

# VARIACION DE LOS PARAMETROS CARACTERISTICOS DE UNA SIMULACION DE LA CAPA LIMITE ATMOSFERICA EN UN TUNEL DE VIENTO

Adrián R. Wittwer, Mario E. De Bortoli, M. B. Natalini  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Las Heras 727, CP 3500, Resistencia, Argentina  
E-Mail: [tunel@ing.unne.edu.ar](mailto:tunel@ing.unne.edu.ar) - Tel.: (03722) 439039

## RESUMEN

El estudio de los fenómenos aerodinámicos que ocurren en la atmósfera mediante ensayos en túneles de viento, requiere la simulación de la capa límite atmosférica. En el proceso de comparación entre una capa límite simulada en un túnel de viento y la capa límite atmosférica, se analiza la distribución de la velocidad media y los parámetros turbulentos. Generalmente, el número de Reynolds es desechado como criterio de semejanza en los túneles de baja velocidad debido a la imposibilidad de su reproducción. En este trabajo se analiza la influencia que provoca la variación de la velocidad, y por ende del número de Reynolds, sobre los parámetros que caracterizan una capa límite para saber si es válido utilizar experimentalmente una simulación de la capa límite atmosférica cuando resulta necesario modificar la velocidad media o el número de Reynolds.

## INTRODUCCION

En aerodinámica, cuando se estudian fenómenos a partir de modelos a escala en túneles de viento, el criterio de semejanza dinámica es el número de Reynolds ya que establece la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, que son las fuerzas preponderantes en este tipo de problemas.

En el caso de modelar o simular físicamente la capa límite atmosférica en un túnel de viento de baja velocidad, es prácticamente imposible obtener números de Reynolds semejantes a los de la atmósfera. Sin embargo, a partir de cierto valor del número de Reynolds llamado valor crítico, existe una independencia del fenómeno con relación al incremento de este parámetro. La calidad de la reproducción de la capa límite atmosférica se determina a través de la medición del perfil de velocidades, intensidades de turbulencia, macroescala y espectro de potencia en la mesa de ensayos del túnel una vez implementados los simuladores de capa límite, realizando la comparación de estos valores con datos atmosféricos.

Existen experimentos que se realizan en túneles de viento relacionados con el confort, la visualización de flujo y los efectos dinámicos, en los cuales se requieren modificar la velocidad media o el número de Reynolds, mientras que el perfil adimensional de velocidades medias y los parámetros turbulentos que caracterizan la capa límite atmosférica no deben alterarse. Por esto, a partir de mediciones de los parámetros característicos en una simulación de capa límite atmosférica, para distintas velocidades medias y números de Reynolds distintos, se intenta establecer si se mantienen las características de la capa límite simulada, comparando los parámetros medidos con datos atmosféricos.

## DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS CARACTERISTICOS

A partir de la aplicación de la descomposición de Reynolds [1], se puede decir que el flujo turbulento en un punto se encuentra descrito por la velocidad media y por las fluctuaciones de velocidad en torno de esa media. El flujo en la capa límite atmosférica es altamente turbulento y puede ser evaluado midiendo la distribución de velocidades medias y los parámetros turbulentos. Para describir la turbulencia se utilizan espectros de potencia, funciones de correlación y distribuciones de probabilidad, y en general, en la evaluación experimental de los escurrimientos, se determinan otras características relacionadas con éstas, como son la intensidad de turbulencia, la función de autocorrelación y la escala integral de la turbulencia.

### Perfil de velocidades medias

El perfil de velocidades medias determinado por la variación de la velocidad con la altura permite caracterizar la capa límite atmosférica en función del tipo de terreno sobre el cual se desarrolla el flujo. Las ecuaciones de cantidad de movimiento en fluidos permiten obtener la ley de defecto de velocidades y la ley de la pared, y ambas definen un perfil logarítmico en forma teórica para el viento atmosférico, similar al que tenemos en superficies rugosas pero aplicado al problema meteorológico.

La validez de la ley de Prandtl se confirma por mediciones realizadas en la capa límite atmosférica hasta alturas de unos cientos de metros [2] y se expresa como 
$$\frac{\bar{U}(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln(z/z_0)$$

El parámetro  $z_0$ , que es la altura de rugosidad, está directamente ligado a la altura media de los obstáculos que forman la rugosidad de la superficie terrestre. La velocidad de fricción o cizallamiento  $u^*$  se define como  $u^* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ , siendo  $\tau_w$  la tensión de cizallamiento en la pared. La constante de Von Kármán  $k$  es 0,4.

No obstante la existencia de esta ley universal, una simple ley obtenida empíricamente como es la ley potencial, es muy utilizada y da muy buenos resultados para el análisis de la capa límite atmosférica. La expresión matemática de esta ley es:

$$\bar{U}(z) / \bar{U}(z_g) = (z / z_g)^\alpha \quad (1)$$

siendo  $\bar{U}(z)$ , y  $\bar{U}(z_g)$ , las velocidades medias correspondientes a las alturas  $z$  y a la altura gradiente respectivamente. El perfil de velocidades medias es función del parámetro  $\alpha$  que define el tipo de terreno en la atmósfera o el tipo de simulación en el túnel de viento.

### Intensidad de turbulencia

La turbulencia es un fenómeno aleatorio, y como tal requiere un análisis estadístico de las fluctuaciones de velocidad que lo originan. 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  $\bar{U}$  medida en la posición  $z$ . La intensidad local de turbulencia se obtiene mediante la expresión:

$$I_u(z) = \sigma_u(z) / \bar{U}(z) \quad (2)$$

### Espectro de potencia

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:

$$\Phi_{xx}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x^2(f, B_e, t) dt \quad (3)$$

donde  $B_e$  es el ancho de banda (resolución del espectro) y  $T$  un tiempo de integración adecuado [3].

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.

### Escala integral

La escala integral  $L_{xu}$  es un parámetro que está vinculado a las características turbulentas del flujo y es una dimensión promedio de los remolinos más grandes presentes en el flujo. Puede determinarse ajustando el espectro de la componente longitudinal medido al espectro de diseño representativo de los valores atmosféricos. Más aún, cuando la forma del espectro no coincide en su totalidad, el ajuste se puede “desviar” al rango de frecuencias de interés de acuerdo al tipo de análisis, dándole cierta flexibilidad al método. Con el valor  $fL_{xu} / \bar{U} = 1$  en el espectro de diseño, se obtiene la correspondiente frecuencia  $f$  en el espectro medido con la que se puede determinar la escala integral como  $L_{xu} = \bar{U} / f$  [4].

### Número de Reynolds

Es un producto adimensional utilizado para analizar la semejanza dinámica en los fluidos y genéricamente está definido por  $Re = UL / \nu$ , donde  $U$  es la velocidad del fluido,  $L$  es una longitud característica y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

## TECNICA DE MEDICION

El sistema de medición utilizado está constituido por:

1. Un anemómetro de hilo caliente Dantec 56C -temperatura constante- con sonda miniatura, que incluye voltímetros para medición de valor medio y rms.
2. Un osciloscopio digital de dos canales Tektronic TDS 320.
3. Un amplificador Stanford SR560 con filtros analógicos pasa-bajos y pasa-altos ajustables.
4. Una plaqueta conversora analógico-digital Keithley Metrabyte DAS-1600 instalada en una PC.
5. Un multímetro digital Keithley 2000.

El sistema permite la determinación de velocidades medias, intensidades de turbulencia, funciones de autocorrelación y espectros. Para las mediciones de velocidades medias e intensidades de turbulencia, directamente se emplean las tensiones leídas en los voltímetros de valor medio y rms a la salida del anemómetro, y las constantes obtenidas en el proceso de calibración de la sonda anemométrica. Para el análisis espectral y de autocorrelación, se obtienen series numéricas a partir de la digitalización de la señal de salida del anemómetro que luego son procesadas mediante programas computacionales[5].

## DESCRIPCION DE EXPERIMENTOS

Los experimentos se realizaron en el túnel de viento de capa límite “Jacek P. Gorecki” de la UNNE (Figura 1), 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. La velocidad máxima con el túnel en vacío es de 25 m/s y utiliza un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico de 92 kW y 720 rpm. La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico [6].

La técnica de simulación de la capa límite atmosférica implementada se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla [7]. Se colocaron 17 m de rugosidad superficial sobre el piso del túnel, y a barlovento de esta rugosidad, se ubicaron dos agujas truncadas del tipo Irwin para obtener una mayor escala de simulación, y a la vez distribuir en altura el déficit de cantidad de movimiento introducido, para obtener características semejantes a las atmosféricas.

La determinación de perfiles de velocidad media, intensidades de turbulencia, espectros de potencia y escalas integrales se realizó para tres aperturas distintas del regulador de velocidad (I, II y III), las que para una altura de 16,6 cm desde el piso del túnel y en el centro de la mesa de ensayos, dieron respectivamente las siguientes velocidades medias: 9,3 m/s, 12,1 m/s y 14,9 m/s.

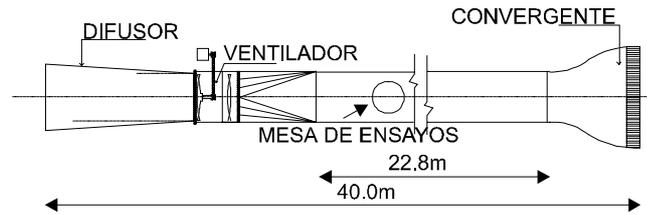


Fig. 1: Túnel de viento Jacek P. Gorecki (UNNE)

## RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los perfiles de velocidad media correspondientes a las tres aperturas de regulador consideradas. Ajustando los valores experimentales a la ley potencial (1), pero considerando  $z_g = h_{mx}$  (altura máxima de medición) y  $U(z_g) = U_{mx}$  (velocidad a  $h_{mx}$ ), se obtienen los valores del exponente  $\alpha$ . En la tabla 1 se indican los valores de  $h_{mx}$ ,  $U_{mx}$ , número de Reynolds ( $Re$ ) y exponente  $\alpha$ .

En las figuras 3, 4 y 5 se presentan los espectros medidos con aperturas de regulador de velocidad I, II y III respectivamente, ajustados al espectro atmosférico de diseño para obtener las escalas integrales que se indican en las mismas figuras, siguiendo el método de Cook [4]. Los espectros medidos fueron adimensionalizados y comparados con el espectro atmosférico adimensional, y se obtuvieron órdenes de concordancia similares en los tres casos analizados. La adimensionalización se hizo a través de la expresión  $\phi_u f / \sigma_u^2$ , donde  $\phi_u$  es la función de densidad espectral,  $f$  es la frecuencia y  $\sigma_u^2$  es la varianza de las fluctuaciones. En la tabla 2 se indican las intensidades de turbulencia obtenidas mediante la expresión (2) a partir de las mediciones de velocidad media y fluctuaciones de velocidad.

El análisis de las velocidades medias y de los valores del exponente  $\alpha$  obtenidos, indica que el perfil adimensional se mantiene prácticamente inalterable en el rango de variación de velocidad implementado. Un comportamiento similar se puede observar en cuanto a las intensidades de turbulencia y los espectros adimensionales. El valor de la escala integral  $L_{xu}$ , por el contrario, experimenta un incremento a medida que aumenta la velocidad.

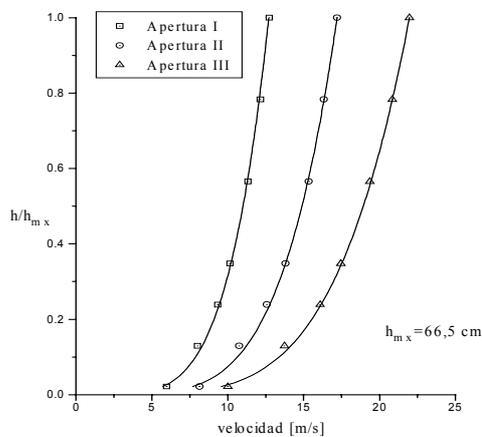


Fig. 2: Perfiles de velocidad media

Tabla 1: Valores de  $h_{mx}$ ,  $U_{mx}$ ,  $Re$  y  $\alpha$

	I	II	III
$U_{mx}$ [m/s]	12,7	17,2	22
$h_{mx}$ [cm]	66,5	66,5	66,5
$Re (U_{mx} h_{mx} / \nu)$	$5,3 \times 10^5$	$7,2 \times 10^5$	$9,2 \times 10^5$
$\alpha$	0,21	0,21	0,22

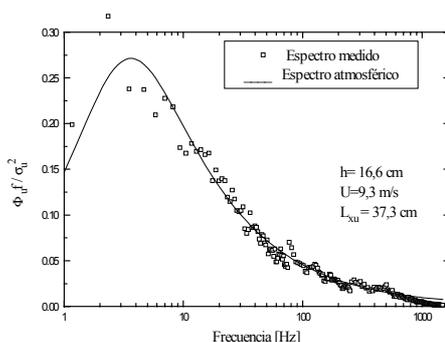


Fig. 3: Espectro de potencia (apertura I)

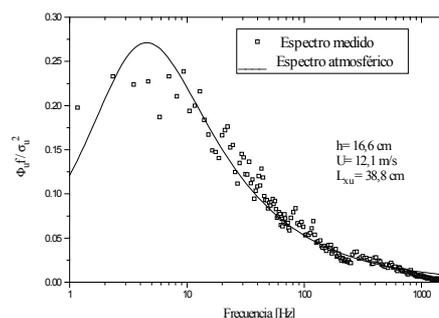


Fig. 4: Espectro de potencia (apertura II)

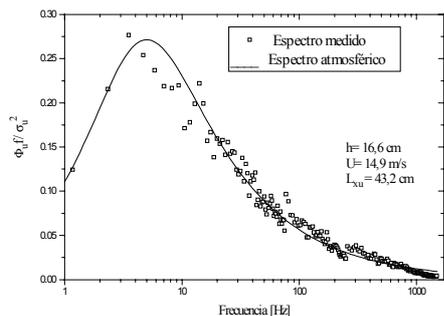


Fig. 5: Espectro de potencia (apertura III)

Tabla 2: Intensidad de turbulencia

	I	II	III
$I_u$ [%]	18,7	18,6	19,1

## CONCLUSIONES

Los resultados de los experimentos indican que en el rango de variación de velocidades analizado, los parámetros adimensionales permanecen prácticamente constantes. La escala integral, por su parte, es dimensionalmente una longitud, y la velocidad, también dimensionalmente, es longitud/tiempo lo cual explicaría que al incrementarse la velocidad aumente la escala integral. No obstante, convendría definir nuevos parámetros adimensionales a partir de la escala integral para analizar este comportamiento.

Finalmente, se puede decir que a partir de este estudio, al menos para este rango de velocidad, las simulaciones de capa límite atmosférica en el túnel de viento de la UNNE mantienen sus características de flujo medio y turbulento. Esto las convierte en una herramienta válida para analizar fenómenos dentro de la capa límite que requieren modificar la velocidad media o el número de Reynolds.

## REFERENCIAS

- [1] Tennekes, H., Lumley, J. L., “**A First Course in Turbulence**”, The MIT Press, Cambridge, 1994.
- [2] Blessmann, J., “**O Vento na Engenharia Estrutural**”, Editora da Universidade, UFGRS, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- [3] Bendat, J. S., Piersol, A. G. “**Random Data - Analysis and Measurements Procedures**”, Wiley, New York, 1986.
- [4] Cook, N. J., “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, 1978.
- [5] Möller, S. V., “**Experimentelle Untersuchung der Vorgänge in engen Spalten zwischen den Unterkanälen von Stabbündeln bei turbulenter Strömung**”, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, RFA, 1988.
- [6] Wittwer, A. R., Möller, S. V., “Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE”, **Jubileum Conference on wind effects on buildings and structures**, Part II, pp. 14-19, Gramado RS, Brasil, May 25-29, 1998.
- [7] Standen, N. M., “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, 1972.