



UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE FLUJOS TURBULENTOS

TAYGOARA FELAMINGO DE OLIVEIRA, YURI DUMARESQ SOBRAL, ROBERTO FRANCISCO BOBENRIETH-MISERDA, FRANCISCO RICARDO DA CUNHA

Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica
Campus Universitário Darcy Ribeiro 70910-900 Brasília DF – Brasil

(Recibido 17 de agosto de 2004, para publicación 22 de julio de 2007)

Resumen – El principal objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología de tratamiento estocástico de señales turbulentas originadas de experimentos o de simulaciones numéricas. Se desea evaluar los errores inherentes a la utilización de la hipótesis de ergodicidad y de la consideración de que el proceso es estadísticamente permanente. Para ello, se realiza un análisis de series temporales con base en momentos estadísticos de conjuntos de diversas realizaciones de un mismo experimento. Se analiza el flujo alrededor de un cubo montado sobre una superficie plana. Un análisis estadístico es realizado así como la evaluación del error cometido al asumirse la hipótesis de ergodicidad. Este tipo de estudio permite obtener el tiempo y la frecuencia que deben ser utilizadas en la adquisición de las señales turbulentas. Se muestra que la metodología propuesta es capaz de predecir el error estadístico asociado a la hipótesis de ergodicidad del flujo.

Palabras clave – Análisis Estocástico, turbulencia, ergodicidad, anemometría, errores estadísticos.

1. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los flujos de interés práctico son turbulentos y, por lo tanto, poseen un elevado nivel de aleatoriedad. De esta forma, su correcta caracterización depende de un análisis estadístico refinado (Taylor, 1935) que, además de las informaciones medias, proporcione parámetros de dispersión adecuados así como las incertidumbres estadísticas relacionadas con el proceso.

Actualmente, no solamente las técnicas experimentales (Comte-Bellot & Corrsin, 1971) dependen de este tipo de análisis, pero también los métodos numéricos más recientes (Yeung & Pope, 1989, Bobenrieth, 1996; Oliveira, 2003). Estudios semejantes han sido desarrollados en otras áreas, como en el control de procesos de soldadura (Carvalho *et al.*, 2001). Hipótesis de carácter estadístico muchas veces son necesarias en la formulación de los modelos matemáticos usados en simulaciones numéricas de flujos turbulentos (Batchelor, 1953). Aparte de esto, simulaciones de grandes remolinos y simulaciones directas generan series históricas tan complejas como las obtenidas experimentalmente, de manera que análisis estadísticos detallados son igualmente necesarios para el debido tratamiento de los datos obtenidos en estas simulaciones.

Informaciones básicas como la intensidad de turbulencia, la energía cinética de turbulencia, la velocidad media y el tiempo de correlación son frecuentemente obtenidas solamente a partir de un análisis tradicional de series temporales. Entretanto, un análisis estocástico más profundo, con base en las medias y en los momentos estadísticos obtenidos de las diversas realizaciones de un mismo proceso, puede proporcionar datos más fiables y medidas de incertidumbre más adecuadas.

Inserido en este contexto, este trabajo tiene como objetivo la aplicación de un tratamiento estocástico en señales de velocidad adquiridos en la región turbulenta generada por el flujo alrededor de un cubo montado sobre una superficie plana. También se desea evaluar la frecuencia y el tiempo de adquisición utilizado en relación a la capacidad de capturar una serie temporal que proporcione resultados estadísticos que sean representativos del proceso estocástico.

2. DISCUSIÓN TEÓRICA

2.1. Proceso aleatorio estacionario y ergódico

Cuando un fenómeno físico es considerado en términos de un proceso aleatorio, sus propiedades pueden ser determinadas, para cualquier instante, tomándose el valor medio, para cada tiempo, sobre un conjunto de varias realizaciones (adquisiciones experimentales) del mismo proceso (Bentad, 1986). De esta manera, definiéndose un proceso estocástico $u(t, \alpha)$, con $\alpha=1, 2, \dots, N$, donde N es el número de realizaciones del proceso, la media estadística de este proceso puede ser definida como:

$$\langle u(t) \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N u(t, \alpha) \quad (1)$$

Si definimos la fluctuación del proceso como $u'(t) = u(t) - \langle u(t) \rangle$, se puede definir la función de autocorrelación para la variable $u'(t)$ como:

$$C(u'(t), u'(t + \tau)) = \langle u'(t) \cdot u'(t + \tau) \rangle \quad (2)$$

Cuando $\langle u(t) \rangle$ y $C(u'(t), u'(t + \tau))$ no cambian con el tiempo, o sea, $\langle u(t) \rangle = \langle u \rangle$ y $C(u'(t), u'(t + \tau)) = C(\tau)$, se dice que el proceso es estadísticamente permanente o estacionario.

Para procesos estacionarios y ergódicos, se puede evaluar las propiedades medias por medio de una integral en el tiempo a la cual llamamos media temporal, definida por la Ec. (3):

$$\bar{u} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \langle u \rangle + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) dt \quad (3)$$

donde la definición de la fluctuación de velocidad es igualmente aplicada. El intervalo de integración, en este caso, debe ser varias órdenes de magnitud mayor que el tiempo de correlación del proceso.

En un proceso ergódico, los análisis con base en las medias temporales o estadísticas son equivalentes, de forma que, en estos casos, solamente una serie temporal suficientemente larga bastaría para la debida caracterización estocástica del proceso. El error asociado a la hipótesis de ergodicidad puede ser estimado evaluándose la varianza entre la media estadística y la media temporal, como:

$$\sigma^2(T) = \langle (\bar{u} - \langle u \rangle)^2 \rangle = \left\langle \left(\frac{1}{T} \int_0^T u'(t) dt \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T \langle u'(t) u'(t') \rangle dt dt' \quad (4)$$

Utilizándose el coeficiente de correlación entre $u'(t)$ y $u'(t')$, y haciéndose la transformación, $t = t' + \tau$, se halla:

$$\sigma^2(T) = \frac{\langle u'^2 \rangle}{T^2} \int_0^{T-|\tau|} \int_{-T}^T C(\tau) d\tau dt \quad (5)$$

A partir de (5), se obtiene que:

$$\sigma^2(T) = \frac{2\langle u'^2 \rangle}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C(\tau) d\tau \quad (6)$$

De esta manera, admitiéndose un decaimiento exponencial de la función de autocorrelación a partir de una señal con tiempo de adquisición T :

$$C(\tau) \approx e^{-\tau/\Theta} \quad (7)$$

donde Θ es la escala integral del tiempo (i.e., el tiempo de correlación del proceso), es posible estimar el error cometido (ε) por asumirse la hipótesis de ergodicidad para el proceso de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\langle u \rangle} \quad (8)$$

Por lo tanto, usándose (6) y (7), se muestra que:

$$\varepsilon^2 \approx \frac{2\langle u'^2 \rangle \Theta}{T\langle u \rangle^2}, \text{ con } \langle u'^2 \rangle = \langle (u - \bar{u})^2 \rangle \quad (9)$$

2.2. Función característica

La función característica de una variable aleatoria está definida como la transformada inversa de Fourier de la función de densidad de probabilidad de esta variable (Batchelor, 1953). De esta forma, para la variable u' , se tiene que:

$$\phi(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{isu'} f(u') du' \quad (10)$$

donde $f(u')$ es la función de densidad de probabilidad de u .

La Ec. (10) también puede ser entendida como el valor esperado de $e^{isu'}$ de manera que:

$$\phi(s) = \langle e^{isu'} \rangle \quad (11)$$

Desarrollando en series de McLaurin el término $e^{isu'}$, se obtiene:

$$\phi(s) = \left\langle \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(su')^j}{j!} i^j \right\rangle = \sum_{j=0}^{\infty} \langle (su')^j \rangle \frac{i^j}{j!} \quad (12)$$

La Ec. (12) proporciona medios para obtener la función característica calculada a partir de los momentos estadísticos ordinarios. Para un flujo turbulento, donde $\langle u' \rangle = 0$, la función característica expandida hasta el término de cuarto orden está dada por:

$$\phi(s) = 1 - s^2 \frac{\sigma^2}{2!} - is^3 \frac{\sigma^3}{3!} \varphi + s^4 \frac{\sigma^4}{4!} \kappa + O(\sigma^5) \quad (13)$$

donde $\sigma^2 = \langle u'^2 \rangle$. Las variables φ y κ son, respectivamente, el factor de asimetría y el factor de curvatura (o aplanamiento) que son definidos por:

$$\varphi = \frac{\langle u'^3 \rangle}{\sigma^3} \quad \kappa = \frac{\langle u'^4 \rangle}{\sigma^4} \quad (14)$$

Para que la función característica del fenómeno físico analizado corresponda a la función de una variable aleatoria con distribución normal es necesario que $\varphi = 0$ y $\kappa = 3$. Así, la Ec. (13) aplicada a una variable aleatoria con distribución normal resulta:

$$\phi_g = 1 - s^2 \frac{\sigma^2}{2} + s^4 \frac{\sigma^4}{8} + O(\sigma^5) \quad (15)$$

2.3. Análisis de escala

Otro punto importante en la definición de las condiciones de adquisición de la señal es la determinación de la banda de frecuencia a ser utilizada. En el contexto de este trabajo, es posible realizar un análisis de escalas de turbulencia que proporcione el orden de magnitud de las frecuencias existentes en el fenómeno.

De la escala integral se obtiene que la menor frecuencia existente en el flujo es del orden de:

$$\omega_{\min} \approx \frac{1}{\Theta} \approx \frac{\Delta u}{l} \quad (16)$$

en que Θ y l son escalas de tiempo y longitud características del flujo en las grandes escalas (grandes remolinos) y Δu una escala característica de las fluctuaciones de velocidad en esta escala. Por otro lado, a partir de la microescala de Kolmogorov (Batchelor, 1953), se obtiene que:

$$\omega_{\max} \approx \frac{1}{\lambda_0} \approx \left(\frac{\Delta u}{l} \right) \text{Re}_l^{3/4} \quad (17)$$

en que λ_0 es una longitud característica de la microescala de Kolmogorov y $\text{Re}_l = l\bar{u}/\nu$ es el número de Reynolds calculado con la longitud característica de las grandes escalas, la velocidad media del flujo turbulento y la viscosidad cinemática ν del fluido. En el caso de señales discretas, se debe tener en mente que, según el teorema de Nyquist (Ifeachor and Jervis, 1993), la mayor frecuencia que puede ser extraída es igual a la mitad de la frecuencia de adquisición ω_{aq} , llamada frecuencia de Nyquist. Entonces, el intervalo de adquisición será $(-\omega_{aq}/2, \omega_{aq}/2)$. Es importante resaltar, no obstante, que para capturarse todas las frecuencias del flujo, ω_{aq} debería estar contenida en el intervalo $(-\omega_{\max}, \omega_{\max})$.

2.4. Función de autocorrelación normalizada

El grado de correlación entre dos variables u_i y u_j , puede ser medido por un coeficiente de correlación lineal dado por $\rho_{ij} = \langle u_i u_j \rangle$. Aplicándose esta definición para la variable discreta $u'(t)$ en los instantes t y $t+\tau$ y normalizándose el resultado por la varianza del proceso, se obtiene:

$$C^*(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \sum_{t=1}^T \frac{u'(t)u'(t+\tau)}{\bar{u}^2} \quad \tau = 0, \dots, T-1 \quad (18)$$

Obviamente, para $\tau=0$, la función de autocorrelación normalizada es igual a 1.

2.5. Densidad espectral

La densidad espectral $S(\omega)$ de la señal es definida como:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} |A(\omega)|^2 \quad (19)$$

donde es la transformada de Fourier de u :

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u'(t) e^{-i\omega t} dt \quad (20)$$

Se observa que, como consecuencia directa del teorema de Parseval, la integral de la densidad espectral evaluada sobre el eje de las frecuencias resulta en la energía total contenida en la señal. Por lo tanto:

$$\overline{u'^2(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (21)$$

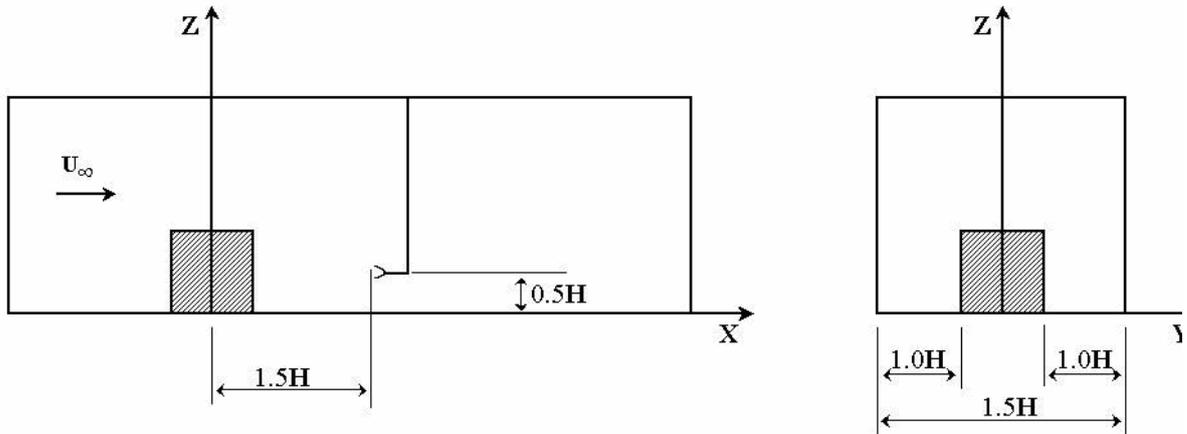


Fig. 1. Dimensiones de la sección de ensayos y sistema de coordenadas.

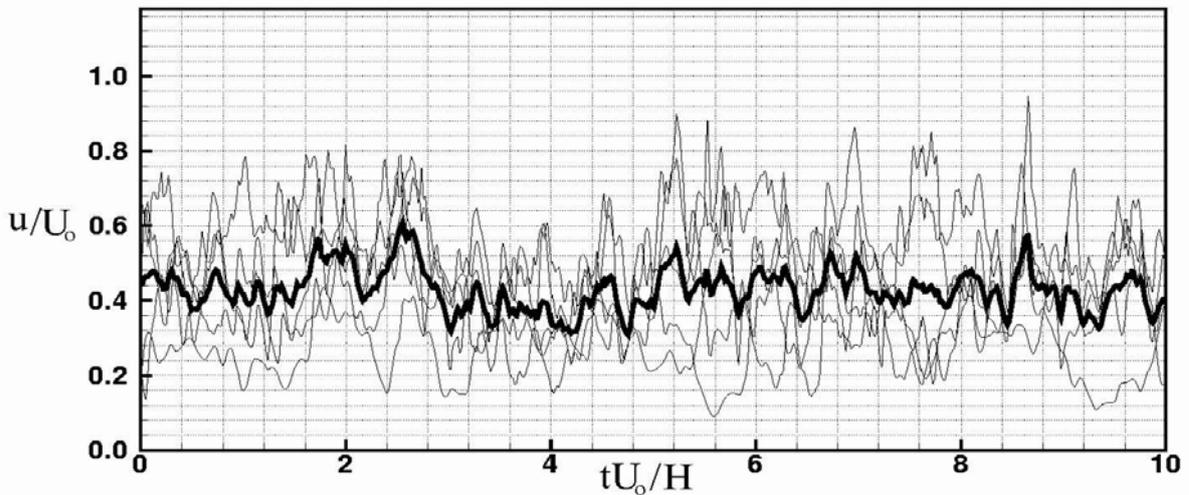


Fig. 2. Señales de velocidad en diversas realizaciones del mismo experimento. La línea más oscura representa la media instantánea de la velocidad.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los datos experimentales analizados en este trabajo fueron obtenidos de un flujo turbulento en un túnel de viento utilizándose anemometría de hilo caliente. El túnel usado en los experimentos tiene una sección transversal de 150×135 mm. Sobre su superficie, de acuerdo a la Fig. 1, fue montado un cubo de acrílico con aristas de 50 mm. El espesor de la capa límite en la posición del cuerpo es de aproximadamente 3 mm. El sistema de coordenadas usado en este trabajo se muestra en la Fig. 1.

El equipo utilizado en la adquisición de las señales turbulentas es un anemómetro de hilo caliente del tipo temperatura constante compuesto de una sonda de tungsteno con $5 \mu\text{m}$ de diámetro y 3 mm de largo. La calibración de la sonda fue realizada utilizándose un tubo de Pitot, donde la diferencia de presión total y estática fue medida a través de un dispositivo electrónico con resolución de 1 mm de columna de agua. Los experimentos fueron realizados inmediatamente después de la calibración del sistema de adquisición de datos. Después de posicionarse la sonda en el flujo, las adquisiciones para cada realización fueron

hechas sin ninguna alteración de los parámetros experimentales. Todas las adquisiciones referentes a cada posición de la sonda fueron realizadas sin que el túnel fuera desconectado.

Los datos fueron tratados y las medias y momentos estadísticos fueron obtenidos, como se ha detallado en las secciones anteriores. En la Fig. 2 se ilustra el procedimiento de cálculo de las velocidades medias, donde se muestra las señales de velocidad de cinco realizaciones del mismo experimento y la media, para cada instante, de estas señales.

4. RESULTADOS

El número de Reynolds, con base en el tamaño de la arista del cubo, usado en todos los experimentos, fue de $2,4 \times 10^4$ y la sonda fue siempre posicionada en un eje perpendicular al plano xy que pasa por el punto $(3/2H, 0, 0)$. En las adquisiciones preliminares, la sonda fue posicionada en $z=1,35H$ (aproximadamente la mitad de la altura de la sección de ensayo) y se realizaron pruebas con el túnel en vacío (sin el cubo). Las medidas en la región turbulenta fueron realizadas con la sonda a una altura de $z=0,5H$. Los errores asociados a los valores de velocidad media e intensidad de turbulencia son estimados por la media de los errores en cada instante. Esta estimación genera un intervalo donde el 99,9% de las medidas estarán contenidas.

4.1. Ensayos preliminares

Antes de la ejecución de los experimentos, fueron realizados ensayos preliminares con el objetivo de determinar la intensidad de turbulencia del flujo no perturbado por el cubo. El túnel fue ensayado en vacío, y con una frecuencia de adquisición de las señales igual a $\omega_{ad}=4$ kHz y con período de adquisición igual a $T=4$ s, aplicadas a un conjunto de 50 realizaciones. Como resultado de este ensayo, se ha podido determinar que la velocidad media del flujo en la posición de la sonda es de $\langle U_{\infty} \rangle = (8,45 \pm 0,07)$ m/s y la intensidad de turbulencia es de $\overline{IT} = (0,7 \pm 0,2)\%$.

4.2. Medidas en la región turbulenta

Para las medidas en la región turbulenta fue utilizada una frecuencia y un tiempo de adquisición de $\omega_{ad}=10$ kHz y $T=6$ s, respectivamente, para un conjunto de 50 realizaciones. Los resultados presentados en esta sección fueron adimensionalizados por $\langle U_{\infty} \rangle$, que es la media estadística de la velocidad del flujo no perturbado, y por H , que es el tamaño de la arista del cubo.

4.3. Análisis de corto tiempo

Un análisis de corto tiempo tiene por objetivo determinar las características del flujo a partir de un conjunto suficientemente grande de series temporales cortas. Para que este tipo de análisis produzca resultados representativos, el fenómeno debe ser estadísticamente estacionario.

En la Fig. 3a se muestra la velocidad media, dada por el valor esperado de la velocidad en cada instante, y la intensidad de turbulencia del flujo para un intervalo de tiempo muchas veces mayor que el tiempo de correlación. Este resultado fue obtenido a partir del procedimiento ilustrado en la Fig. 2, usándose un conjunto de 50 realizaciones.

La velocidad adimensional media del flujo, calculada por la media temporal de la serie mostrada en la Fig. 3a es $\langle u \rangle = (0,4 \pm 0,2)$. La intensidad de turbulencia media, también evaluada a partir de la media temporal de la señal de intensidad de turbulencia de la Fig. 3b es $\overline{IT} = (30 \pm 10)\%$. Es importante resaltar que no se puede observar ninguna tendencia en las señales adquiridas, tanto en la media, que es un momento estadístico de primer orden, como en la intensidad de turbulencia, que representa un momento de segundo orden.

Los factores de asimetría y curvatura computados para este caso fueron $\varphi=0,41$ e $\kappa=2,95$. El factor de curvatura es muy próximo de 3 y, aunque el factor de asimetría no sea nulo, la parte imaginaria de la fun-

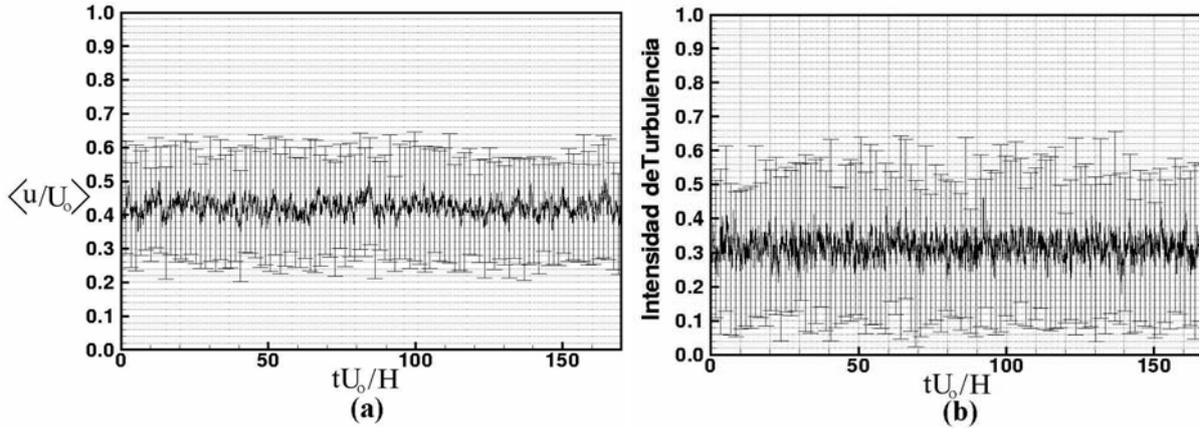


Fig. 3. Señal de la media de la velocidad y de la intensidad de la turbulencia.

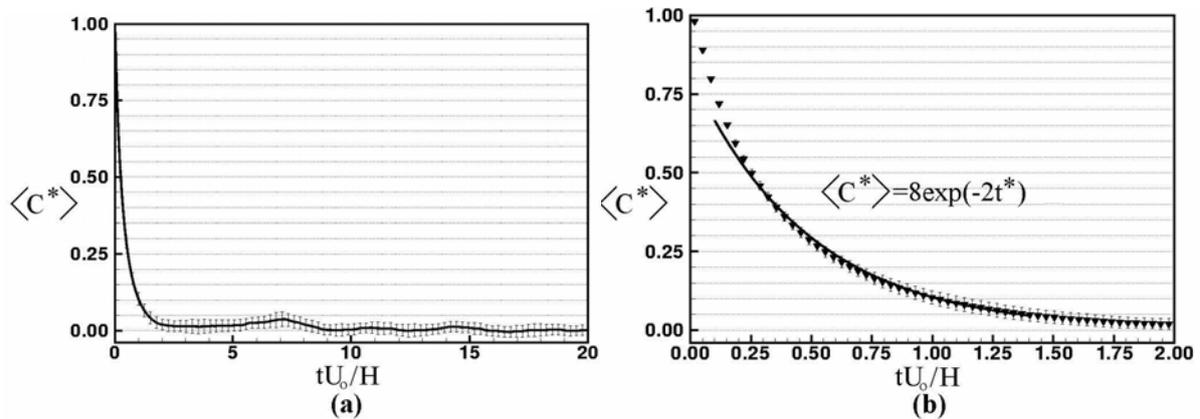


Fig. 4. (a) Función auto correlación normalizada. (b) Decaimiento exponencial.

ción presentada en (12) es del orden de 10^{-7} , de forma que la distribución del proceso puede ser considerada prácticamente normal.

4.4. Análisis de larga duración

Por medio de un análisis de larga duración es posible la determinación del tiempo de correlación del flujo y del tiempo a partir del cual $C(\tau)=0$. El tiempo de correlación está relacionado con la memoria que el fenómeno tiene de los eventos anteriores.

El gráfico de la función de autocorrelación normalizada, en la que se ve un proceso estocástico sin correlación temporal, está presentado en la Fig. 4a. El detalle del decaimiento exponencial predicho por la Ec. (9) es confirmado en la Fig. 4b, donde se verifica el decaimiento típico de autocorrelaciones de procesos estocásticos.

Partiendo de la ecuación $\langle C^* \rangle = 8,1 \exp(-2,03t)$, que aproxima el decaimiento exponencial de la función de autocorrelación en la Fig. 4, se puede calcular el tiempo de correlación adimensional, resultando en $\Theta^* = 0,5$, que representa un tiempo dimensional de 0,003 segundos. Otra manera de obtenerse el tiempo de correlación es a través de la integral dada por (21), cuyo resultado es $\Theta = 0,0038$ s. Las dos estimativas coinciden, en orden de magnitud, con una escala de tiempo integral con base en $\langle U_\infty \rangle$ y H . Con la estimativa de tiempo de autocorrelación, se puede decir que $T=0,3$ s es un tiempo suficiente para realizar un análisis estocástico estacionario del proceso.

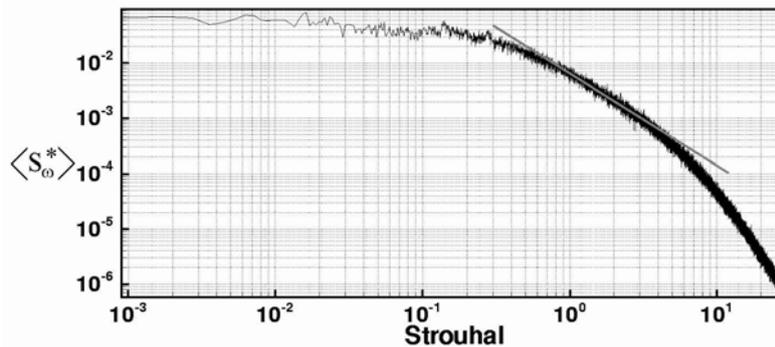


Fig. 5. Espectro de potencia. La recta representa un detalle del decaimiento de Kolmogorov. El número de Strouhal es definido como $\omega H/U$.

En los análisis de larga duración, las intensidades de turbulencia fueron calculadas a partir de las energías cinéticas de turbulencia obtenidas de la integración de los espectros de potencia. La densidad espectral de energía cinética de turbulencia, obtenida a partir de la media estadística entre todas las realizaciones, para cada frecuencia adimensional, es presentada en la Fig. 5.

La intensidad de turbulencia obtenida de la integración del espectro mostrada en la Fig. 5 es del 31%. Este resultado está de acuerdo con la intensidad media de turbulencia obtenida analizándose el resultado mostrado en la Fig. 3b.

De esta manera, es posible estimar el error, relacionado a la media estadística, cometido al asumirse la hipótesis de ergodicidad. Aplicándose (9) y usándose $\Theta = 0,003$ s, se obtiene $\varepsilon_{\Theta} = 1,1\%$. Por otro lado, usándose una escala de tiempo integral se obtiene $\varepsilon_{\infty} = 1,4\%$. El error teórico, calculado por el desvío estándar entre la media temporal y la estadística, es del 1,1%.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha desarrollado una metodología de tratamiento estocástico de señales turbulentas. Esta metodología, que tiene como base medias de probabilidad y momentos estocásticos en vez de medias y momentos temporales, es más rigurosa y proporciona informaciones sobre las escalas de tiempo característica que son más fiables, para el flujo analizado. Además, permite verificar si la hipótesis de ergodicidad puede o no ser utilizada en el fenómeno. En el caso afirmativo, proporciona herramientas para la evaluación del error introducido en el análisis cuando esta hipótesis es utilizada.

En el caso estudiado, se puede verificar que el tiempo de adquisición de la señal turbulenta es suficientemente grande, ya que los errores asociados a las velocidades medias calculadas utilizándose un abordaje estocástico y temporal, están por debajo de los 2%. Aunque la frecuencia de adquisición utilizada es considerablemente mayor que las menores frecuencias previstas por el análisis de escalas, se puede considerar que el valor utilizado es satisfactorio, ya que prácticamente toda la energía cinética de turbulencia del flujo fue capturada en la banda utilizada. Se deduce también que el flujo analizado puede ser descrito en términos de una distribución normal.

En el trabajo Oliveira et al (2006), hemos aplicado la metodología desarrollada en este trabajo en flujos turbulentos donde no se verifique plenamente la hipótesis de ergodicidad y en los cuales el proceso estocástico presente menos características de aleatoriedad. Igualmente, en Oliveira et al (2007), se ha evaluado la metodología presentada en este trabajo a resultados numéricos de simulaciones de grandes remolinos de turbulencia o de simulaciones directas. Con este tipo de análisis, se ha podido determinar parámetros importantes para este tipo de simulaciones numéricas, como el tamaño necesario de las series temporales para que las mismas sean representativas del flujo, así como el error cometido al adoptarse la hipótesis de ergodicidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte parcial de las agencias CNPq y CAPES del Gobierno de Brasil.

REFERENCIAS

- [1] Batchelor, G.K., *The Theory of Homogeneous Turbulence*. Cambridge University Press, Great Britain (1970)
- [2] Bentad, J.S., Piersol, A.G., *Random Data, Analysis and Measurements Procedures*, 2^a edición. John Wiley and Sons, California, United States (1986)
- [3] Bobenrieth, R.F.M., “Simulação Numérica de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos”, Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos (1996)
- [4] Carvalho, G.C., Zandonade, P.S.K., Cunha, F.R., Alfaro, S.C.A., “A Stochastic Approach to the Analysis of Gas Metal arc Welding Data (process control & monitoring)”. *Proceedings of American Welding Society: Gas Metal Arc for 21st Century*, **01**, 205 (2001)
- [5] Comte-Bellot, G., Corrsin, S., “Simple Eulerian Time Correlation of Full- and Narrow-Band Velocity Signals in Grid Generated Isotropic Turbulence”, *Journal of Fluid Mechanics*, **48(2)**, 273-337 (1971)
- [6] Ifeachor, C.E., Jervis, B.W., *Digital Signal Processing*. Addison-Wesley, United States (1993)
- [7] Monin, A.S., Yaglom, A.M., *Statistical Fluid Mechanics II*, 3^a edición. The MIT Press, United States (1987)
- [8] Oliveira, T.F., “Tratamento Estatístico e Simulações Numéricas de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos”, Tesis de Máster, Universidade de Brasília, Brasília (2003)
- [9] Oliveira, T.F., Cunha, F.R., Bobenrieth, R.F., “A stochastic analysis of a nonlinear flow response”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, **21(4)**, 377–383 (2006)
- [10] Oliveira, T. F., Miserda, R.B., Cunha, F.R., “Dynamical Simulation and Statistical Analysis of Velocity Fluctuations of a Turbulent Flow Behind a Cube”, *Mathematical Problems in Engineering* (doi: 10.1155/2007/24627), vol. 2007, 28 pages (2007)
- [11] Taylor, G.I., “Statistical Theory of Turbulence Part I”, *Proceedings of the Royal Society*, **A 151**, 421-464 (1935)
- [12] Yeung, P.K., Pope, S.B., “Lagrangian Statistics from Direct Numerical Simulations of Isotropic Turbulence”, *Journal of Fluid Mechanics*, **207**, 531-586 (1989)

A STOCHASTIC METHODOLOGY FOR TURBULENT FLOW ANALYSIS

Abstract – The main focus of the present work is the development of a stochastic methodology for the treatment of turbulent signals obtained from experiments or numerical simulations. The characterization of the flow based on its ergodicity and the evaluation of the errors inserted in the analysis when the process is considered to be statistically steady and ergodic, are also aimed. In order to do so, an analysis of time series based upon the statistical moments of several ensembles of realizations for the same experiment is carried out. The flow around a cube mounted on a flat plate is the source of experimental data. A statistical analysis was carried out as well as the evaluation of the error associated with the ergodic hypothesis. This analysis gives quantitative support to determine the time window and frequency that should be used for the data acquisition. It is shown that the methodology proposed in this work is able to predict the error associated with the ergodic hypothesis..

Keywords – Stochastic analysis, Turbulence, Ergodicity, Anemometry, Statistical errors.

