

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO TURBULENTO CORRESPONDIENTE A UN RELIEVE TOPOGRÁFICO EN LA PROVINCIA DE SALTA**

Mario E. De Bortoli<sup>1</sup>, Jorge O. Marighetti<sup>1</sup>, Adrián R. Wittwer<sup>1</sup>, Irene De Paul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727, (3500), Resistencia, Chaco [a\\_wittwer@yahoo.es](mailto:a_wittwer@yahoo.es)

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta. Salta.  
Av. Bolivia 5150. (4400). Salta. [depaul@unsa.edu.ar](mailto:depaul@unsa.edu.ar)

**RESUMEN.** En este trabajo, a partir de ensayos en un túnel de viento, se analizan las características del viento atmosférico sobre un relieve topográfico correspondiente al lugar de emplazamiento de un recinto cuyo comportamiento térmico está siendo estudiado. El análisis se realiza mediante un modelo a escala reducida del relieve topográfico, considerando un viento de fondo cuyas características se adecuan a las del viento atmosférico para la zona. La escala geométrica del modelo topográfico está definida por el factor de escala de la simulación del viento atmosférico de fondo, y permite reproducir en el túnel de viento las características que tienen relevancia aerodinámica. Para el análisis, se determinaron las principales características de la turbulencia del flujo en las proximidades a la zona de emplazamiento del recinto, incluyendo perfiles de intensidad de turbulencia, espectros e histogramas de frecuencias relativas. Los resultados permiten apreciar la influencia de la topografía en las características de la turbulencia del viento atmosférico e inferir las condiciones a representar en un futuro modelo a una mayor escala.

**Palabras claves:** Turbulencia, Relieve topográfico, Túnel de viento.

### **INTRODUCCIÓN**

La optimización de recursos energéticos, vinculada a los procesos de disipación térmica en recintos cerrados, sufre una gran influencia de la acción del viento. En estos procesos es importante considerar las características de la turbulencia del escurrimiento del aire en torno al recinto. La energía térmica que se pierde por acción del viento turbulento es diferente de aquella que surge de considerar condiciones externas estáticas, e inclusive de la obtenida considerando escurrimientos externos laminares.

Estudios realizados con anterioridad, permitieron analizar los procesos de circulación que se establecen en el interior de recintos cerrados por acción de la convección natural y los coeficientes de transferencia térmica hacia el exterior en condiciones externas estáticas (De Paul, y otros 1992; Hoyos y De Paul, 1994; De Paul y Vilte 1995, 1996; Vilte y otros, 1998; Vilte y De Paul, 1997, 2000; De Paul, 2000). En estos trabajos se utilizaron técnicas de visualización de flujo en modelos a escala reducida en agua. Posteriormente, comenzaron a implementarse estudios a escala real en una vivienda de estructura simple, que posee la Universidad de Salta en la localidad de Payogasta, en los valles calchaquíes, y simultáneamente, a partir de un convenio de cooperación firmado entre la UNSa y la UNNE, empezaron a desarrollarse modelos a escala reducida y ensayos en el túnel de viento de capa límite de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.

Es importante señalar que los primeros ensayos en túnel de viento con simulación de las características del viento atmosférico para analizar efectos sobre edificaciones, se realizaban sobre modelos aislados. Posteriores comparaciones de resultados obtenidos en túnel de viento con mediciones realizadas a escala natural determinaron la importancia de reproducir además el entorno inmediato a la estructura en estudio, debido a las modificaciones introducidas en la estructura del flujo circundante y en los efectos que provoca. Al comparar el campo de velocidades medias y fluctuantes, expresado mediante los parámetros turbulentos, correspondiente a mediciones en el túnel y escala natural, las principales diferencias se expresan en el déficit de velocidades medias y la variación de la distribución de la intensidad de la turbulencia. La variación del flujo en escala natural respecto al que se produce en un túnel de viento son minimizadas mediante la incorporación de modelos representativos del entorno inmediato a la estructura. El caso analizado corresponde al flujo que se produce en torno a un modelo aislado, pero su ubicación en un terreno de características topográficas particulares seguramente provoca alteraciones sensibles al flujo de fondo, y se considera necesario verificar si las modificaciones a los parámetros turbulentos se limitan a la distribución de la intensidad de la turbulencia, como usualmente ocurre en los ensayos en túnel de viento que consideran las perturbaciones del entorno inmediato, o si se extienden a alteraciones del espectro de turbulencia.

El proyecto al que se encuentra vinculado este trabajo fue planteado en varias etapas y comenzó con la determinación de las características del viento atmosférico propio de un terreno de características agrícolas mediante una simulación en el túnel de viento. Luego, a partir de un relevamiento topográfico de la zona de emplazamiento de la vivienda a estudiar, se construyó un

modelo a escala 1/150 y se determinó la distribución de velocidades medias en esa zona, considerando las perturbaciones introducidas por el relieve topográfico (Marighetti et al., 2003).

En este trabajo se presentan los resultados de la segunda etapa que consiste en el análisis experimental de las principales características de la turbulencia del flujo en las proximidades a la zona de emplazamiento del recinto, a partir de mediciones de las velocidades fluctuantes. Se analizan los perfiles de intensidad de turbulencia, espectros e histogramas de frecuencias relativas con el objeto de construir un modelo de mayores dimensiones que permita un análisis aerodinámico con mayor nivel de detalle. Los resultados permiten apreciar la influencia de la topografía en las características de la turbulencia del viento atmosférico y plantear algunas pautas para las condiciones a tener en cuenta para la reproducción del flujo circundante en el futuro modelo a mayor escala.

### DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El recinto a estudiar pertenece a la UNSa y está ubicado en Payogasta, a 147 km al OSO de la ciudad de Salta, a una altura de 2410 msn, en un cañadón orientado en la dirección este-oeste que desemboca sobre el río Calchaquí. Las barrancas laterales tienen una altura que varía desde los 8m al norte hasta unos 20 m al sur, y constituyen un cañón natural de aproximadamente 90 metros de ancho y 400 metros de longitud. En el extremo este del cañón está emplazada la casa, frente a la que se extiende campo destinado a agricultura. Si bien en la zona son predominantes los vientos de la dirección N y NO, las características topográficas del cañadón modifican las condiciones del escurrimiento haciendo que la dirección de incidencia del viento sobre la vivienda sea preferentemente desde el río. En las fotografías de la Figura 1 se muestra la vivienda y una parte del relieve topográfico circundante a escala real y el modelo ubicado en la cámara de ensayos del túnel de viento. La descripción de las características relevantes del relieve topográfico se complementa con el esquema de la Figura 2.

Los ensayos fueron realizados en el túnel de viento de capa límite Prof. Jacek P. Gorecki de la Universidad Nacional del Nordeste, que es de circuito abierto y tiene una cámara de ensayos de 2,40 m de ancho  $\times$  1,80 m de altura  $\times$  22,80 m de longitud (Wittwer & Möller, 2000). El escurrimiento en la capa límite atmosférica, que denominaremos viento de fondo, fue simulado mediante el método de rugosidad superficial y dispositivos de mezcla (Standen, 1972). El modelo topográfico fue construido con una escala geométrica de 1/150, en correspondencia con el factor de escala de simulación del viento de fondo. En la fotografía de Figura 1 se muestra el modelo del relieve topográfico en el túnel de viento con el dispositivo de posicionamiento para ubicar los sensores de medición de velocidades medias y fluctuantes.

La turbulencia, desde el análisis experimental es considerada un fenómeno aleatorio, y requiere una evaluación estadística de las fluctuaciones de velocidad que la originan. Los parámetros utilizados para caracterizar este fenómeno son, entre otros, la intensidad de turbulencia y los espectros de potencia. La intensidad de turbulencia es una medida adimensional de la energía de las fluctuaciones de velocidad  $u$ , y está definida por el cociente entre la desviación estándar o valor rms de las fluctuaciones  $\sigma_u$  y una velocidad media de referencia. La intensidad local de turbulencia se obtiene mediante la expresión:

$$I_u = \sigma_u / U \quad (1)$$

La función de densidad auto-espectral o espectro de potencia, representa la variación del valor cuadrático medio de una función del tiempo  $x(t)$ , dada por una serie continua adquirida con un intervalo de tiempo  $t$ , como una función de la frecuencia y queda expresada por:

$$F_{xx}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x^2(f, B_e, t) dt \quad (2)$$

donde  $B_e$  es el ancho de banda (resolución del espectro) y  $T$  un tiempo de integración adecuado (Möller, 1988). Cuando se analiza espectralmente un escurrimiento turbulento se obtiene el espectro de turbulencia, y la función  $x(t)$  es la fluctuación de velocidad  $u(t)$ . En este caso, el espectro representa la distribución en frecuencias de la energía de las fluctuaciones.

Para la medición de las velocidades fluctuantes se usó un anemómetro de hilo caliente DANTEC 56C a temperatura constante, con filtros analógicos pasa-bajos y pasa-altos y una placa convertora analógico-digital. La sonda anemométrica es una resistencia de tungsteno de 5  $\mu$ m de diámetro y 2 mm de longitud. El sistema permite la determinación de velocidades medias, intensidades de turbulencia y espectros de potencia. Para el análisis espectral, se obtienen las series numéricas a partir de la digitalización de la señal de salida del anemómetro, que luego son procesadas mediante programas computacionales. En estos ensayos se utilizaron series de 130000 valores con una frecuencia de adquisición de 2048 Hz, obteniéndose muestras de aproximadamente 63 segundos de duración. El filtro pasa-bajos fue ajustado a 1 kHz para evitar el problema de distorsión de la muestra por efecto de "aliasing".

### RELEVAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TURBULENCIA DEL FLUJO SOBRE EL RELIEVE TOPOGRÁFICO

Para el análisis experimental de las características del escurrimiento en las proximidades de la casa se determinaron perfiles de velocidad media, adimensionalizados con la velocidad en el punto de mayor altura, y de intensidad local de turbulencia en los puntos 1 (al norte), 2 (centro) y 3 (al sur) que se indican en la Figura 2, ubicados sobre la misma línea transversal a 30 cm de distancia entre sí. Con relación al número de Reynolds,  $Re$ , al utilizar un viento incidente de fondo, cuyas características responden a un escurrimiento turbulento de capa límite sobre superficie rugosa, normalmente se utiliza como longitud característica la altura gradiente que en este caso determina un valor de  $Re$  aproximadamente igual a  $2 \times 10^6$ . Para este tipo de

escurrimiento incidente, la superficie lisa a barlovento de la posición de medición, que forma parte del modelo topográfico, introduce modificaciones mínimas en las características del escurrimiento. Los resultados son mostrados en las Figuras 3, 4 y 5, que corresponden a las direcciones de viento incidente de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $-15^\circ$ . En las figuras, los laterales derecho e izquierdo están referidos a la Figura 2, y corresponden a los lados norte y sur del cañadón, respectivamente.

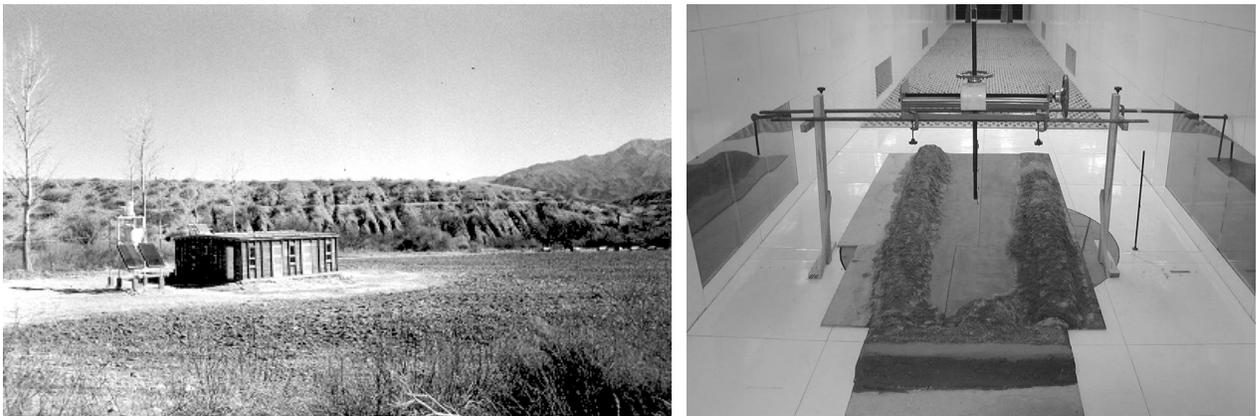


Fig.1 : Fotografías del relieve topográfico y del modelo en el interior de la cámara de ensayo del túnel de viento

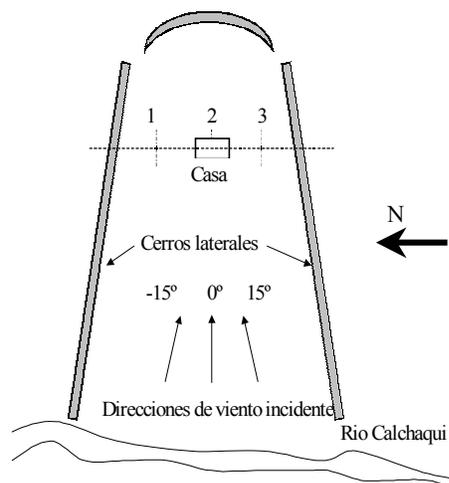


Fig.2: Esquema del relieve topográfico, dirección del viento incidente y ubicación de los puntos de medición

Cuando el viento incide con ángulo de  $0^\circ$  se observan perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia similares a los obtenidos en la capa límite de la simulación o viento de fondo (Figura 3). En principio, esto ya permite verificar la escasa influencia introducida por el pasaje de la superficie rugosa correspondiente a la simulación del viento de fondo a la superficie lisa del modelo topográfico. Para las direcciones restantes ( $15^\circ$  y  $-15^\circ$ ), la influencia de la topografía se manifiesta en los perfiles a partir de un aumento de los niveles de turbulencia producto de un déficit de cantidad de movimiento medio. Las perturbaciones se producen en las posiciones inmediatamente a sotavento de cada cerro lateral de acuerdo al ángulo de incidencia del viento. Para viento incidente a  $-15^\circ$  (Figura 4), las perturbaciones en los perfiles se producen en posiciones relativamente más bajas y son de menor intensidad que las correspondientes a la dirección  $15^\circ$  (Figura 5), lo cual se condice con la diferencia de altura de los obstáculos a barlovento.

Para completar el análisis, a partir de los perfiles anteriores, se eligieron una serie de puntos en los cuales se obtuvieron los espectros de potencia (función de densidad espectral de las fluctuaciones de velocidad). En la Figura 6, se muestra el espectro correspondiente a la posición 2 en una altura de 20 mm, conjuntamente con el histograma de frecuencias relativas correspondiente. Por la ubicación del punto y las condiciones de medición, este espectro debería mantener las características del viento de fondo, por lo que será utilizado en el análisis como una referencia en la comparación con los espectros obtenidos en otros puntos. Como característica relevante, se puede señalar la clara definición de la región inercial (pendiente  $-5/3$ ) a partir de la frecuencia de 20 Hz. En cuanto al histograma de frecuencias relativas, la forma indica que las fluctuaciones de velocidad responden a una distribución normal o Gaussiana.

En la Figura 7 se presentan los espectros correspondientes a la posición 2 en una altura de 20 mm y a la posición 3 a una altura de 110 mm, con viento incidente a  $15^\circ$ , mientras que en la Figura 8 son presentados los espectros correspondientes a la posición 2 a

una altura 20 mm y en la posición 1 a una altura de 70 mm para un viento incidente de  $-15^\circ$ . Los puntos elegidos para realizar el análisis espectral fueron determinados por un lado, de acuerdo a la zona donde está ubicado el recinto, y por otro en las regiones donde se obtuvieron las máximas intensidades de turbulencia.

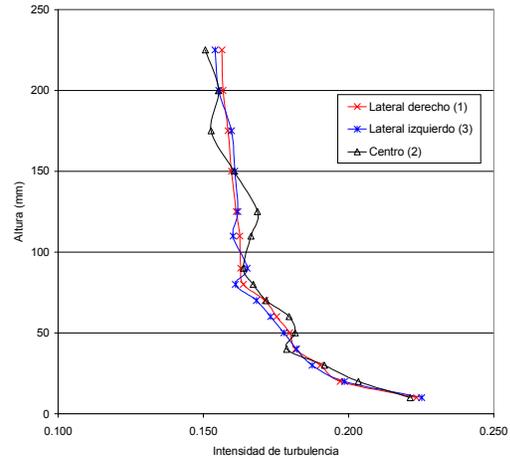
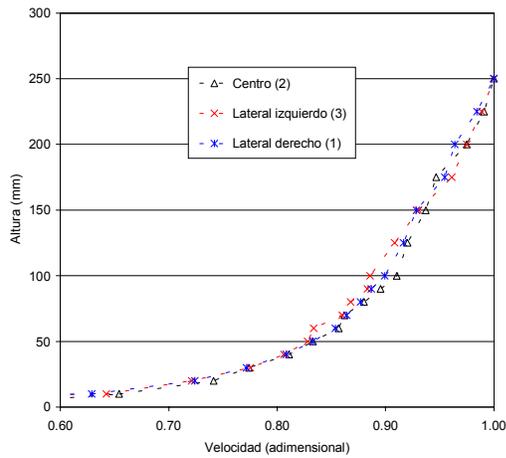


Fig. 3: Perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia con viento incidente a  $0^\circ$ .

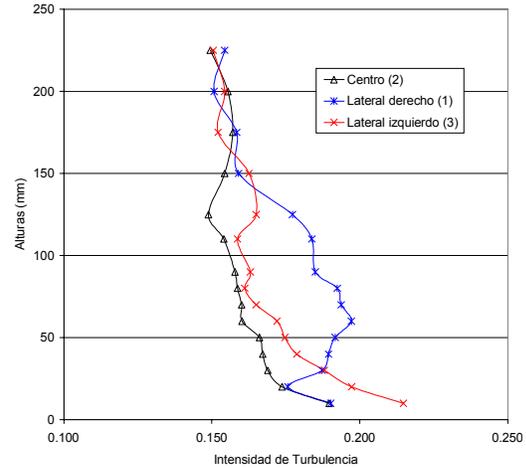
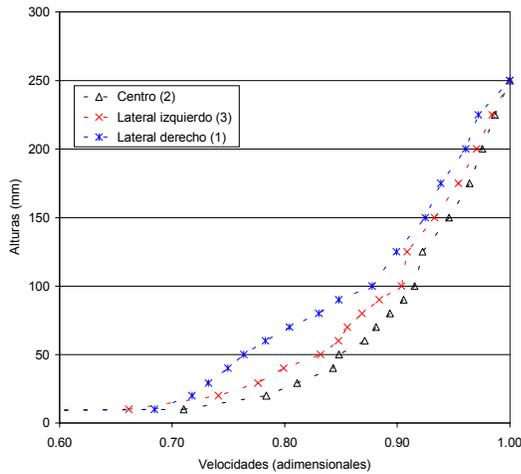


Fig. 4: Perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia con viento incidente a  $-15^\circ$ .

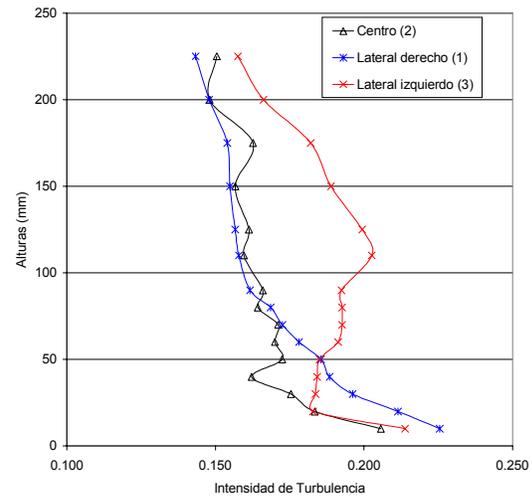
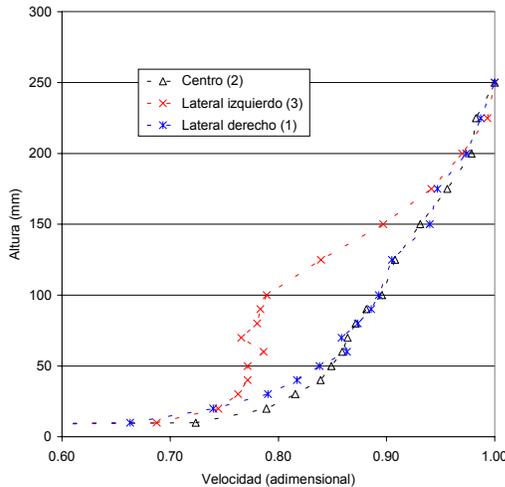


Fig. 5: Perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia con viento incidente a  $15^\circ$ .

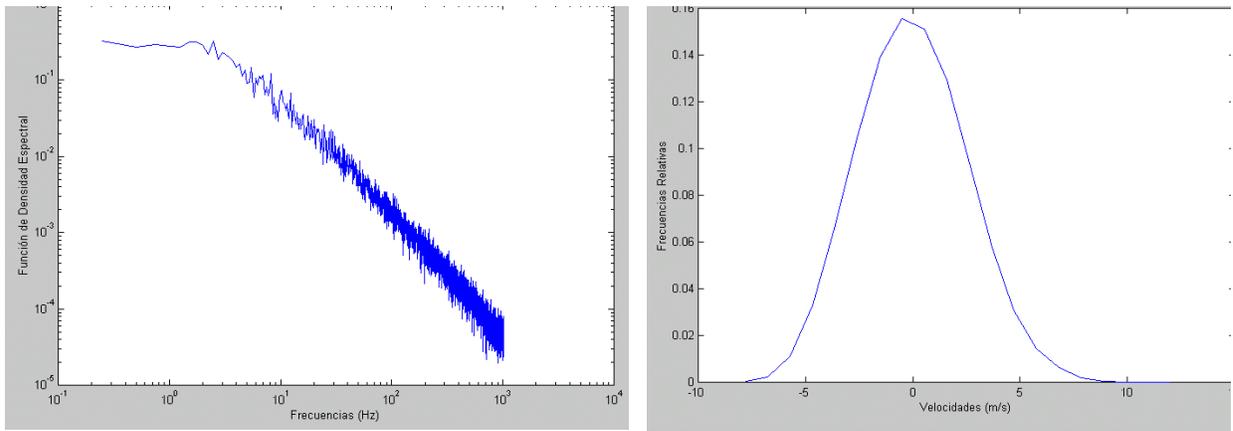


Fig. 6. Espectro de potencia e Histograma de frecuencias relativas Posición 2, ángulo incidencia 0°, altura 20mm

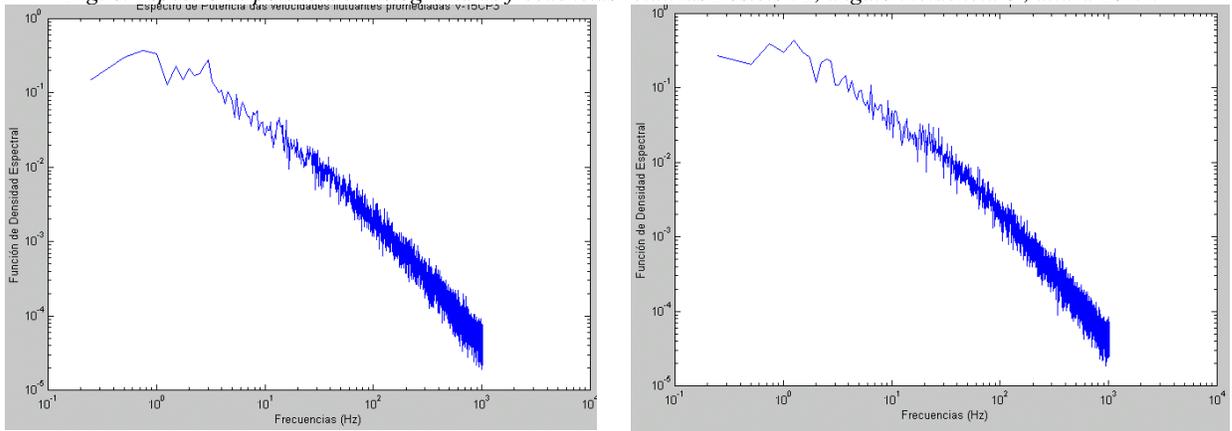


Fig. 7: Espectros de potencia para un ángulo de incidencia 15° correspondientes a la posición central (altura 20 mm) y lateral izquierdo (altura 110 mm).

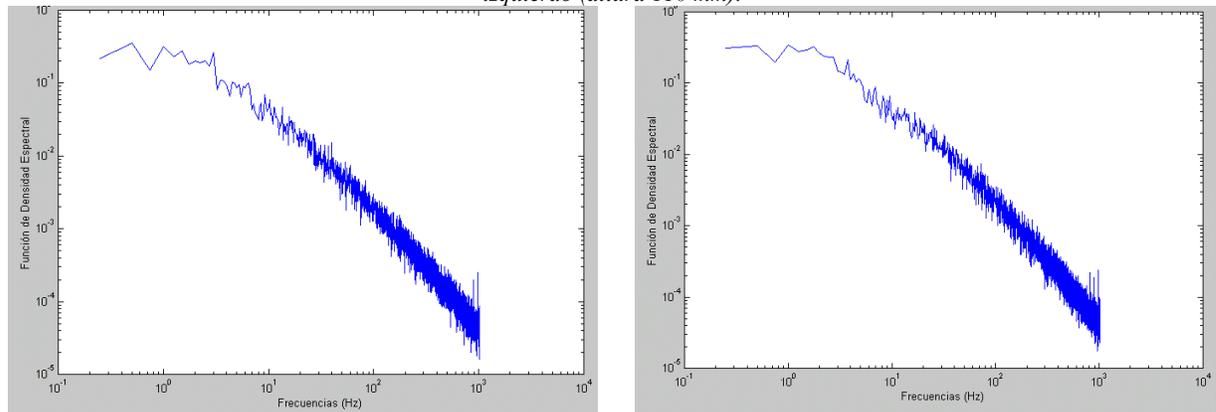


Fig. 8: Espectros de potencia para un ángulo de incidencia -15° correspondientes a la posición central (altura 20 mm) y lateral derecho (altura 70 mm).

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con relación a los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia en la parte inferior, donde estaría ubicado el modelo del recinto, las intensidades de turbulencia varían entre 16 y 22%. En las zonas de mayor alteración de los perfiles, los niveles de intensidad de turbulencia apenas superan el 20%. Esto quiere decir que si bien hay alteraciones del escurrimiento, estas no se traducen en grandes variaciones de los niveles de turbulencia.

En cuanto al análisis espectral, no obstante existen variaciones en los espectros obtenidos, estas se producen en la región de frecuencias más bajas, donde no es posible establecer conclusiones contundentes puesto que el análisis realizado a partir del promediado de ventanas espectrales mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier, no asegura una gran confiabilidad en las bajas frecuencias. Esto podría ser mejorado utilizando registros de mayor duración o disminuyendo la

resolución espectral en las bajas frecuencias, pero el aporte al análisis no sería significativo. Por otro lado, no se observan picos espectrales a una frecuencia predominante que estaría indicando el fenómeno de desprendimiento de vórtices. Finalmente, en todos los casos queda muy bien definida la región inercial del espectro a partir de los 20 Hz.

El análisis experimental realizado en principio permite establecer que en forma general el método de introducir un déficit de cantidad de movimiento sería suficiente para reproducir en forma adecuada las características del escurrimiento turbulento incluyendo las perturbaciones introducidas por esta topografía, al menos para las direcciones de viento consideradas en el análisis. Es decir, las características del relieve topográfico solamente provocan una disminución de velocidades medias y modifican la intensidad de la turbulencia en algunos puntos de los perfiles analizados, pero sin introducir mayores alteraciones en la distribución de energía en función de la frecuencia. Por lo tanto, se estima factible reproducir estos parámetros característicos mediante procedimientos que incluyen barreras, rugosidad superficial y dispositivos de mezcla, sin necesidad de desarrollar un equipamiento específico que genere concentraciones de energía en frecuencias determinadas.

Esto es de suma importancia, puesto que la diferencia entre las dimensiones de los obstáculos que presenta el relieve topográfico y las dimensiones características del recinto a estudiar, requieren un modelado en etapas debido a las dimensiones de la cámara de ensayos del túnel de viento. Esto significa que a partir de los resultados obtenidos sobre este primer modelo del relieve topográfico deberá ser construido un segundo modelo a una escala mayor que incluya, por un lado, las características geométricas del recinto, y simultáneamente, a partir de un equipamiento de simulación, permita reproducir los parámetros característicos del escurrimiento turbulento en las proximidades del recinto.

Es importante remarcar que la realización de estas evaluaciones de escurrimiento para una situación tan específica se deben principalmente al hecho de contar en dicha localización con una vivienda simple instrumentada que permitirá establecer comparaciones de los resultados obtenidos experimentalmente con el modelo y con este prototipo, como así también aportar datos para desarrollar modelos computacionales.

**ABSTRACT.** In this work, it is analyzed the characteristic of the atmospheric wind over a site in which a building for full-scale studies on thermal behaviour of houses is located. The analysis was performed in a wind tunnel by means of a scale model of the topographic features considering an incident wind that is in agreement with the atmospheric wind in the area. The length scale of the topographic model is defined by the length scale factor of the incident wind simulation; it allows reproducing in the wind tunnel the features that have aerodynamic relevance. It was determined the main characteristics of the flow turbulence in the area where the building is, including turbulence intensity profiles, spectra and histogram of relative frequencies. The results allow to appreciate the influence of the local topography on the characteristics of the atmospheric wind and to infer what would be the features to be simulated in a future study using a model at a bigger scale.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Paul, I., V. Javi, G. Lesino. (1992). "The use of water models in the determination of convective heat transfer coefficients". Workshop on Material Science and Physics of Non Conventional Energy Sources. pp: 445-451. Buenos Aires.
- Hoyos, D., I. De Paul. (1994). "Programa de captura de imágenes, procesamiento y cálculo para medición de velocidades en líquidos." Actas de la 17a. Reunión de ASADES. Tomo II pp: 683-688. Rosario. Octubre.
- De Paul, I., M. Vilte. (1995). "Análisis de algunos factores que modifican la circulación en un recinto cerrado". Actas de 18a. Reunión de ASADES. San Luis.
- De Paul, I., M. Vilte. (1996). "Influencia de la pendiente del techo en la convección entre dos locales". Actas de 19a. Reunión de ASADES. Mar del Plata.
- Vilte, M., I. De Paul. (1997). "Análisis de la interacción térmica e hidrodinámica en un recinto cerrado producida por convección natural". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol.1, Tomo 2, pp : 69-72.
- Vilte, M., I. De Paul, F. J. Fernández Mesa. (1998). "Transferencia térmica en un recinto cerrado producida por convección natural". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol.2, Tomo 1, pp :02.49.
- Vilte, M., I. De Paul. (2000). "Transferencia térmica por convección natural en un recinto cerrado en condiciones de equilibrio térmico y dinámico". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4, Tomo 1, pp.02.87-02.92.
- De Paul, I. (2000). "Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4, Tomo 1, pp.03.27-03.32.
- Marighetti, Jorge O., Wittwer, Adrián R., De Bortoli, Mario E., De Paul, Irene, Salvo, Nahuel, Hoyos, Daniel, (2003), "Modelado de un relieve topográfico para estudios de escurrimiento atmosférico en túnel de viento", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 2003. Vol. 6, pp. 06.17-06.22.
- Blessmann, J. (1995), "O Vento na Engenharia Estrutural", Editora da Universidade, UFGRS, Porto Alegre, Brasil.
- Cook, N. J. (1978), "Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer", Journal of Industrial Aerodynamics, vol. 2, pp. 311-321.
- Standen, N. M. (1972), "A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Natural Wind Simulation in Wind Tunnels", National Research Council of Canada, NAE, Report LTR-LA-94.
- Wittwer, A. R., Möller, S. V. (2000), "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 84, pp. 307-320.