancia entre los elementos de rugosidad
 μ : viscosidad dinámica del fluido
 ρ : densidad de masa
 ψ : término de corrección para la intensidad de turbulencia
 τ : tensión rasante
 t : escala integral temporal de la turbulencia
v: viscosidad cinemática
 Ω : velocidad angular de rotación
()_{corr}: valor corregido
()_{ef}: valor efectivo
()_f: relativo a la temperatura de film
()_H: relativo a la altura H

- ()_I: relativo a la capa límite interior
- ()_{lin}: relativo a la teoría lineal
- ()_M: valor en modelo
- ()₀: valor de referencia
- ()_{op}: relativo a la temperatura de operación
- ()_P: valor en prototipo
- ()_r: relativo a la rugosidad
- ()₁: corriente arriba de un cambio de rugosidad
- ()₂: corriente abajo de un cambio de rugosidad
- ()_δ: relativo a la altura de la CLA
- ()_∞: relativo a la temperatura en un punto alejado de sensor de anemómetro
- ($\bar{\quad}$): promediación en el tiempo

Referencias bibliográficas

- AAMA 1985. Design windloads for buildings and boundary layer wind tunnel testing, *AAMA Aluminum curtain wall series*, 11.
- Arya, S.P.S., 1981. Parameterizing the height of the stable atmospheric boundary layer, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, n°10, pp. 1192-1202.
- Antonia, R.A. & Luxton, R.E., 1971. The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness Part 1. Smooth to rough, *J. Fluid Mech.*, 48, 4, pp. 721-761.
- Antonia, R.A. & Luxton, R.E., 1972. The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness Part 2. Rough to smooth, *J. Fluid Mech.*, 53, 4, pp. 737-757.
- Biétry, J., Sacré, C. and Simiu, E., 1978. Mean wind profiles and change of terrain roughness, *Jour. Struct. Div.*, ASCE 104, pp. 1585-1593.
- Bradshaw, P. & Pankhurst, R.C., 1964. The design of low-speed wind tunnels, National Physical Laboratory Aero Report 1039.
- Bruun, H.H., 1995. Hot-wire anemometry: principles and signal analysis, Oxford University Press Inc., New York, USA.
- Bryer, D.W. & Pankhurst, R.C., 1971. Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction, National Physical Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, Campfield Press, London.
- Cataldo, J., 1990. Simulación de un flujo tipo capa límite atmosférica, XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, 1990.
- Cataldo, J., 1992. "Simulación física de flujos tipo Capa Límite Atmosférica", tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada presentada en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, diciembre 1992.
- Cataldo, J., 1998. "Estudio de flujos vorticosos alrededor de obstáculos y en difusores", tesis de Doctorado en Mecánica de los Fluidos Aplicada presentada en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 1998.
- Cataldo, J. y Durañona, V., "Construcción de un túnel de viento abierto tipo capa límite", 3ª Reunión del Grupo de Trabajo sobre Hidromecánica, División Latinoamericana de la IAHR, Mendoza, Argentina, octubre 23-26, 1995.
- Cataldo, J. y Durañona, V., 1996. Construcción de un túnel de viento abierto tipo capa límite, Informe del Proyecto BID-CONICYT n°113, junio, 1996.
- Cataldo, J. and Durañona, V., 1998. Open boundary-layer wind tunnel built in Uruguay", Transactions of the Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Gramado RS, Brazil, mayo 25-29 1998, ed. by Loredó-Souza.
- Cermak, J.E., 1975. Applications of fluid mechanics to wind engineering – a Freeman scholar lecture, *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, pp. 9-38, March 1975.
- Cermak, J.E., ASCE, F., 1981. Wind tunnel design for physical modelling of atmospheric boundary layer, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, 107, n° EM3, pp. 623 - 642.
- Cermak, J.E., ASCE, F., 1987. Advances in physical modelling for wind engineering,

Journal of Engineering Mechanics, 113, nº 5, pp. 737 - 756.

Cook, N.J., 1973. On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel, *Atm. Env.*, 7, pp. 691-705.

Cook, N.J., 1978. Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, *Journal of Industrial Aerodynamics*, 2, pp. 311-321.

Counihan, J., 1975. Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from period 1880-1972, *Atm. Env.*, 79, pp. 871-905.

Csanady, G.T., 1964. Theory of Turbo-machines, McGraw-Hill Co., New York.

Davenport, A.G., 1960. Rationale for determining design wind velocities, *Journ. of the Struct. Div., Proc. of the ASCE*, ST 5, pp.39-68.

Dryden, H. & Schubauer, G.B., 1947. The use of damping screens for the reduction of wind-tunnel turbulence, *Journal of Aeronautical Science*, pp. 221-228.

Durañona, V. y Cataldo, J., "Evaluación del funcionamiento del nuevo Túnel de Viento de la Facultad de Ingeniería", 5ª Reunión del Grupo de Trabajo sobre Hidromecánica, Montevideo, Uruguay, mayo 11-14, 1999.

Elliott, W.P., 1958. The growth of the atmospheric internal boundary layer, *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 39, 1048-1054.

ESDU, 73024, 1980. Performance of conical diffusers in incompressible flow, *Royal Aeronautical Society*, Engineering Science Data Unit.

ESDU, 1985. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere), Item Number 85020.

Fang, 1989. Flow characteristics in three-dimensional channel contraction", Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, Oct. 1989.

Farell, C. & Iyengar, A.K.S., 1994. Time series analysis with application to velocity fluctuation data measured in a wind tunnel atmospheric boundary layer, Project Report No. 363, October 1994.

Farell, C. & Iyengar, A.K.S., 1999. Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, pp. 11-35.

Garratt, J.R., 1990. The internal boundary layer - a review, *Boundary Layer Meteorology*, 50, pp. 171-203.

Gartshore, I.S., 1973. A relationship between roughness geometry and velocity profile shape for boundary-layers, Report LTR-LA-140, Lab. Order NAE-1305, file 4011-2, National Aeronautical Establishment, Canada, October, 1973.

Gorecki, J.P., 1998. Wind tunnel design and applications, Proceedings of the Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Porto Alegre, Brasil, 25-29 mayo 1998.

Groth, J., and Johansson, V., 1988. Turbulence reduction by screens, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 197, pp.139-155.

Hama, F.R., 1954. Boundary-layer characteristics for smooth and rough surfaces, *Annual Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Nov. 10-13, New York.

Harris, I., 1969. Measurements of wind structure at heights up to 598ft. above ground level, Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures Organized by Loughborough University of Technology, National Physical Laboratory, Royal Aeronautical Society.

Hinze, J.O., 1975. Turbulence. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2nd ed., New York.

Holmes, J.D., 2001. Wind loading of structures, Spon Press, USA and Canada, pp. 139-146.

Holton, J.R., 1992. An introduction to dynamical meteorology, 3rd ed., Academic Press, New York.

Hunt, A., 1982. Wind-tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10, pp. 137-163.

Hussain, A. K. M. F. and Ramjee, V., 1976. Effects of the axysimmetric contraction shape on incompressible turbulent flow, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, pp. 342-353.

Iyengar, A.K.S. & Farell, C., 2001. Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral scale determination, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, pp. 1059-1080.

Jensen, M., 1958. The model law for phenomena in the natural wind, *Ingenioren*, vol. 2, pp. 121-128, Denmark.

Jackson, P.S., 1981. On the displacement height in the logarithmic velocity profile, *J. Fluid Mech.*, vol. 111, pp. 15-25.

Johansson, A. V., 1992. A low speed wind-tunnel with extreme flow quality-design and tests, Prog. ICAS congress 1992, pp. 1603-1611. ICAS-92-3.8.1.

Lumley, J.L. & McMahon, J.F., 1967. Reducing water tunnel turbulence by means of a honeycomb, *Journal of Basic Engineering – Transactions of ASME*, pp. 764-770.

Lumley, J.L. & Panofsky, H.A., 1964. The structure of atmospheric turbulence. Interscience Publishers, John Wiley & Sons, New York.

Marshall, R.D., 1985. Performance requirements and preliminary design of a boundary layer wind tunnel facility, NBSIR 85-3168, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.

Miller, D.S., 1978. Internal flow systems, *BHRA Fluid Engineering Series*, vol. 5.

Morel, T., 1976. Comprehensive design of axysimmetric wind tunnel contractions, ASME Publication, Feb. 1976.

Neal, D., 1982. Full scale measurements of the wind regime over a saddle and correlation with wind-tunnel tests, *Boundary Layer Meteorology*, 22, pp. 351-371.

Necco, G.V., 1980. Curso de cinemática y dinámica de la atmósfera, EUDEBA, Argentina.

OMM, N°622. Compendio de apuntes sobre instrumentos meteorológicos para la formación del personal meteorológico de las clases III y IV, volumen I, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.

Österlund, J.M., 1999. Experimental studies of zero pressure-gradient turbulent boundary layer flow, Doctoral Thesis, Department of Mechanics, Royal Institute of Technology,

Stockholm, Sweden.

Pankhurst, R.C. & Holder, D.W., 1952. Wind-tunnel technique. An account of experimental methods in low- and high-speed wind tunnels, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd, London.

Panofsky, H.A. and Dutton, J.A., 1984. Atmospheric Turbulence: models and methods for engineering applications, John Wiley & Sons, New York.

Pedlosky, J., 1986. Dynamic meteorology, D. Reidel Publishing Co., Netherlands.

Plate, E.J., 1982. Wind tunnel modelling of wind effects in engineering, Engineering Meteorology, Elsevier, Amsterdam, Plate, E.J. (Ed.).

Plate, E.J., 1999. Methods of investigating urban wind fields – physical models, *Atmospheric Environment*, 33, pp. 3981-3989.

Pope, A., 1947. Wind-tunnel testing, John Wiley & Sons, London.

Rae, W. & Pope, A., 1984. Low-speed wind tunnel testing, Ed. John Wiley & Sons.

Ramjee, V. and Hussain, A. K. M. F., 1976. Influence of the axis-symmetric contraction ratio on free-stream turbulence, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, pp. 506-515.

Raupach, M.R., Antonia, R.A. and Rajagopalan, S., 1991. ASME Book No. AMRO84, *Appl. Mech. Rev.*, 44, n°1, pp. 1-25.

Schlichting, H. 1979. Boundary layer theory. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 7th ed., New York.

Schubauer, G.B., Spangenberg, W.G. and Klebanoff, P.S., 1948. Aerodynamic characteristics of damping screens, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 2001.

Sédille, M., 1973. Ventilateurs et compresseurs centrifugues et axiaux, Masson et Cie Editeurs, Paris.

Simiu, E. and Scanlan, R.H., 1986. Wind Effects on structures: An introduction to wind engineering, John Wiley & Sons, 2nd ed, NY.

Smol'yakov, A.V., Tkachenko, V.M. 1983. The measurement of turbulent fluctuations. An introduction to hot-wire anemometry and related transducers, Springer-Verlag, Germany, p. 74, p. 118.

Stepanoff, A.J., 1948. Leakage loss and axial thrust in centrifugal pumps, ASME Transactions.

Tan-Atichat, J., Nagib, H.M., Loehrke, R.I., 1982. Interaction of free-stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales, *Journal of Fluid Mechanics*, 114, pp. 501-528.

Tennekes, H. and Lumley, J.L., 1972. A first course in turbulence, MIT Press, Cambridge.

Theurer, W., Baechlin, W. and Plate, E.J., 1992. Model study of the development of boundary layers above urban areas, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, pp. 437-448.

Tieleman, H. W., 1992. Pressure on surface-mounted prisms: the effects of incident turbulence”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Proc. 2nd Int. Coll. Bluff Body Aerodyn. and its Appl., Melbourne, Australia, pp. 7-10.

Uberoi, M.S., 1955. Effect of wind-tunnel contraction on free-stream turbulence, *Journal of Aeronautical Science*, pp. 754-764.

Walmsley, J.L., 1989. Internal boundary layer height formulae – a comparison with atmospheric data, *Boundary Layer Meteorology*, 47, pp. 251-262.

Wang, Z.Y., Plate, E.J., Rau, M. and Keiser, R., 1996, Scale effects in wind tunnel modeling, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 61, 113-130.

Ward-Smith, A.S., 1980. Internal fluid flow: the fluid dynamic of flow in pipes and ducts, Clarendon Press, Oxford.

White, F.M., 1974. Viscous fluid flow, McGraw-Hill Book Co., Inc., NY.

Wieringa, J., 1992. Updating the Davenport roughness classification, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 41, pp. 357-368.

Wieringa, J., 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrain, *Boundary Layer Meteorology.*, 63, pp. 323-363.