

INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO DINÂMICO EM CANAIS FECHADOS CONTENDO FENDA ESTREITA

Tiago de Melo, tiago.melomec@gmail.com

Jhon Nero Vaz Goulart, jvaz@unb.br

Carla Tatiana Anflor, anflor@unb.br

Grupo de Mecânica Experimental e Computacional – GMEC – Universidade de Brasília - UnB
Área Especial de Indústria Projeção A – Gama, DF, Brasil – CEP 72.405-610.

Resumo. Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental do escoamento turbulento em canais compostos fechados contendo uma única fenda estreita. Para a avaliação foram empregadas as técnicas de análise PSD (Power Spectral Density) e ferramentas de análise tempo-frequência para o estudo das velocidades e flutuações. Como técnica experimental a anemometria de fio quente foi utilizada para a aquisição de dados. Foram investigados doze seções com diferentes relações de P/D (3,33, 5 e 11). O número de Reynolds foi considerado constante, $Re = 7,98 \times 10^4$. Os principais resultados mostraram que as características dinâmicas das estruturas no escoamento turbulento não são apenas dependentes da relação P/D , mas também o comprimento da seção de teste, juntamente com a largura da fenda. Padrões periódicos das flutuações de velocidade, sugerem a presença de estruturas de grande escala, podendo ser visto a medida que o canal aumenta e os números de Strouhal determinados na forma usual tendem aos encontrados na literatura. O espectrograma da transformada contínua de Ondaletas (TCO) mostrou que diferentes energias estão distribuídas no domínio tempo-frequência. Além disso, através da avaliação via transformada discreta de pacotes de ondaletas (TDPO), pode-se determinar o valor de Strouhal para cada banda de frequência estudada, revelando-se mais de um número de Strouhal para o processo, diferentemente do que acontece através da análise de Fourier, onde estabelece um único valor de Strouhal.

1. INTRODUÇÃO

Canais compostos são conhecidos como canais onde há a presença de um canal principal, por onde o escoamento se desenvolve com facilidade, e contendo uma ou mais fendas, Figura 1. A investigação do escoamento turbulento neste tipo de canal apresenta características peculiares como o aumento da intensidade de turbulência, bem como o coeficiente local de transferência de calor na região das fendas. A presença de pulsações do escoamento em geometrias bastante simples é mostrada nos trabalhos de Wu e Trupp, (1993), Meyer e Rehme, (1994 e 1995) e Souza et al., (2014).

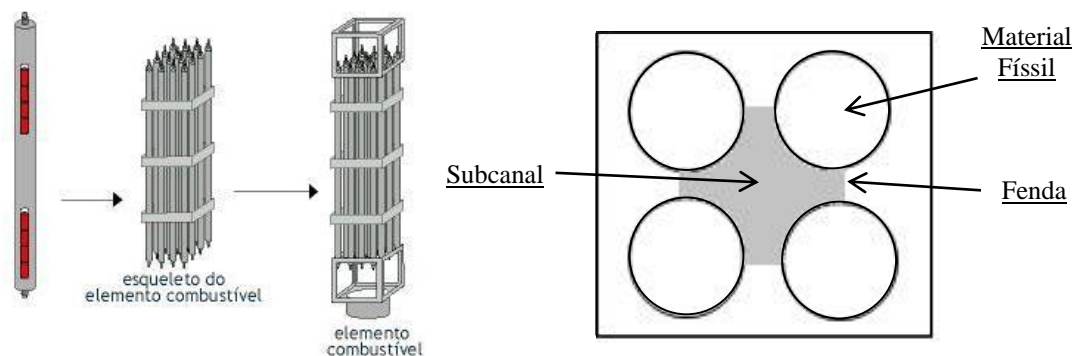


Figura 1. Elemento combustível de um reator de água pressurizada (PWR).

Segundo Möller, (1991), as instabilidades no escoamento em canais com fenda estreita são oriundas do próprio escoamento turbulento e tem como ponto de partida sua natureza estocástica levando a diferentes perfis instantâneos de velocidade de cada lado da fenda gerando uma força motriz que carregaria estes vórtices através da fenda. Ainda, segundo Rehme, (1992), essas estruturas de grande escala, que cruzam as fendas são a verdadeira origem do aumento do coeficiente de mistura (troca de calor, dispersão de poluentes entre outros processos difusivos), arrasto e emissão de ruídos, entre os subcanais.

Guellouz e Tavoularis, 2000, mostram que a formação destas estruturas coerentes em geometrias muito simples, demonstra claramente que tais estruturas não são derivadas assimetria ou qualquer outra particularidade em subcanais, mas um resultado inevitável de instabilidade. Mais tarde Goulart et al. (2013) mostraram, por meio de seus resultados de análise espectral da velocidade, vestígios em um canal composto, que o comprimento do canal e a largura da fenda desempenham um papel importante no aparecimento de grandes estruturas. Naquela época, os autores concluíram que a

relação P/D não é o único parâmetro não-dimensional que governa a dinâmica do escoamento turbulento, sendo, a dinâmica do movimento turbulento na fenda depende muito mais dos parâmetros D e L do que a relação P/D.

O estudo de outros tipos de canais também está presente na literatura, por exemplo escoamento em um canal circular excêntrico investigado por Piot e Tavoularis (2011) e, recentemente, por Choueiri e Tavoularis (2014). Nesse último estudo, os autores realizaram a visualização em um canal circular excêntrico com relação de d/D de 0,5 e uma excentricidade de $e = 0,80$, para um número de Reynolds $Re = 7300$. Os autores notaram um aumento do campo das flutuações um padrão periódico próximo a fenda estreita, assim como, vórtices em ambos os lados da fenda. Além disso, também foi possível observar regiões distintas ao longo do canal: uma região de entrada, uma região onde há o crescimento das flutuações e a região considerada de rápida mistura. Na região de entrada, a intensidade turbulenta tinha baixa magnitude e o comportamento periódico das flutuações de velocidade só foi observada após $Z/Dh \geq 9,0$.

Este trabalho experimental tem como objetivo investigar o comportamento dinâmico do escoamento turbulento em um canal composto fechado. As séries temporais de velocidades foram analisadas através das funções de Potência Espectral de Densidades - PSD e transformada contínua de ondaletas - TCO. O objetivo principal era avaliar como os parâmetros geométricos do canal são importantes para a formação de estruturas em grande escala. Os testes experimentais foram realizados sob o mesmo número de Reynolds, $7,98 \times 10^4$. Durante as experiências, tanto a largura da fenda e do comprimento da seção de ensaio são livres para qualquer alteração. A investigação incluiu 3 relações de P/D, ou seja, 11, 5 e 3,33. A dimensão P, profundidade da fenda, foi mantida constante, enquanto D foi modificado em 2, 4 e 6 mm. Sendo avaliados os resultados para 4 comprimentos diferentes da seção de ensaio, 250, 500, 1000 e 1500 mm.

2. FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

O estudo dos fenômenos do escoamento turbulento apresentados neste trabalho é baseado na obtenção das velocidades médias e de suas flutuações no escoamento em um canal fechado com uma única fenda estreita. Estes dados foram adquiridos como séries temporais, e cada série tem um comprimento e adquirida com uma determinada frequência de amostragem, conforme a necessidade de se dar maior ênfase a uma determinada característica do fenômeno. Todas as análises dos sinais obtidos foi realizada numericamente com o emprego do aplicativo computacional Matlab®, e seus pacotes de ferramentas (toolboxes) para análise de sinais (signal processing), tratamento estatístico (statistics) e ondaletas (wavelet).

Segundo Bueno, (2008), a análise espectral de séries temporais através da transformada de Fourier permite discriminar as frequências presentes nestas séries, porém, o faz de forma independente da localização no tempo. Igualmente, observa-se que esta forma de proceder a análise espectral melhor se aplica em séries temporais ergódicas, as quais se desenvolvem no tempo aleatoriamente, mas possuem momentos estatísticos invariantes.

A análise de séries temporais não estacionárias com uso de ondaletas (wavelet) tem se mostrado uma eficiente forma de tratamento, pois, pode proporcionar a localização na frequência e no tempo contrariamente ao que se obtém com a análise de Fourier.

2.1. Transformada de Fourier

A transformada de Fourier para uma série temporal infinita de $f(t)$, é dada pela Eq. (1):

$$X(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-ift} dt \quad (1)$$

onde $\hat{X}(f)$ são os coeficientes de Fourier. A função de auto densidade espectral - PSD, é o quadrado dos coeficientes de Fourier. Assim, o PSD pode ser calculado conforme segue na Eq. (2):

$$P_{xx}(f) = |X(f)|^2 \quad (2)$$

2.2. Transformada Contínua de Ondaletas

A base de Fourier é um conjunto de funções trigonométricas que são o resultado da decomposição do sinal original. Tais funções senoidais lidam apenas com a amplitude e frequência. Não há qualquer informação sobre o tempo é fornecida. A análise via transformada de ondaletas é um conjunto de coeficientes que surge da dilatação e translação de uma onda mãe que deve apresentar energia finita e média nula (Indrusiak et al., 2005, De Paula et al., 2013). A energia é, então, relacionada com uma escala a (frequência), um, e a translação b . A transformada contínua de Ondaletas (TCO) é uma das maneiras utilizadas para avaliação de sinais no domínio do tempo-frequência. A TCO de uma função $f(t)$ é dada pela Eq. (3).

$$\tilde{X}(a,b) = \int_t f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad a,b \in R, a \neq 0 \quad (3)$$

onde estão as próprias funções e a e b wavelet são os parâmetros que lidam com escala (frequência) e de translação. Assim, a potência do sinal atribuído a uma determinada frequência e o tempo pode ser calculado como a seguir

$$P_{xx}(a,b) = |\tilde{X}(a,b)|^2 \quad (4)$$

a frequência associado a uma escala é então alcançado a partir Abry (1997).

$$f = \frac{F_\psi \cdot F_s}{a} \quad (5)$$

onde F_ψ é uma pseudo-frequência que pertence a ondaleta e a é a frequência de amostragem dos dados. Durante os experimentos a frequência de aquisição foi de 3 kHz.

2.3. Transformada Discreta de Pacotes de Ondaletas

A transformada de pacotes de ondaletas é uma generalização de transformada de ondaletas que permite uma análise mais detalhada do sinal. Na transformada de ondaletas, um passo genérico do algoritmo piramidal divide os coeficientes de aproximação em duas partes, obtendo um novo vetor de coeficientes de aproximação numa escala que é o dobro da anterior e um vetor detalhes, que são informações perdidas entre as duas aproximações sucessivas, também numa escala igual ao dobro da anterior. O passo seguinte consiste em dividir o novo vetor de coeficientes de aproximação, os detalhes sucessivos não são nunca redivididos. Na transformada de pacotes de ondaletas o algoritmo piramidal é mudado de maneira que os detalhes de cada passo genérico são novamente analisados, resultando dois novos vetores. Cada um com o dobro da escala do vetor original. A Figura 2, ilustra o comportamento do algoritmo piramidal para a transformada discreta de pacotes de ondaletas.

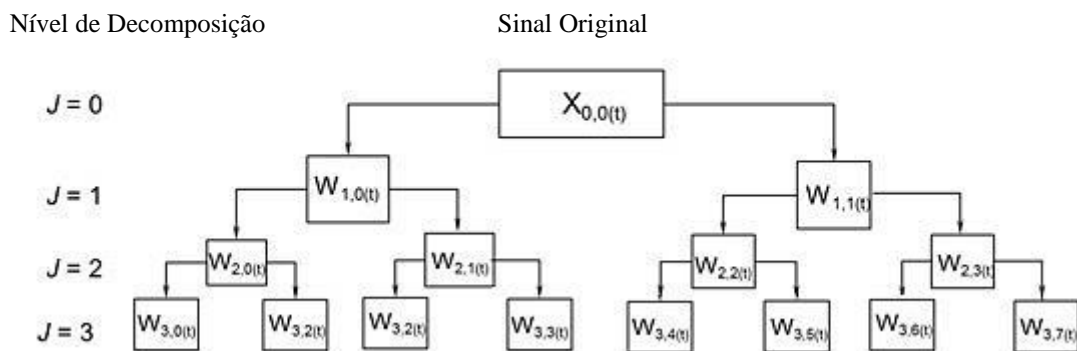


Figura 2. Árvore de Decomposição da transformada de pacotes de ondaletas em nível 3.

A transformada de pacotes de ondaletas é a aplicação que associa um sinal $x(t)$ aos seus coeficientes de pacotes de ondaletas, calculados pela eq. 6.

$$\tilde{X}_{(j,m,k)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,m,k}(t) dt \quad (6)$$

E sua transformada inversa é determinada pela eq. 7.

$$x(t) = \sum_j \sum_m \sum_k \tilde{X}_{(j,m,k)} \psi_{(j,m,k)}(t) \quad (7)$$

A conservação da energia é representada pela eq. 8.

$$\sum |\mathbf{x}(t)|^2 = \sum_j \sum_m \sum_k |\tilde{\mathbf{X}}_{(j,m,k)}|^2 \quad (8)$$

3. SEÇÃO DE TESTES E PROCEDIMENTO

O estudo experimental foi realizado em um canal aerodinâmico de dois metros de comprimento com seção transversal de 150 x 200 mm. O fluido de trabalho utilizado foi o ar à temperatura ambiente, impulsionado por um ventilador centrífugo controlado por um variador de frequência. A velocidade de referência foi assumida constante para todos os experimentos, 9,40 m/s. O número de Reynolds determinado no trabalho foi de $7,98 \times 10^4$.

A Figura 3 (a), apresenta uma vista esquemática do canal aerodinâmico. Dentro do canal, em uma das paredes, foram posicionadas duas placas de metal com espessura de $e = 1,2$ mm e L [mm], de modo a formar um subcanal com comprimento (L), profundidade (P) e largura (D). As dimensões L , P e D são livremente variados afim de formar diferentes configurações de sudcanal, avaliando diferentes relações de P/D para diferentes comprimentos. O sistema de coordenadas é apresentado na Fig. 3 (a) e (b).

Com base em trabalhos publicados anteriormente de Meyer (Meyer e Rehme, 1994 e 1995) e Goulart et al. (2013), são avaliadas três diferentes relações de P/D : $P/D = 3,33$, 5 e 11 . A variação das relações P/D são determinadas principalmente por mudanças na largura da fenda (D). A fim de investigar a dependência dos padrões do escoamento turbulento sobre a largura e comprimento da fenda, ambas as dimensões são alteradas dando origem a 12 seções de teste. Todas as configurações geométricas avaliados neste estudo estão representadas na Tabela 1. O comprimento da fenda varia de 250 mm a 1500 mm.

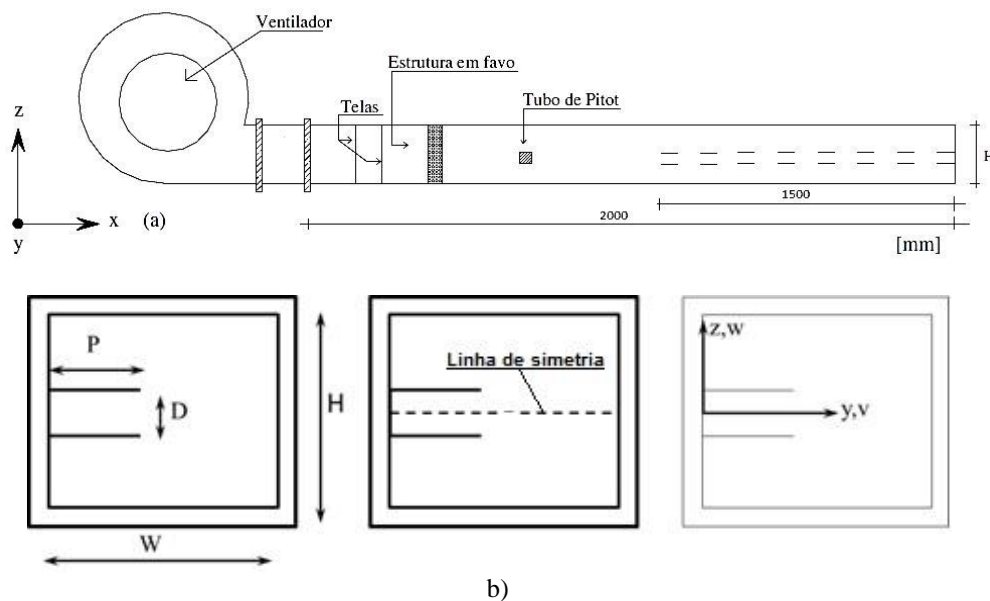


Figura 3. Visão esquemática da seção de testes: (a) Configuração do túnel de vento e (b) visão frontal da seção de testes e localização da linha de medições

Tabela 1 - Os diferentes parâmetros geométricos estudados. Dimensões em [mm].

Seção de Teste	P	D	L	Relação P/D	Relação L/P	Relação L/D	Número de Reynolds
S1	22	2	250	11	11,3	125	$7,98 \times 10^4$
S2	22	2	500	11	22,7	250	$7,98 \times 10^4$
S3	22	2	1000	11	45,4	500	$7,98 \times 10^4$
S4	22	2	1500	11	68,1	750	$7,98 \times 10^4$
S5	20	4	250	5	12,5	62,5	$7,98 \times 10^4$
S6	20	4	500	5	25	125	$7,98 \times 10^4$
S7	20	4	1000	5	50	250	$7,98 \times 10^4$
S8	20	4	1500	5	75	375	$7,98 \times 10^4$
S9	20	6	250	3,33	12,5	62,5	$7,98 \times 10^4$
S10	20	6	500	3,33	25	125	$7,98 \times 10^4$
S11	20	6	1000	3,33	50	250	$7,98 \times 10^4$
S12	20	6	1500	3,33	75	375	$7,98 \times 10^4$

As medições de velocidade e as flutuações de velocidade foram realizados por uma sonda de fio quente DANTEC Mini-CTA 54T30 em $y/P = 0,80$. As medições foram realizadas 20 mm a montante da saída do sub-canal. A aquisição de dados foi realizada utilizando uma placa de aquisição de 12 bits da National Instruments 6023E, com uma frequência de aquisição de 3 KHz e um filtro passa-baixa de 1 KHz. As séries temporais foram de 43,69 s. Para as secções de teste $P/D = 5$, (S5, S6, S7 e S8), as séries foram de 21,85 segundos. Apesar desta mudança as frequências do filtro passa baixa e da amostragem foram mantidas constantes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Transformada Contínua de Ondaletas (TCO)

A técnica utilizada para a avaliação dos sinais, foi a transformada contínua de ondaletas, (TCO), onde os resultados estão apresentados nas Figuras 4, 5 e 6. A TCO foi calculada utilizando as funções de Morlet, sendo avaliada em frequências de 5 Hz até 80 Hz e uma largura de banda de 2,93 Hz. Os gráficos são plotados juntamente com a PSD, compreendendo também as mesmas frequências. Os gráficos PSD (no lado direito de cada figura) são apresentados em escalas de semi-log, sendo no eixo x, a energia distribuída em largura de banda de frequência e do eixo y da própria frequência, dadas em Hz.

A partir da TCO foi possível ter alguma ideia de como a energia é distribuída ao longo do tempo e frequência. Na forma geral frequências mais elevadas do que aquelas marcadas nos espectros da PSD são relacionadas ao escoamento turbulento, independentemente das dimensões do canal, P, D ou L. Para os picos mais estreitos, como mostrado na Fig. 4 (a), seção de teste S6, a largura de banda da energia compreende as frequências de 20 até 40 Hz. A TCO foi aplicada para testar seções S4, S7, S8, S11 e S12 mostram que a energia contida em diferentes escalas parece passear frequências diferentes com o passar do tempo, o que indica que a amplitude do pico no PSD espectro é provavelmente causado pela instabilidade do fenômeno. Este fato implica que o PSD pode não ser a mais segura ferramenta de análise espectral para avaliar as frequências de grandes vórtices encontrados em canais compostos.

Eventos transientes podem ser observados através de janelas formadas na TCO, nas Figuras 5 (b) e 6 (b), as seções de teste S8 e S12, respectivamente. Vale ressaltar as mudanças ocorridas nos coeficientes de ondaletas ao longo do tempo. No primeiro caso (S8), algumas perturbações se manifestam nos coeficientes nos tempos de 8 e 18 segundos evidenciando indícios de intermitência no sinal. No segundo caso, a seção de teste S12, menores coeficientes de energia podem ser observados próximos a 5s, quando o fenômeno de intermitência parece ocorrer. Após este tempo, os maiores coeficientes são vistos entre 30 e 40 Hz ao longo do tempo.

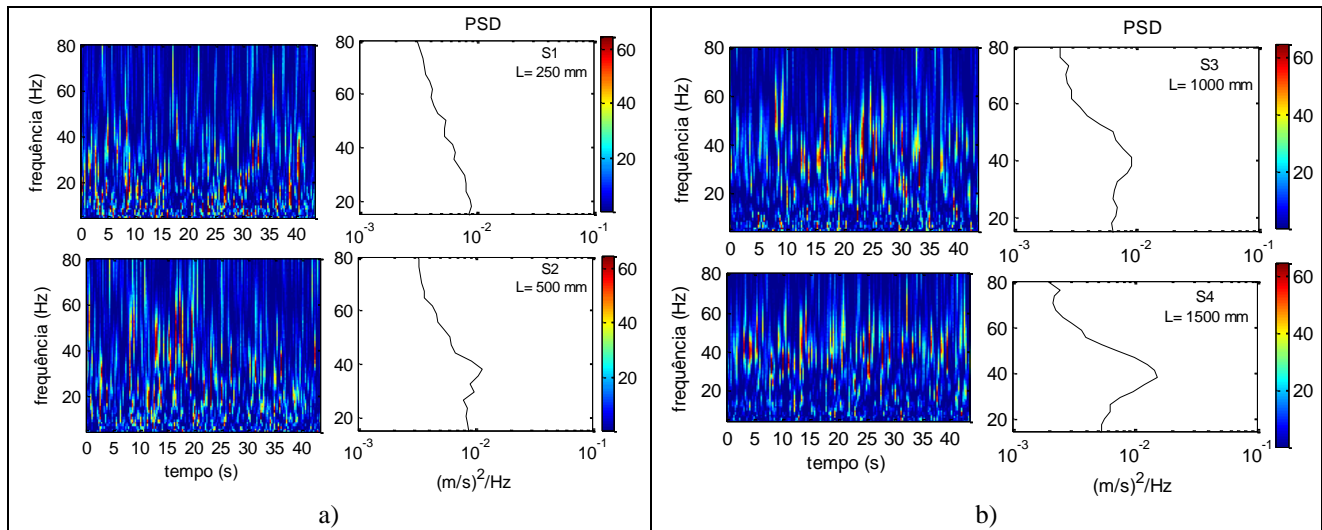


Figura 4. Transformada Contínua de Ondasletas: a) Seções de testes S1 e S2. b) Seções de Testes S3 e S4.

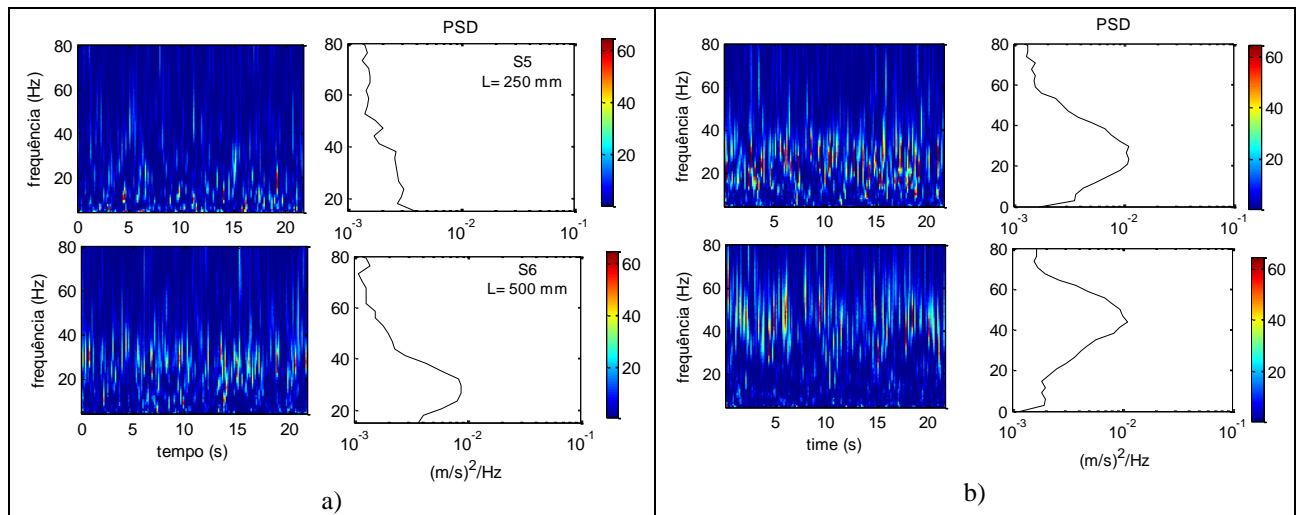


Figure 5 – Transformada Contínua de Ondasletas: a) Seções de testes S5 e S6. b) Seções de Testes S7 e S8.

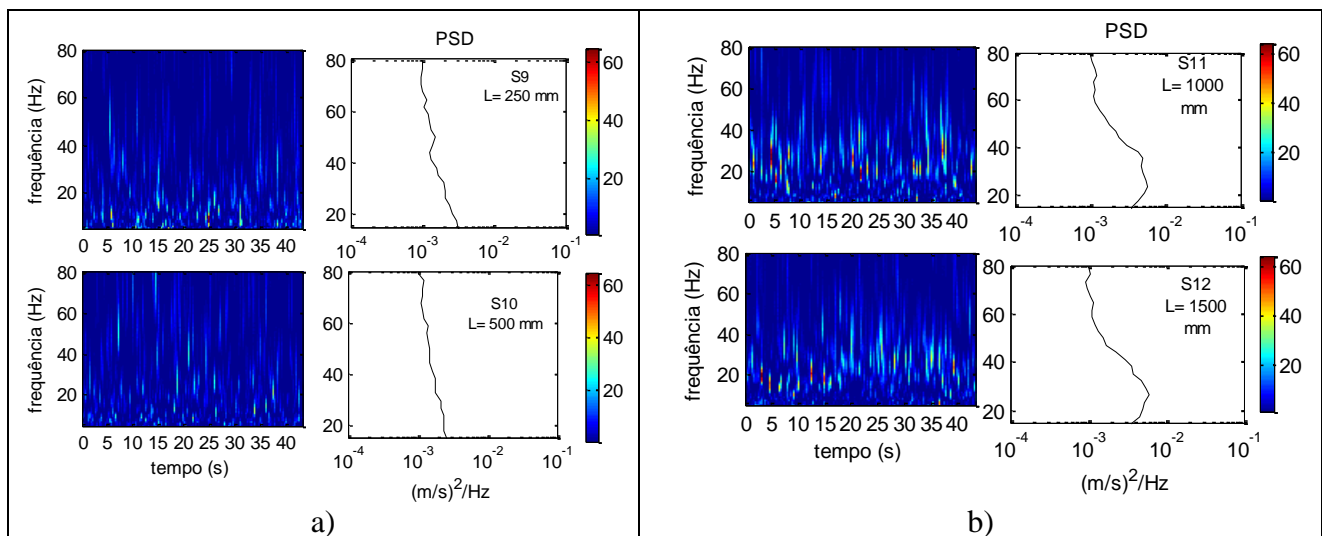


Figure 6 – Transformada Contínua de Ondasletas: a) Seções de testes S9 e S10. b) Seções de Testes S11 e S12.

4.2. Número de Strouhal

O número de Strouhal pode ser importante ao analisar problemas de escoamento instável, turbulento. Onde o número de Strouhal representa uma medida da relação entre as forças de inércia, devido à instabilidade do escoamento e a aceleração local, devido às mudanças de velocidade de um ponto a outro no campo do escoamento. A eq. (9) foi proposta por Meyer e Rehme em 1995. Os autores realizaram medições de flutuações de velocidade neste mesmo tipo de canal, sendo proposto a construção de um número de Strouhal, utilizando a raiz quadrada do produto das dimensões “P” e “D”, a velocidade da borda, U_e , e uma frequência característica, eq. (9). Os resultados mostraram para este tipo de canal uma frequência adimensional em forma do número de Strouhal, situada em 0,08, com um desvio padrão de 0,01. Os resultados para essa análise de maneira geral, as seções de L menores, (S1, S5, S9 e S10), não foram encontrados indícios de estruturas coerentes, o número de Strouhal variou para cada seção de teste entre 0,03 e 0,07.

Pode-se notar que principalmente na seção S12 o número de Strouhal proposto pelos autores prediz relativamente bem à frequência esperada, para o presente trabalho, $Str = 0,07$, com uma variação média de 2%.

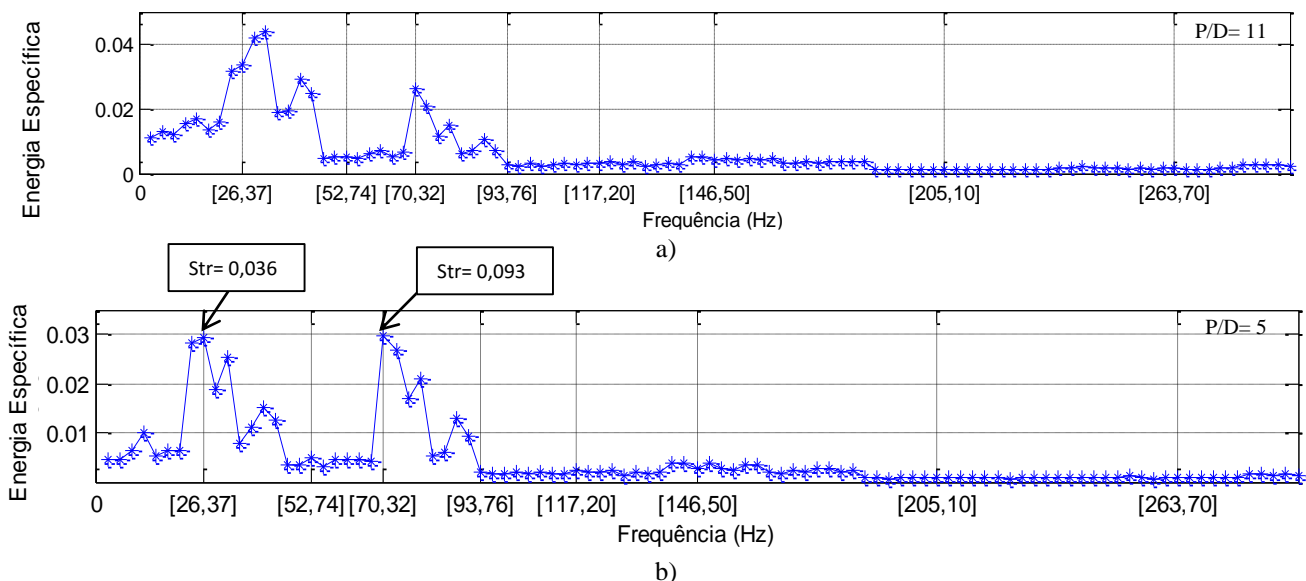
$$Str = \frac{f\sqrt{PD}}{U_e} \quad (9)$$

Para uma melhor avaliação do comportamento das frequências no escoamento, foi aplicada a transformada discreta de pacotes de ondaletas, (TDPO), nos sinais estudados. O método de pacotes de ondaletas é uma generalização da decomposição de ondaletas que oferece uma análise de sinais mais rica. A transformação neste trabalho foi feita para $J=9$ (escala 9), resultando em 29 conjuntos de coeficientes, para intervalos de frequência sucessivos de largura igual a 2,93 Hz. A análise da distribuição da amplitude de flutuação da velocidade foi realizada para os intervalos de frequência 2,93 até 108,41 Hz distribuídos em certo intervalo de tempo.

A Figura 7 apresenta os gráficos da energia quadrática média dos detalhes dos sinais estudados, dada pela eq. 10. Onde o eixo das abscissas representa as bandas de frequência onde houve o aparecimento de energia e no eixo das ordenadas é a porcentagem de energia específica que pertence ao sinal.

$$E_s = \left| \tilde{X}_{(j,m,k)} \right|^2 \quad (10)$$

Os espectros descrevem a distribuição da energia cinética das flutuações por banda de frequência. Com relação à turbulência pode se desenvolver uma análise similar e identificar, dentro do campo turbulento, vórtices de diferentes tamanhos contribuindo para a energia turbulenta total (Stull, 1988). O número de Strouhal pode ser calculado em cada banda onde apareceram picos de energia, mostrando a variação do Strouhal conforme a decomposição do sinal. Onde pode se notar que nas seções de maior comprimento, os valores de Strouhal obtidos nesta avaliação chegaram a um valor aproximado ao valor encontrado por Meyer e Rehme, 1995. Para a seção S4 foi de 0,093, com uma frequência característica de 70,32 Hz, fig. 7 (b). Pode se notar que a partir de 100 Hz não aparece vestígios de energia no sinal para todos os sinais.



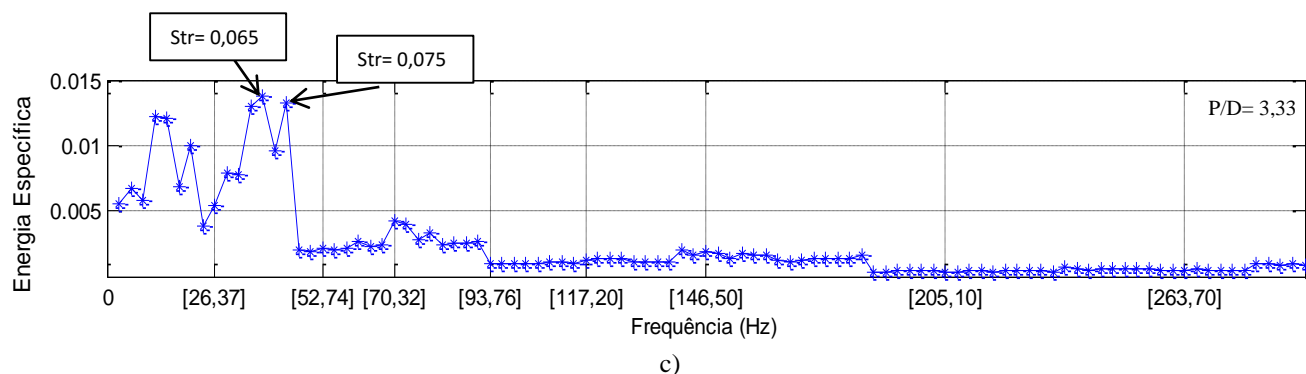


Figura 6 - Energia quadrática média para as seções estudadas. a) Seção S4, P/D = 11, b) Seção S8, P/D = 5, c) Seção S12, P/D = 3,33.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o estudo experimental das características dinâmicas do escoamento em canais compostos fechados contendo uma única fenda. O objetivo principal foi avaliar a influência do comprimento do canal (L) e os parâmetros geométricos (D) da fenda. Foram empregadas as ferramentas de análise PSD e ferramentas de tempo-frequência para à análise dos sianis de velocidade.

Os resultados obtidos permitiram observar quanto o comprimento do canal (L) e a largura da fenda (D) desempenham grande influência sobre a dinâmica da turbulência nos canais com fenda estreita. A largura da fenda desempenha um papel importante no aparecimento de grandes vórtices.

A transformada contínua de ondaletas mostrou o comportamento das energias, como são distribuídas nas escalas de decomposição nos domínios tempo-frequência. Os resultados mostraram que amplitude do pico nos espectros é causada pelas instabilidades da frequência principal, cujo valor parece “andar” no tempo.

O método de análise via transformada de pacotes de ondaletas para este trabalho apresentou ser uma técnica interessante para o estudo onde pode-se localizar em que banda de frequência estão presentes as estruturas de grande escala no sinal estudado. Onde a maior parte dos eventos turbulentos se apresentaram na banda de frequência de 23,44 a 46,88 Hz. Outro fato observado no estudo foi que através da decomposição feita pela Transformada de Ondaletas, encontrou-se mais de um número de Strouhal para o processo, diferentemente do que acontece através da análise de Fourier, onde estabelece um Strouhal médio.

6. REFERENCIAS

- Abry, P. Ondelettes et Turbulence, Multirésolutions, Algorithms de Décomposition, Invariance D'échelles, Paris, Diderot Editeur, 1997.
- Bueno, R.F. The application of the Fourier and wavelet transform to altitude differences of temporal series, set out by GPS, acopled a shaker at USP bases. Bol. Ciênc. Geod.,sec. Curitiba, v. 14, n° 4, p.557-570, out-dez, 2008.
- Choueiri G. H. e Tavoularis S. Experimental Investigation of Flow Development and Gap Vortex Street in an Eccentric Annular Channel. Part 1. Overview of the Flow Structure, J. Fluid Mech, 2014.
- De Paula, A. V.; Möller, S. V. Finite mixture model applied in the analysis of a turbulent bistable flow on two parallel circular cylinders. Nuclear Engineering and Design, v. 264, p. 203-213, 2013.
- Goulart, J. N. V. ; Noletto, L. G. ; Moller, S . Experimental Study of Mixing Layer in a Closed Compound Channel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (press), v. 36, p. 411-420, 2013.
- Guellouz, M.S. and Tavoularis, S., The structure of the turbulent flow in a rectangular channel contening a single rod – Part 1: Reynolds-Average measurements, Exp. Thermal and Fluid Sci., 23, 59-73, 2000.
- Indrusiak, M.L.S., Goulart, J.V., Olinto, C.R., Möller, S.V., 2005. Wavelet time–frequency analysis of accelerating and decelerating flows in a tube bank. Nucl. Eng. Des. 235, 1875–1887.
- Meyer, L. and Rehme, K., Large-scale Turbulence Phenomena in Compound Rectangular Channels, Exp. Thermal Fluid Sci., 8, 286-304, 1994.
- Meyer, L. and Rehme, K., Periodic Vortices in Flow Though Channels With Longitudinal Slots or Fins, 10th Symposium on turbulent shear flows, The Pennsylvania State University, University Park, August 14-16, 1995.
- Möller, S. V. On Phenomena of Turbulent Flow Through Rod Bundles, Experimental Therma and Fluid Science, 1991.
- Piot, E. & Tavoularis, S. Gap instability in laminar flows in eccentric annular channels. Nucl. Eng. Des. 241 (11), 4615–4620, 2011.
- Rehme, K., The Structure of Turbulence in Rod Bundles and the Implications on Natural Mixing Between Subchannels, Int. J. Heat Transfer, 35, pp 567-581, 1992.
- Rowe, D.S. 1974, Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Flow Channels, 1736.

Souza S. I. S., Martins H. A., Goulart J. N. V. , Numerical Investigation Of Heat Transfer In A Turbulent Flow In Channels With Gap, ISSN: 1676-1790, 2014.

Stull, R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. [S.l.: s.n.], 1988.

Wu, X., Trupp, A.C., Experimental Study on the Unusual Turbulence Intensity Distributions in Rod-to-Wall Gap Regions, Exp. Thermal and Fluid Sci., 6(4), pp. 360-370, 1993.

5. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.