

MÉTODO DE MONTE CARLO E TRANSFORMADA DE ONDALETAS APLICADOS NA ANÁLISE DE SINAIS TEMPORAIS BIESTÁVEIS DE DOIS CILINDROS CIRCULARES POSICIONADOS LADO A LADO

Alexandre Vagtinski de Paula, vagtinski@mecanica.ufrgs.br

Sergio Viçosa Möller, svmoller@ufrgs.br

Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica – PROMEC

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Rua Sarmiento Leite, 425, Fone/Fax: +55 (51) 3308-3228

90050-170 Porto Alegre, RS, Brasil

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo acerca do fenômeno da biestabilidade que ocorre em escoamentos turbulentos incidindo sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado. Para tal, a técnica de Monte Carlo é empregada na geração de números aleatórios, respeitando uma distribuição t de Student, visando à obtenção de funções de densidade de probabilidade (PDF's) alteradas pelo fenômeno em estudo. Os números aleatórios gerados são então comparados com séries temporais de velocidade axial e transversal e do ângulo de desvio do escoamento, obtidas com a técnica de anemometria de fio quente à temperatura constante, em um canal aerodinâmico. Transformadas discretas e contínuas de ondaletas também são utilizadas, possibilitando tanto a definição de uma pseudofrequência, que visa representar a provável frequência média de troca entre os modos do escoamento, quanto à análise do conteúdo de energia das séries temporais, se mostrando ferramentas indispensáveis na análise de sinais turbulentos transientes. Os resultados mostram que nas trocas entre os modos do escoamento o acréscimo de velocidade axial é acompanhado pela componente transversal, e as PDF's obtidas pelo método de Monte Carlo apresentam a predominância de dois estados principais de energia. O ângulo de desvio do escoamento tende a apresentar flutuações menores à medida que o escoamento muda de direção, da esteira larga para a esteira estreita de vórtices. Uma análise temporal do comportamento do sinal de velocidade axial mostra que as PDF's mudam intermitentemente, e seu conteúdo de energia é maior e mais espalhado no domínio da frequência na medida em que a velocidade média é maior. A esteira larga de vórtices, que possui uma velocidade média menor que a esteira estreita, possui uma concentração maior em frequência, porém com menor energia. Uma comparação entre as probabilidades de ocorrência dos dois modos do escoamento da componente axial mostram que não há uma correlação evidente das mudanças de modo com o tempo.

Palavras-chave: escoamento turbulento, anemômetros de fio quente, cilindros circulares, método de Monte Carlo, função densidade de probabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos ao redor de cilindros circulares são encontrados em diversas aplicações de engenharia, como oleodutos e gasodutos, em linhas de transmissão de energia elétrica, e em tubulações de transporte e prospecção de petróleo *offshore*, conhecidas como *risers*. Diversos pesquisadores têm estudado a disposição de dois cilindros circulares dispostos lado a lado como forma de simplificação de processos mais complexos, como no interior de dispositivos trocadores de calor e de núcleos de reatores nucleares, devido à simplicidade de montagem para análise experimental e da implementação de simulações numéricas. O correto entendimento dos fenômenos que ocorrem neste tipo de geometria simplificada fornece condições para uma análise mais acurada do comportamento dinâmico de estruturas relativamente mais complexas.

Bearman e Wadcock (1973) identificaram a presença de intermitências no escoamento sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado, onde a esteira estreita de vórtices que emana da fenda entre os cilindros se move de um lado para outro, de modo randômico. Os autores chamaram este fenômeno de biestabilidade.

Guillaume e LaRue (1999) mostram a presença de instabilidades e diferentes modos de escoamento em arranjos de dois, três e quatro tubos dispostos lado a lado em relação à corrente principal.

Alam *et al.* (2003) estudaram experimentalmente o escoamento ao redor de dois cilindros dispostos lado a lado e também identificaram a ocorrência de um jato desviado que emana entre os dois cilindros e se direciona ora para um dos lados, ora para o lado oposto, de maneira súbita em períodos irregulares de tempo.

Indrusiak *et al.* (2005) identificaram um regime de escoamento não estacionário em um banco de tubos de arranjo quadrangular. A princípio, este resultado inesperado e muito semelhante ao comportamento biestável, só foi revelado através da decomposição dos sinais em bandas de frequências através da aplicação das transformadas de ondaletas.

Olinto *et al.* (2009) mostraram a presença da biestabilidade no interior de bancos de tubos de arranjo quadrangular para as razões de espaçamento $P/D=1,26$, $P/D=1,4$ e $P/D=1,6$. Uma técnica de visualização de escoamento com injeção de tinta foi aplicada buscando consolidar a interpretação dos resultados mensurados em laboratório.

De Paula (2008) realizou medições com a técnica de anemometria de fio quente em canal aerodinâmico com duas sondas retas, posicionadas na esteira de cada cilindro, identificando o fenômeno biestável em dois cilindros dispostos lado a lado, três cilindros (um a montante e dois a jusante) e em duas fileiras de cilindros em arranjo triangular. Também foram realizadas visualizações de escoamento em canal hidráulico com o emprego de injeção de corantes.

Como a principal característica da vibração induzida por escoamento em bancos de tubos é a randomicidade das respostas dinâmicas dos tubos, mesmo sendo os tubos de dimensões idênticas e arranjados em fileiras equidistantes e submetidos a escoamentos uniformes (Zdravkovich e Stonebanks, 2000), surge então a necessidade de melhor compreender como as trocas entre os modos do escoamento ocorrem nesta geometria simplificada, através de uma quantificação estatística, visto que este fenômeno pode ser uma fonte adicional de instabilidades dinâmicas.

2. O FENÔMENO BIESTÁVEL

O escoamento cruzado ao redor de dois cilindros circulares de diâmetro (D) posicionados lado a lado pode apresentar uma esteira com diferentes modos, que depende do passo (P), que é a distância entre seus centros. Assim, diferentes comportamentos podem ser encontrados para diferentes razões de espaçamento P/D (Sumner *et al.*, 1999).

Quando os cilindros estão em contato ($P/D=1$) eles se comportam como um único corpo rombudo, e devido ao aumento da distância entre a camada de cisalhamento livre de ambos os lados, o desprendimento de vórtices é menor do que para um único cilindro.

Para pequenos espaçamentos ($1,0 < P/D < 1,2$) os dois cilindros ainda se comportam como um corpo rombudo, mas o escoamento que emana da fenda entre eles aumenta a pressão de base e reduz as forças de arrasto de ambos os cilindros, com uma frequência de desprendimento de vórtices próxima da observada para o caso $P/D=1$. Neste caso, apenas uma esteira de vórtices é observada para os dois cilindros, e o desprendimento de vórtices ocorre apenas na camada de cisalhamento externa.

Para grandes espaçamentos ($P/D > 2,2$) o escoamento desviado desaparece, e as esteiras dos cilindros comportam-se de maneira mais independente, como corpos rombudos isolados. Contudo, ainda pode existir alguma interação ou sincronização entre eles, predominantemente através da formação de vórtices em fase oposta.

Para razões de espaçamento intermediárias ($1,2 < P/D < 2,0$) o escoamento é caracterizado por uma esteira estreita a jusante de um dos cilindros e uma esteira larga a jusante do outro (Fig. 1a e 1b). Este fenômeno gera duas frequências predominantes de desprendimento de vórtices, cada uma delas associada a uma esteira: a esteira estreita está associada com a maior frequência, e a esteira larga está associada com a menor frequência de desprendimento.

Através da fenda, o escoamento é desviado na direção de um dos cilindros, formando a esteira estreita. O escoamento biestável é caracterizado pela mudança no padrão de escoamento da fenda, de um lado para o outro, em períodos irregulares de tempo. Desta maneira, se a velocidade do escoamento for medida, por exemplo, ao longo de linhas tangentes as geratrizes externas dos cilindros, a jusante, um padrão de troca entre os modos do escoamento pode ocorrer conforme o ilustrado no esquema da Fig. 1c. De acordo com estudos anteriores, este padrão é independente do número de Reynolds e não está associado com possíveis desalinhamentos entre os cilindros ou influências externas, o que sugere ser uma característica intrínseca do escoamento.

De acordo com Kim e Durbim (1988) a transição entre dois estados assimétricos é completamente randômica e não está associada com uma frequência natural. Os autores concluíram que o tempo médio entre as transições é da ordem de 10^3 vezes maior que o período de desprendimento de vórtices, e através de uma análise dimensional observaram que o tempo médio entre as trocas decresce com o aumento do número de Reynolds.

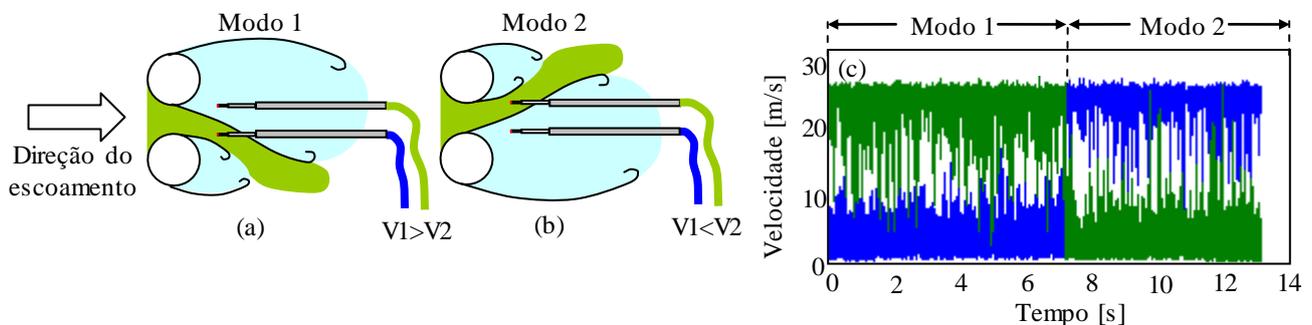


Figura 1. Representação esquemática do escoamento biestável para (a) modo 1 e (b) modo 2, e seus respectivos sinais característicos (c).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho utiliza séries temporais de velocidade axial e transversal e o ângulo de desvio do escoamento mensuradas a partir da técnica de anemometria de fio quente em canal aerodinâmico como dados de entrada para utilização de um método de Monte Carlo, visando à obtenção de funções de densidade de probabilidade (PDF's) alteradas pelo fenômeno em estudo. Através desses dados também são utilizadas ferramentas matemáticas apropriadas para análise de sinais turbulentos transientes, visando à análise conjunta nos domínios do tempo e da frequência, bem como da distribuição de seu conteúdo de energia.

3.1. Técnica experimental

As séries temporais são obtidas através da técnica de anemometria de fio quente empregada em um canal aerodinâmico (Fig. 2). Com seção transversal constante, o canal aerodinâmico empregado é construído com placas de acrílico transparente, e conta com uma seção de testes de 146 mm de altura por 193 mm de largura. O fluido de trabalho (ar) é impelido por um ventilador centrífugo de 640 W, e passa por homogeneizadores e telas para reduzir a intensidade de turbulência para 1% na seção de testes. A velocidade de referência do escoamento é medida com o emprego de um tubo de Pitot, posicionado na parede lateral do canal, a montante da seção de testes. Os cilindros circulares utilizados são construídos de policloreto de vinila (PVC), e ambas as extremidades são tampadas para evitar o fenômeno de ressonância acústica. Seus diâmetros externos são de 25,1 mm e são rigidamente fixados na parede superior da seção de testes na posição vertical. Uma sonda de fio quente dupla (DANTEC 55P71 Special), do tipo reta/inclinada, é utilizada na obtenção das séries temporais através de um sistema de anemometria a temperatura constante DANTEC *StreamLine*. Uma placa de aquisição de 16 bits (NATIONAL 9215-A) com interface USB foi utilizada para converter o sinal analógico em séries temporais. O suporte da sonda é alinhado em relação à tangente da geratriz interna de um dos cilindros, e seu posicionamento é realizado por intermédio de uma mesa milimétrica tridimensional, disposta a jusante dos dois cilindros, a 200 mm da saída do canal. O erro médio na determinação dos valores das séries temporais com a presente técnica é de +/- 3%.

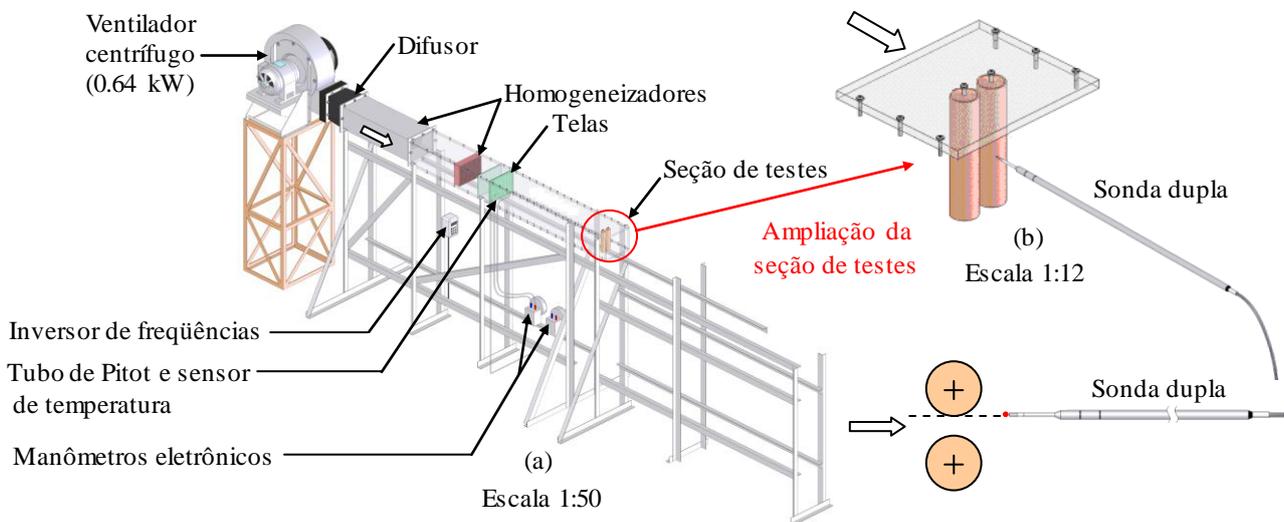


Figura 2. Vistas esquemáticas: (a) canal aerodinâmico, (b) seção de testes.

3.2. Simulação via método de Monte Carlo

Na literatura, o fenômeno biestável é comumente associado e considerado como sendo um processo aleatório. Assim, um método de Monte Carlo é utilizado para a geração seqüenciada de números randômicos. Estes números são gerados a partir de distribuições de probabilidades contínuas, e verificados a cada nova simulação, visando à obtenção de funções de densidade de probabilidade alteradas pelo fenômeno da biestabilidade, que são obtidas da comparação entre os números aleatórios gerados conforme uma função t de *Student* e as séries temporais de velocidade axial e transversal e do ângulo de desvio do escoamento turbulento sobre os dois cilindros.

3.3. Ferramentas matemáticas

Uma análise conjunta nos domínios do tempo e da frequência pode ser realizado por intermédio de transformadas de ondaletas (*wavelet transforms*), discretas e contínuas. Uma análise de ondaletas é aplicada para sinais que variam no tempo, onde a hipótese da estacionariedade não pode ser mantida. As transformadas discretas de ondaletas (TDO) são aplicadas na decomposição de sinais temporais em diversos níveis e diversas bandas de frequência, de acordo com o nível de decomposição selecionado. As transformadas contínuas de ondaletas (TCO) são utilizadas na análise do conteúdo de energia de um sinal. No presente trabalho foi utilizada a função Daubechies “db20” como base para ambos os tipos de transformadas de ondaletas. Indrusiak (2004) apresenta uma revisão mais completa sobre transformadas de ondaletas discretas e contínuas aplicadas a escoamentos turbulentos sobre aceleração e desaceleração. A análise matemática foi realizada com o uso do programa Matlab® e suas bibliotecas específicas para análise estatística, espectral e de transformadas de ondaletas.

4. RESULTADOS

Os experimentos foram realizados com um número de Reynolds $4.36 \cdot 10^4$ e uma razão de espaçamento de $P/D=1.26$. A frequência de aquisição das séries temporais foi de 1 kHz, sendo que um filtro de corte (passa-baixa) de 300 Hz foi utilizado para evitar o dobramento das altas frequências no espectro. Os sinais de velocidade axial e transversal, e o ângulo de desvio do escoamento são mostrados nas Figs. 3a, 3b e 3c, respectivamente. Da Fig. 3a são observadas diversas mudanças entre dois patamares predominantemente de velocidade média (modos do escoamento) da componente axial, correspondentes a 3,0 m/s (esteira larga – modo 1) e 18,6 m/s (esteira estreita – modo 2). Estas mudanças são acompanhadas pela componente transversal (Fig. 3b), e, na medida em que o escoamento muda de direção, da esteira larga para a esteira estreita, o ângulo de desvio tende a apresentar flutuações menores (Fig. 3c).

Das simulações com o método de Monte Carlo aplicadas aos sinais de velocidade axial e transversal é possível observar a predominância entre dois estados principais de energia, que representam os dois patamares de velocidade média referentes às esteiras larga e estreita de vórtices (Figs. 3d e 3e). A PDF do ângulo de desvio do escoamento mostra a concentração ao redor de um único valor (Fig. 3f). Para diferentes intervalos de tempo do sinal de velocidade axial, é possível observar que o comportamento das PDF's alteradas pelo fenômeno da biestabilidade muda intermitentemente (Fig. 4), entre os modos 1 e 2. Comparações entre as probabilidades de ocorrência dos dois modos, a partir do sinal axial de velocidade, mostram que não há uma correlação evidente entre as mudanças com o tempo (Fig. 5).

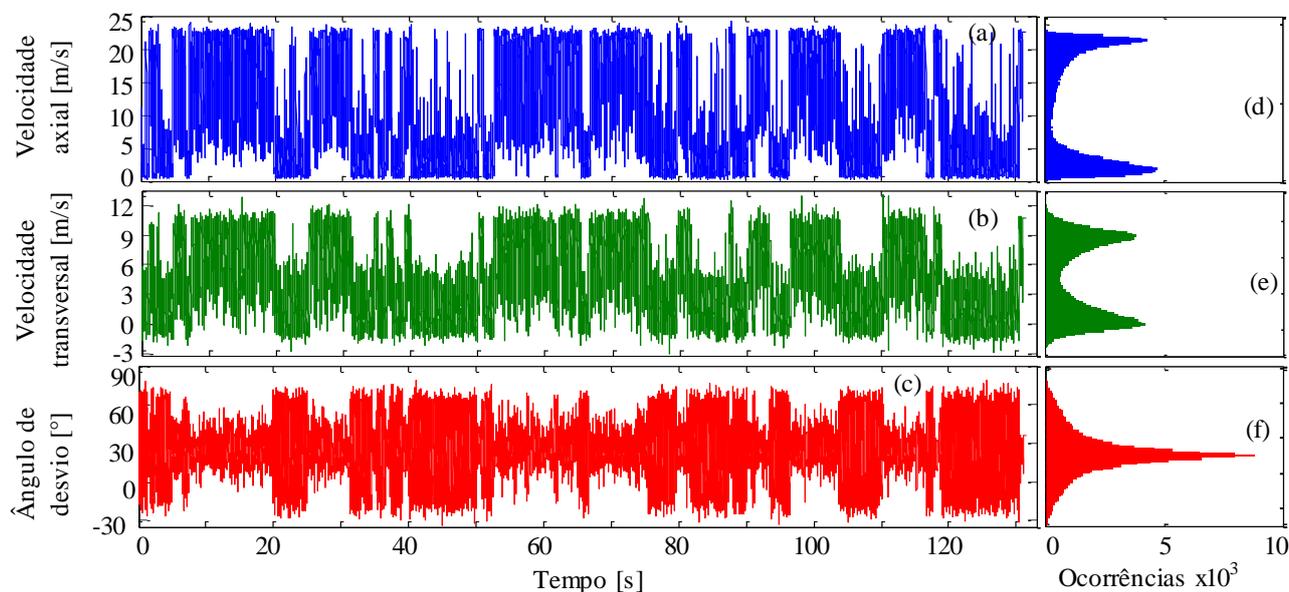


Figura 3. (a) Sinal de velocidade axial, (b) sinal de velocidade transversal e (c) ângulo de desvio do escoamento, com suas respectivas PDF's ((d), (e) e (f)).

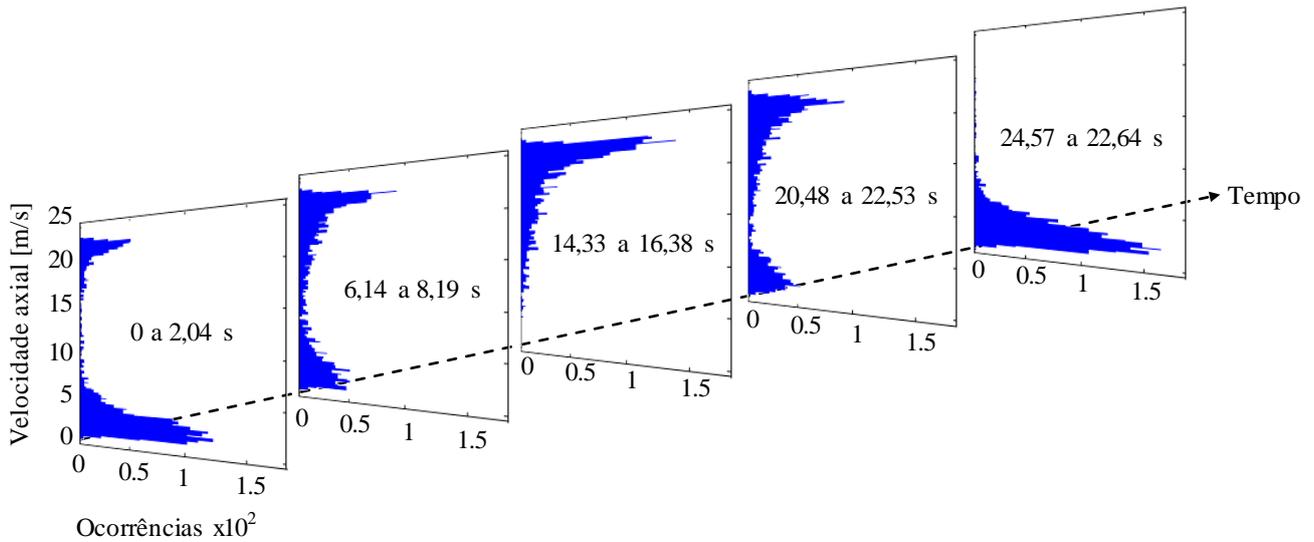


Figura 4. PDF's do sinal de velocidade axial para diferentes intervalos de tempo.

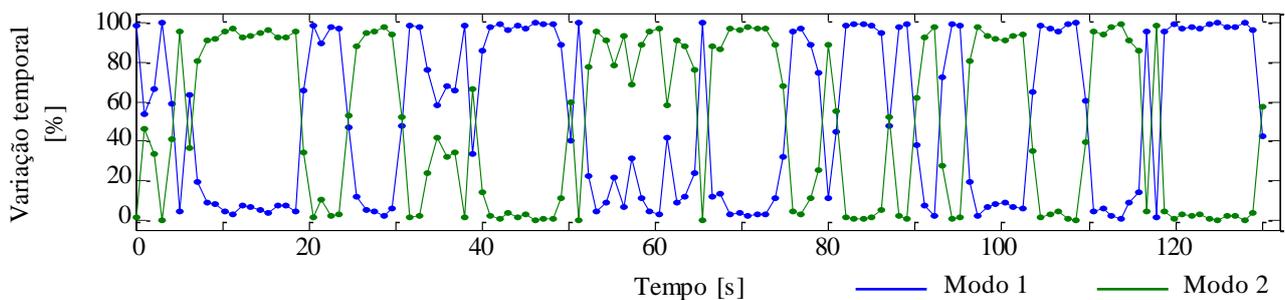


Figura 5. Variação temporal dos modos do escoamento do sinal de velocidade axial.

Como o fenômeno da biestabilidade não possui um período definido entre as trocas dos patamares de velocidade média, torna-se interessante definir um parâmetro que represente de modo geral tal variação. Calculou-se então a pseudofrequência do sinal de velocidade axial, que representa a provável frequência média das trocas, analisada após a decomposição do sinal por intermédio de uma transformada discreta de ondaletas (Fig. 6). Deste modo, o sinal de velocidade axial é reconstruído para uma banda de frequências de 0 até 0,976 Hz (Fig. 6b). Isso significa que acima deste valor as mudanças de direção do escoamento não serão consideradas como “estáveis”, e não serão contabilizadas no cálculo da pseudofrequência do fenômeno biestável. O valor calculado da pseudofrequência é de aproximadamente 0,15 Hz, ou seja, durante os 131 segundos de aquisição de dados, ocorreram em média 39 trocas dos modos do escoamento, ou seja, completaram-se 19,5 ciclos ou períodos, com tempo médio de 6,72 segundos. Este valor foi avaliado para várias medições consecutivas. A Fig. 7 mostra uma análise conjunta da transformada contínua de ondaletas e da reconstrução do sinal de velocidade axial por transformada discreta de ondaletas, de onde é possível observar que há um aumento de energia nos instantes de tempo em que a velocidade média é mais alta, com um relativo espalhamento das frequências, desde 10 Hz até aproximadamente 120 Hz. Quando o escoamento da fenda muda de direção, para o patamar de velocidade média mais baixa, há uma diminuição do conteúdo de energia do sinal acompanhado por uma maior concentração da faixa de frequências (até aproximadamente 30 Hz), o que mostra que a esteira larga de vórtices, que possui uma velocidade média menor que a esteira estreita, possui uma concentração maior em frequência, porém com menor energia.

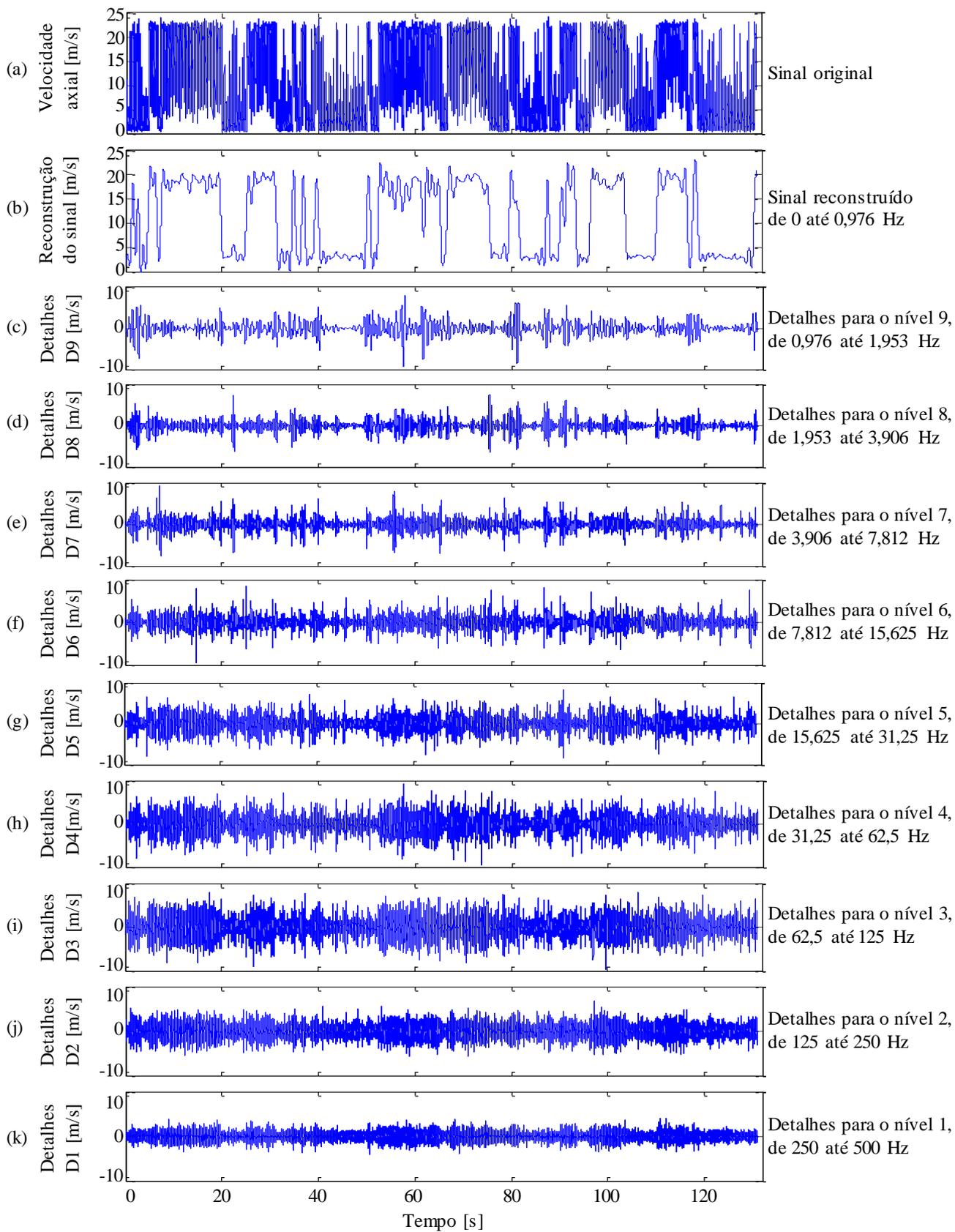


Figura 6. Recomposição do sinal de velocidade axial por transformada discreta de ondaletas (TDO).

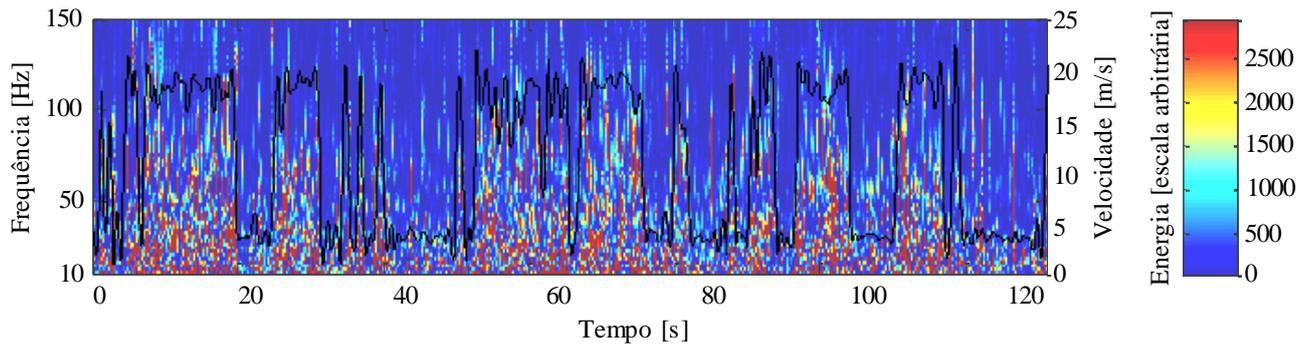


Figura 7. Análise conjunta da TCO e da reconstrução do sinal de velocidade axial.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo acerca do fenômeno da biestabilidade em escoamentos turbulentos incidindo sobre dois cilindros circulares dispostos lado a lado, utilizando a técnica de Monte Carlo e séries temporais de velocidade axial e transversal e do ângulo de desvio do escoamento, obtidas com a técnica de anemometria de fio quente a temperatura constante, em um canal aerodinâmico. Transformadas discretas e contínuas de ondaletas também foram utilizadas, se mostrando ferramentas indispensáveis na análise de sinais turbulentos transientes.

Os resultados observados através técnica aplicada mostram que nas trocas entre os modos do escoamento o acréscimo de velocidade axial é acompanhado pela componente transversal, e as PDF's obtidas pelo método de Monte Carlo apresentam a predominância de dois estados principais de energia, sendo que na mudança da esteira larga de vórtices para a esteira estreita, o ângulo de desvio do escoamento tende a apresentar flutuações menores à medida que o escoamento muda de direção. Através de uma análise ao longo do tempo foi observado que as PDF's do sinal de velocidade axial mudam intermitentemente. Uma comparação entre as probabilidades de ocorrência dos dois modos do escoamento da componente axial mostram que não há uma correlação evidente das mudanças de modo com o tempo.

Um valor que representa de modo geral a provável frequência média das trocas entre os modos do escoamento, chamada de *pseudofrequência*, analisado após a decomposição do sinal por intermédio de uma transformada discreta de ondaletas pode ser definido. O conteúdo de energia do sinal de velocidade axial, obtido através de transformada contínua do ondaletas, é maior e mais espalhado no domínio da frequência na medida em que a velocidade média é maior. A esteira larga de vórtices, que possui uma velocidade média menor que a esteira estreita, possui uma concentração maior em frequência, porém com menor energia.

Trabalhos futuros contemplando a análise de diferentes razões de espaçamento P/D e estudos no interior de bancos de tubos de diferentes geometrias aplicando o método de Monte Carlo são esperados, na busca da caracterização estatística da biestabilidade através de curvas de distribuição de probabilidade alteradas pelo fenômeno em estudo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq.

7. REFERÊNCIAS

- Alam, M. M., Moriya, M. e Sakamoto, H., 2003, "Aerodynamic Characteristics of Two Side-by-Side Circular Cylinders and Application of Wavelet Analysis on the Switching Phenomenon", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 18, pp. 325–346.
- Bearman, P. W. e Wadcock, A. J., 1973, "The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 61, Part 3, pp. 499-511.
- De Paula, 2008, "Estudo Sobre o Fenômeno da Biestabilidade de Escoamentos Turbulentos em Bancos de Tubos de Arranjo Triangular", Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 157 p.
- Guillaume, D. W. e LaRue, J. C., 1999, "Investigation of the flopping regime with two-, three- and four-cylinder arrays", *Experiments in Fluids*, Number 27, pp. 145-156.
- Indrusiak, M. L. S. ; Goulart, J. N. V. ; Olinto, C. R. ; Möller, S. V. 2005. Wavelet Time-frequency Analysis of Accelerating and Decelerating Flows in a Tube Bank. *Nuclear Engineering and Design*, v. 235, p. 1875-1887.
- Kim, H. J. e Durbin, P. A., 1988, "Investigation of the Flow Between a Pair of Circular Cylinders in the Flopping Regime", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, pp. 431-448.
- Olinto, C. R. ; Indrusiak, M. L. S. ; Endres, L. A. M. ; MÖLLER, S. V. 2009. Experimental study of the characteristics of the flow in the first rows of tube banks. *Nuclear Engineering and Design*, v. 239, p. 2022-2034.

- Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J. e Païdoussis, 1999, “Fluid Behaviour of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 13, pp. 309-338.
- Zdravkovich, M. M. e Stonebanks, K. L., 2000, “Intrinsically Non-Uniform and Metastable Flow in a Behind Tube Arrays”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 4, pp. 305-319.

8. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

MONTE CARLO METHOD AND WAVELET TRANSFORM APPLIED IN ANALYSIS OF BISTABLE TIME SERIES OF TWO SIDE-BY-SIDE CIRCULAR CYLINDERS

Alexandre Vagtinski de Paula, vagtinski@mecanica.ufrgs.br

Sergio Viçosa Möller, smoller@ufrgs.br

Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica – PROMEC
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Rua Sarmiento Leite, 425, Fone/Fax: +55 (51) 3308-3228
90050-170 Porto Alegre, RS, Brasil

Abstract. *This work presents a study about the bistable phenomenon which occurs in turbulent flows impinging on two side-by-side circular cylinders. A Monte Carlo method is applied to generate random numbers, according to a Student's t distribution, to obtain probabilistic distribution functions (PDF's) changed by the phenomenon under study. The random numbers are generated and then compared with time series of axial and transversal velocity, as well as the angle of deviation of the flow, obtained with the constant temperature hot wire anemometry technique in an aerodynamic channel. Discrete and continuous wavelet transforms are used, enabling not only the definition of a pseudofrequency, which can represent the probable mean frequency of the switches between the flow modes, but also the analysis of the energy content of the time series, that shows to be an indispensable tool for the analysis of transient turbulent signals. The results show that in the changes between the flow modes the increase in the axial velocity component is accompanied by increased of the transverse component, and the PDF's obtained by the Monte Carlo method present the predominance of two major states of energy. The angle of deviation of the flow tends to have smaller fluctuations when the flow direction changes from the wide near-wake to the narrow near-wake. A temporal analysis of the axial velocity behavior shows that the PDF's changes intermittently, and its energy content is higher and more spread in frequency domain when the mean velocity increases. The wide near-wake, which has a higher frequency concentration, has a higher mean velocity than the narrow near-wake, but is less in energy. Comparisons between the probabilities of occurrence of the two modes show no evident correlation between the changes with time.*

Keywords: *turbulent flow, hot wire anemometry, circular cylinders, Monte Carlo method, probability density function.*