

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO
EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE
ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA**

TIAGO DE MELO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jhon Nero Vaz Goulart

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA**

PUBLICAÇÃO: FGA.020A-/2015

BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2015

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

TIAGO DE MELO

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO
EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE
ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

Orientador: Prof. Dr. Jhon Nero Vaz Goulart

BRASÍLIA

2015.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE GAMA / FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE
MATERIAIS DA ENGENHARIA.**

**CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO
EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE
ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA**

TIAGO DE MELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA DA FACULDADE GAMA E FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INTEGRIDADE DE MATERIAIS DA ENGENHARIA.

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Jhon Nero Vaz Goulart
(Orientador)**

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA, ABRIL DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

TIAGO DE MELO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA, [Distrito Federal] 2015.

124 p. 210 x 297 mm (FGA/FT/UnB, Mestre, Integridade de Materiais da Engenharia, 2015).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Programa de Pós-Graduação em Integridade de Materiais da Engenharia.

1. CANAIS COMPOSTOS

2. PSD

3. TRANSFORMADA DE ONDALETAS 4. NÚMERO DE STROUHAL

I. FGA/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, T. (2015). CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA. Dissertação de Mestrado em Integridade de Materiais da Integridade da Engenharia, Publicação Nº.020A/2015, Faculdade UnB Gama/FT/Universidade de Brasília, DF, 124 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: TIAGO DE MELO.

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM CANAIS COMPOSTOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

NOME: TIAGO DE MELO

E-mail: tiago.melomec@gmail.com

Brasília, DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Escrever uma dissertação de Mestrado é uma experiência enriquecedora e de plena superação. Nos modificamos a cada tentativa de buscar respostas às nossas aflições de 'pesquisador'. Para aqueles que compartilham conosco desse momento, parece uma tarefa interminável e enigmática que só se torna realizável graças a muitas pessoas que participam, direta ou indiretamente, mesmo sem saber realmente o que e para que nos envolvemos em pesquisa. E é a essas pessoas que gostaria de agradecer:

Meu maior agradecimento é dirigido a minha família, principalmente aos meus pais, por terem me apoiado nessa etapa da minha vida. Obrigado por depositarem em mim a confiança para todas as horas. Minha família soube compreender, essa fase pela qual eu estava passando. Durante a realização deste trabalho, sempre tentaram entender minhas dificuldades e minhas ausências. Agradeço-lhes por tudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jhon Nero Vaz Goulart e sua esposa Prof. Dr^a Carla Tatiana Anflor, pela confiança e infinita disponibilidade, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e por serem os maiores incentivadores na superação de meus limites.

Ao todos integrantes e ex-integrantes do Grupo de Mecânica Experimental e Computacional (GMEC), por toda a ajuda e atenção dada na confecção deste trabalho. Em especial a Jhony, Carol, Miélla, Angélica, Adrian, Maria Luiza, Tati e Niécio, por terem acompanhado a minha caminhada.

Aos meus queridos amigos de Cuiabá/MT pela amizade e palavras de incentivo e aos poucos, mas bons amigos que tenho em Brasília, que fazem parte da minha vida nessa nova cidade.

À Banca Examinadora pela disponibilidade, atenção e colaboração para a conclusão deste trabalho.

Agradeço finalmente a todos os que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho, principalmente, ao povo brasileiro, que indiretamente custeia trabalhos acadêmicos na expectativa de que os seus resultados e/ou a capacitação dos envolvidos possam proporcionar a melhoria da qualidade de vida no nosso país.

RESUMO

Canais compostos são caracterizados pela presença de uma região mais larga por onde o escoamento escoar com certa facilidade e regiões mais estreitas onde os efeitos viscosos predominam. Sendo que o uso destas estruturas é abrangente na indústria, principalmente em trocadores de calor, interior de reatores nucleares e em canais de irrigação. A precisão das relações que determinam a transferência de calor em trocadores de calor ou reatores nucleares passa por uma análise dinâmica destes equipamentos, visto que suas características geométricas podem ser responsáveis pela formação de estruturas coerentes dentro do escoamento principal. As estruturas coerentes têm essencial influência nos processos de mistura, (transferência de calor, dispersão de poluentes entre outros processos difusivos), arrasto, emissão de ruídos e no campo da interação fluido-estrutura. O propósito deste trabalho é investigar o aparecimento de estruturas de grande escala em canais compostos, utilizando ferramentas de análise do domínio tempo e frequência. Para o canal estudado as principais características geométricas são: seu comprimento, L , a profundidade, P e a largura, D . Durante os experimentos foram analisados 12 tipos de seções diferentes. Utilizando como técnica experimental a anemometria de fio quente. Sendo que para todas as medições o número de Reynolds manteve-se constante no valor de $7,98 \times 10^4$. As caracterizações dinâmicas das flutuações de velocidade, bem como as investigações das estruturas coerentes presentes no escoamento, foram feitas a partir do emprego da PSD (Power Spectro Density), e a análise da Transformada de Ondaletas. As análises revelaram que nas seções de maior comprimento, estudadas por ambos os métodos, houve o aparecimento de estruturas de grande escala. Os resultados também mostraram que as relações adimensionais P/D e L/D têm grande influência no aparecimento dessas estruturas. A transformada de ondaletas é uma ferramenta aliada na análise dos dados transientes do escoamento, sendo que através dessa ferramenta foi possível avaliar os processos intermitentes das séries temporais de velocidade.

Palavras Chave: Canais Compostos; PSD; Transformada de Ondaletas; Número de Strouhal.

ABSTRACT

Channels compounds are characterized by the presence of a wide regions through which fluid flows relatively easily and narrower regions where viscous effects are dominant. Since the use of these structures considered comprehensive in the industry, especially in heat exchangers, reactors inside and even in irrigation canals and water supply. The accuracy of the relationships which determine the heat transfer in heat exchangers or reactors undergoes a dynamic analysis of these devices, since their geometric features may be responsible for the formation of coherent structures in the main flow. The coherent structures have essential influence on the mixing, (heat exchange, dispersion of pollutants and other diffusive processes), drag, noise emissions and in the field of fluid-structure interaction. The purpose of this study is to investigate the appearance of large-scale structures in compound channels using the time and frequency domain analysis tools. For the studied channel the main geometrical characteristics are: length, L , depth, and the width P , D . During the experiments 12 types of different sections were analyzed, using the experimental procedure as hot wire anemometer. Since the measurements for all the Reynolds number was kept constant in value 7.98×10^4 . The dynamic characterizations of speed fluctuations, as well as investigations of coherent structures in flow, were made from the PSD of employment (Spectro Power Density), and the analysis of Wavelet Transform. The analysis showed that the longer length sections studied by both methods leads to the the emergence of large-scale structures. The results also showed that the dimensionless relations P/D and L/D have great influence on the appearance of these structures. The wavelet transform is an ally tool in the analysis of transient flow data, and through this tool it was possible to evaluate the possible intermittent processes in series speed.

Keywords: Compound Channels; PSD; Wavelet Transform; Strouhal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação esquemática de um vórtice de eixo vertical na interface. (Adaptada de Prooijen et al., 2005). LP – Leito principal. LC – Leito de cheia.....	18
Figura 1.2 – Elemento combustível de um reator de água pressurizada (PWR).....	19
Figura 3.1 - Velocidade instantânea do vento (u) no tempo. Velocidade média (\bar{u}) e a flutuação da velocidade em relação à média (u'). (Adaptado de Stull, 1998).	23
Figura 3.2 – escoamento turbulento em um canal hidráulico, fotografado com a variação da velocidade da câmera em 1929, por Nikuradse (Schlichting, 1968). Velocidades da câmera: (a) 12,15 cm/s, (b) 20 cm/s, (c) 25 cm/s e (d) 27,6 cm/s....	24
Figura 3.3 – Exemplos de Canais Compostos, Adaptado de Goulart et al.,(2013). .	25
Figura 3.4 - Canais compostos onde foram observadas pulsações (Meyer e Rehme, 1994).	27
Figura 3.5 - Geometria do canal estudado numericamente por Biemüller et al. (1996).	28
Figura 3.6 - canal composto mostrando vórtices em transição e distribuição da velocidade média na região do escoamento ao longo da coordenada transversal. Stocchino e Brocchini,(2009).....	28
Figura 3.7 -(a) início do aparecimento de estruturas de grande escala no escoamento. (b) A visualização do escoamento de vórtices em movimento na ranhura longitudinal - Meyer e Rheme (1995).	29
Figura 3.8 - Estruturas Coerentes para diferentes números de Reynolds. Yan, 2012.	30
Figura 3.9 -(a) geometria do canal estudado. (b) Evidencia de estruturas correntes no escoamento.....	31
Figura 3.10 – Geometria da seção e testes investigada por Choueiri e Tavoularis, 2014.	31
Figura 3.11 – (a) Identificação das três regiões observadas no escoamento, pelos autores. (b) Mapa de velocidade axial do escoamento na fenda. Choueiri e Tavoularis, 2014.....	32
Figura 3.12 - (a) Perfil de velocidade axial média. (b) Gradiente da velocidade média. Goulart et al. 2013.....	33
Figura 4.1 – Sinal de velocidade (a) no domínio do tempo. (b) em frequência.	40

Figura 4.2 - Funções base da transformada de ondaletas obtidas através da dilatação, compressão e translação da ondaleta-mãe da família de Morlet – parte real. (Loss, 2004).	43
Figura 4.3 - Visualização da Ondaleta de Haar	44
Figura 4.4 - Visualização da Ondaleta de Chapéu Mexicano	45
Figura 4.5 - Visualização da Ondaleta de Morlet	46
Figura 4.6 - Visualização da família de ondaletas de Daubechies.	46
Figura 4.7 - Ondaleta de Chapéu Mexicano (abaixo) comparada com o sinal (acima) (adaptado de Protázio, 2002).	50
Figura 4.8 - Ondaleta de Chapéu Mexicano transladada efetuando comparação com outra parte do sinal (adaptado de Protázio, 2002).	50
Figura 4.9 - Ondaleta de Chapéu Mexicano transladada e dilatada efetuando comparação com o sinal (adaptado de Protázio, 2002).	51
Figura 4.10 - Processo finalizado com os coeficientes $\tilde{X}_{(a,b)}$ produzidos em diferentes escalas a para diferentes pontos b do sinal (adaptado de Protázio, 2002).	51
Figura 4.11 - Etapas da aplicação da TCO com bases de Morlet. (a) Etapa de decomposição com janelas com mesma largura para diferentes instantes t . (b) Etapa de decomposição com as janelas dilatadas para diferentes instantes t . (c) Espaço “tempo x escala” resultante da TCO. (d) Vista superior da TCO (adaptado de Loss, 2004).	52
Figura 4.12 – Árvores de ondaletas de nível $j=4$. Transformada discreta de ondaletas.....	54
Figura 4.13 – Árvore de Decomposição da transformada de pacotes de ondaletas em nível 3.....	55
Figura 4.14 - Primeiras oito funções de pacotes de ondaletas (a) Funções de Haar ou Db 1. (b) Funções de Db 2. (MatLab, 2012).	56
Figura 5.1 - 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.....	58
Figura 5.2 - Ilustrações esquemáticas: (a) canal aerodinâmico. (Adaptado De Paula, 2012).	59
Figura 5.4 - Detalhe da sonda de anemometria de fio quente, Barcellos, (2001).....	62
Figura 5.5 - Circuito de medição em anemometria de fio quente, Dantec, (1992). ...	63

Figura 6.1 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D=11$. a) Seção S1, L=250 mm, b) Seção S2, L=500 mm, c) Seção S3, L=1000 mm, d) Seção S4, L=1500 mm.	66
Figura 6.2 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D=5$. a) Seção S5, L=250 mm, b) Seção S6, L=500 mm, c) Seção S7, L=1000 mm, d) Seção S8, L=1500 mm.	67
Figura 6.3 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D=3.33$. a) Seção S9, L=250 mm, b) Seção S10, L=500 mm, c) Seção S11, L=1000 mm, d) Seção S12, L=1500 mm.	68
Figura 6.4 - Densidades auto espectrais das componentes axial de flutuação de velocidade para as seções de testes adimensionalizadas pelo número de Strouhal.	70
Figura 6.5 - Número de Strouhal x correlações de L.	72
Figura 6.6 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=11$. a) L=250 mm, b) L=500 mm, c) L=1000 mm, d), L=1500 mm.	74
Figura 6.7 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=5$. a) L=250 mm, b) L=500 mm, c) L=1000 mm, d), L=1500 mm.	75
Figura 6.8 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=3.33$. a) L=250 mm, b) L=500 mm, c) L=1000 mm, d) L=1500 mm.	75
Figura 6.9 - Exemplo de sinal intermitente de flutuações de velocidade. (Libby, 1975)	76
Figura 6.10 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D=11$. (a) L= 1000 mm, (b) L= 1500 mm.	79
Figura 6.11 – Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D=11$. (a) L= 250 mm. (b) L= 500 mm. (c) L= 1000 mm. (d) L= 1500 mm.	81
Figura 6.12 - Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D=5$. (a) L= 250 mm. (b) L= 500 mm. (c) L= 1000 mm. (d) L= 1500 mm.	82
Figura 6.13 - Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D=3,33$. (a) L= 250 mm. (b) L= 500 mm. (c) L= 1000 mm. (d) L= 1500 mm.	82
Figura 6.14 - seções com L= 1000 (a) Fator de Intermitência. (b) Energia de Intermitência.	83

Figura 6.15 - seções com $L = 1500$ (a) Fator de Intermitência. (b) Energia de Intermitência.....	83
Figura 6.16 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 11$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.....	84
Figura 6.17 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 5$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.....	84
Figura 6.18 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 3,33$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.....	85
Figura 6.19 - Distribuição da energia dos diferentes níveis de decomposição. (a) $L = 250$ mm. (b) $L = 500$ mm. (c) $L = 1000$ mm. (d) $L = 1500$ mm.	86
Figura 6.20 - Análise do sinal da seção de teste S8, por meio da transformada de pacotes de ondaletas para a relação de $P/D = 5$	88
Figura 6.21 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D = 11$. a) Seção S1, $L = 250$ mm, b) Seção S2, $L = 500$ mm, c) Seção S3, $L = 1000$ mm, d) Seção S4, $L = 1500$ mm.....	90
Figura 6.22 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D = 5$. a) Seção S5, $L = 250$ mm, b) Seção S6, $L = 500$ mm, c) Seção S7, $L = 1000$ mm, d) Seção S8, $L = 1500$ mm.....	91
Figura 6.23 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D = 3,33$. a) Seção S9, $L = 250$ mm, b) Seção S10, $L = 500$ mm, c) Seção S11, $L = 1000$ mm, d) Seção S12, $L = 1500$ mm.....	92
A 1- Relação típica entre velocidade medida e tensão corrigida resultante do processo de calibração da sonda de fio quente.	102
B 1 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D = 11$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm.....	107
B 2 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D = 5$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.	110

B 3 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D=3,33$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm....	113
B 4 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D=11$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.	117
B 5 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D=5$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm.	120
B 6 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D=3,33$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Escala da ondaleta
b	Posição da ondaleta
B	Largura da seção de testes do canal aerodinâmico, m
C_j	Aproximação no nível j
B_w	Largura de Banda, Hz
B_x, B_α	Coefficientes de calibração
c_j	Série de coeficientes de aproximação no nível j
$c_{j,k}$	Coefficiente de aproximação
d_j	Série de coeficientes de detalhes no nível j
D	Largura da fenda, m
D_h	Diâmetro Hidráulico
δ	erro
e	Base dos logaritmos naturais
E, E_o	Tensões, V
ε	energia
ϕ	Função de escala
Φ	Função característica
f	Frequência de desprendimento dos vórtices, Hz
f_s	Frequência de aquisição ou amostragem, Hz
F_c	Pseudo frequência da ondaleta, Hz
g	Função Janela
H	Altura da seção de testes do canal aerodinâmico, m
J,j,K,m,n,N	Índices inteiros
L	Comprimento da seção de testes, m
$L^2(\mathbb{R})$	Espaço das funções de energia finita
μ	média ou primeiro momento
M	Momentos da função $x(t)$
N	Número de pontos da série temporal
v	Viscosidade cinemática, m^2/s
p	Densidade de probabilidade, $[x(t)]^{-1}$
P	Profundidade da fenda, m

P_{xx}	Espectro de potência, $[x(t)]^{-1}/\text{Hz}$
P_{atm}	Pressão atmosférica, kPa
R	Conjunto de números reais
Re	Número de Reynolds, $[\bar{U}D_h/\nu]$
Str	Número de Strouhal, $[f\sqrt{PD}/U_e]$
t	Tempo, s
T	Temperatura do experimento, °C
tsh	Threshold
U_e	Velocidade da borda, m/s
\bar{U}	Velocidade média, m/s
U	Velocidade de referência, m/s
Ψ	Função ondaleta
Z	Conjunto de números inteiros
\wedge	denota coeficientes da transformada de Fourier
\sim	denota coeficientes de ondaletas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos do Trabalho	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	Organização do Texto	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Introdução a Turbulência	22
2.2	Características do escoamento Turbulento em Canais Compostos	25
2.3	Estudo do escoamento turbulento através da Transformada de Ondaletas	33
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	36
3.1	Equações de Balanço	36
3.2	Conservação da Massa	36
3.3	Conservação da Quantidade de Movimento	37
3.4	Ferramentas Matemáticas	38
3.5	Classificação de sinais	39
3.6	Transformada de Fourier	39
3.7	Transformada de Ondaleta	41
3.8	Funções de Ondaleta	44
3.8.1	Exemplos de ondaletas unidimensionais	44
3.8.2	Recomendações para a Escolha da Ondaleta	47
3.9	Transformada Contínua de Ondaletas (TCO)	49
3.9.1	Escalograma: representação da Transformada Contínua de Ondaleta	49
3.10	Transformada Discreta de Ondaletas (TDO)	52
3.11	Transformada Discreta de Pacotes de Ondaletas	54
4	SEÇÃO DE TESTES E INSTRUMENTAÇÃO	58
4.1	Técnica Experimental	58
4.2	Metodologia de Ensaio	61
4.3	Anemometria de Fio-Quente	62
4.4	Aquisição e Análise de Dados	63
5	RESULTADOS	65
5.1	Análises via Densidade Espectral de Potência (PSD)	65

5.2	Número de Strouhal	69
5.3	Análise via Transformada Contínua de Ondaletas	72
5.4	Fator e Energia de Intermitência do Sinal Turbulento	76
5.5	Transformada discreta de Pacotes de Ondaletas	86
5.6	Energia Quadrática Média dos Sinais	89
6	CONCLUSÕES.....	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICE A - Análise de Incertezas.....	101
	APÊNDICE B – Espectros de Ondaletas.....	106

1 INTRODUÇÃO

Os escoamentos totalmente desenvolvidos em canais não circulares apresentam padrões não encontrados no escoamento em tubos circular. Estes fenômenos distintos ocorrem no escoamento em canais compostos com seções transversais contendo regiões de escoamento relativamente espaçosa adjacente ao escoamento nas regiões mais estreitas, Guellouz e Tavoularis, 2000. Canais compostos são caracterizados pela presença de um canal principal e um ou mais canais secundários, conectados por fendas, pelas quais acontece o escoamento axial do fluido.

Os rios são exemplos de canais compostos, pois apresentam, normalmente, uma seção transversal composta por um leito principal (LP), com um ou dois leitos de cheia (LC) adjacentes. Em situações de cheia, o leito principal não é suficiente para escoar toda a vazão do afluente e a subida do nível da água provoca a inundação dos leitos de cheia ou planícies de inundação.

A principal característica do escoamento em canais compostos é a presença de estruturas de grande escala com comportamento quase-periódico, sendo transportadas pelo escoamento principal. Tais estruturas são responsáveis pelo aumento das tensões turbulentas na região da fenda. Sendo este fato sempre presente em toda literatura aberta sobre escoamentos turbulentos em canais compostos, tais como canais retangulares, conectados por um ou vários subcanais, escoamento em feixes de tubos (presente no interior de reatores nucleares e trocadores de calor), e até mesmo em alguns canais de abastecimento de água, Soldini et. al., 2004.

A Figura 1.1 mostra que nos escoamentos em canais compostos desenvolvem-se mecanismos de transferência de quantidade de movimento, traduzidos pelos vórtices de eixo vertical, formados ao longo da interface de ligação entre o canal principal e as várzeas, dada as diferenças de velocidades entre eles.

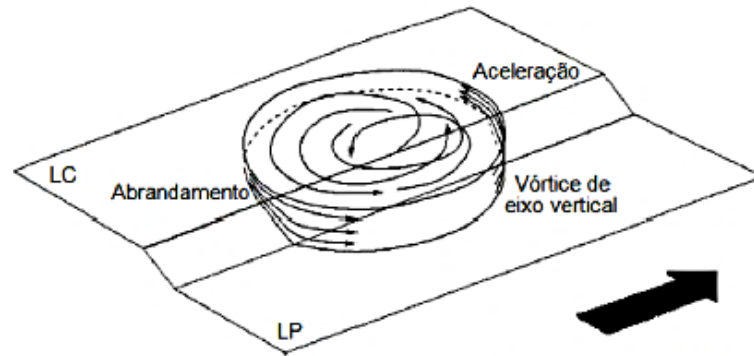


Figura 1.1 – Representação esquemática de um vórtice de eixo vertical na interface. (Adaptada de Prooijen et al., 2005). LP – Leito principal. LC – Leito de cheia.

A utilização de canais compostos está bastante presente nas mais diversas áreas da engenharia. Principalmente em equipamentos nos quais o maior desafio é a maximização das taxas de transferência de calor. Nesse contexto se faz necessário o conhecimento da interdependência existente entre os parâmetros geométricos, o número de Reynolds e a capacidade difusiva do escoamento turbulento nessas seções.

Rowe, 1973, foi o primeiro a estudar a influência da estrutura macroscópica do escoamento turbulento no processo de mistura em um canal composto, formado por uma matriz de barras dispostas paralelamente ao escoamento principal. Sua principal conclusão foi que as altas taxas de mistura encontradas neste tipo de canal eram originárias de processos macroscópicos do escoamento, caracterizadas pela periodicidade nos sinais de flutuação de velocidade.

Assim como a incomum distribuição das tensões de Reynolds, (Hooper, 1980), a presença de estruturas de grande escala, chamadas de pulsações do escoamento, se confirmaram como agentes decisivos no aumento dos coeficientes de mistura nesses tipos de canais, sendo relatadas, posteriormente, em uma série de trabalhos de diferentes pesquisadores.

As primeiras evidências reais de estruturas de grande escala se originaram a partir dos estudos de Hooper e Rehme, 1984, que observaram um comportamento oscilatório para a velocidade do escoamento na fenda estreita, em experimentos com dois subcanais.

Krauss e Meyer, 1998, investigaram diversas geometrias ao longo destes anos, como por exemplo, um arranjo triangular de tubos cilíndricos com relação de

P/D de 1,06. Guellouz e Tavoularis, 2000, realizaram estudos em um canal retangular contendo um único tubo cilíndrico. Meyer e Rehme, 1994, realizaram diversos testes em uma série de diferentes layouts em canais retangulares.

Para um melhor entendimento do funcionamento dessas estruturas toma-se como exemplo o reator do tipo PWR (reatores de água pressurizada), o combustível usado por ele é o dióxido de urânio (UO_2) em tubos de liga de zircônio. O UO_2 é compactado em pastilhas de 10 mm de diâmetro que têm a forma de um cilindro, acomodadas no interior de tubos de 4,40 m de comprimento e 10,76 mm de diâmetro de zircaloy, hermeticamente fechadas e que suportam temperaturas até 1.852 °C. Cada barra possui aproximadamente 2 kg de urânio. São necessárias 235 dessas barras para formar o elemento combustível.

A Figura 1.2 mostra os feixes de barras no núcleo de reatores nucleares do tipo PWR, que é o mais comum de todos os tipos de reatores em uso no mundo, tanto para estações de energia comercial quanto para aplicações militares.

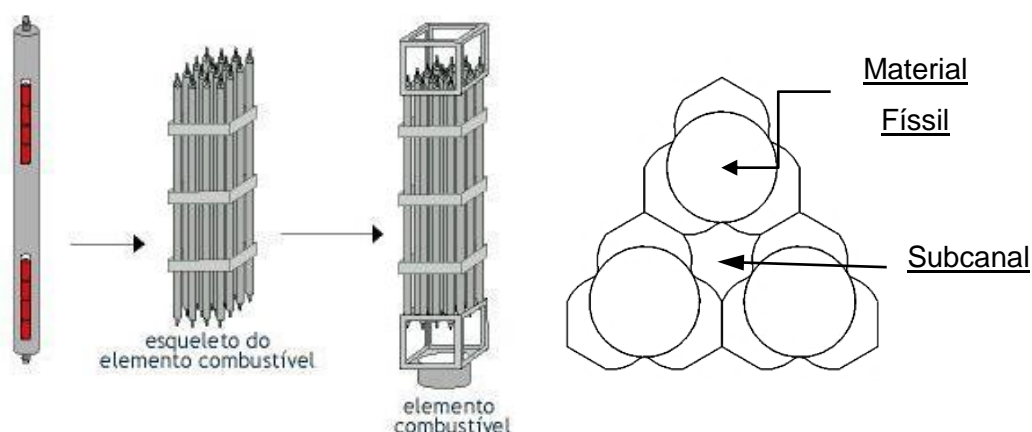


Figura 1.2 – Elemento combustível de um reator de água pressurizada (PWR).

Conforme Goulart, 2009, o processo de desenvolvimento das instabilidades em camadas cisalhantes pode ser entendido como o produto da amplificação de perturbações oriundas de uma faixa cisalhante entre duas correntes de diferentes velocidades que formam uma camada de mistura. Tal camada se estende desde um ponto no interior do subcanal secundário até o canal principal. Nessa faixa, picos de vorticidade têm origem, injetando perturbações no escoamento, podendo levar a manifestação de oscilações (ondas) que se desenvolverão e serão amplificadas na direção principal do escoamento.

O estudo acerca dos complexos fenômenos associados ao movimento dos fluidos desperta a atenção dos pesquisadores há muitas décadas. Dessa forma, a busca por ferramentas de análise se faz absolutamente necessária.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo investigar as características da turbulência em escoamentos, em diferentes canais compostos com uma única fenda estreita. Aplicando ferramentas de análise tempo-frequência, nos sinais de velocidade e flutuações do escoamento axial.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características dos espectros de Fourier, detectando as frequências dominantes associadas ao aparecimento de estruturas coerentes;
- Detectar, através da PSD e da Transformada de Ondaletas, singularidades presentes nos sinais e eventos da turbulência no escoamento;
- Aplicar a Transformada contínua, discreta e de pacotes de Ondaletas no estudo do escoamento turbulento nos canais compostos;
- Avaliar como o comprimento, L , do canal é importante na formação de estruturas de larga escala;
- Estudar o número de Strouhal para as diferentes configurações de canal.

1.2 Organização Do Texto

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. Seguindo esta introdução, são apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

No Capítulo 2 segue uma revisão bibliográfica que descreve, de forma sucinta, conceitos sobre a turbulência, o estudo da turbulência e o aparecimento de estruturas coerentes em canais compostos, abordando também trabalhos que tratam de aplicações da transformada de ondaletas à turbulência.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para análise dos dados, bem como a descrição do seu tratamento.

O capítulo 4 mostra a técnica experimental, assim como a descrição da seção de testes e a metodologia dos ensaios.

Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 5, enquanto que no capítulo 6, encontram se as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução a Turbulência

White, 2000, afirma que a turbulência não é um movimento irregular. O escoamento turbulento é um escoamento em equilíbrio. O escoamento, inicialmente laminar, se reestrutura na forma de flutuações (turbulência) macroscópicas de velocidade, pressão e temperatura em resposta a perturbações externas que as interações apenas em nível molecular (viscosidade) não eram capazes de acomodar.

A turbulência é um processo inerentemente tridimensional e dependente do tempo, que se desenvolve a partir da instabilidade do escoamento laminar. Estas instabilidades se desenvolvem a partir da relação entre as forças de inércia e das forças viscosas que estão presentes no escoamento de um fluido, em resposta as interações do fluido com o ambiente. Interações essas que podem se dar pela presença de fronteiras sólidas, pela presença de outros fluidos, ou ainda pela atuação de forças de campo, por exemplo.

Turbulência é uma propriedade de um escoamento que apresenta um campo de velocidades fortemente rotacional e aparentemente caótico, Panofsky e Dutton, 1984. Os movimentos turbulentos são caracterizados pela presença de flutuações “instantâneas” de velocidade nas três direções.

Para efetuar a análise destas flutuações são necessárias medições com instrumentos de resposta rápida e alta frequência, a fim de se obter a medida em escalas de tempo representativas, medidas essas que sejam capazes de mensurar as menores escalas da turbulência.

As flutuações aleatórias da velocidade e de outras propriedades do escoamento dificultam o entendimento do fenômeno físico e tornam complexa a descrição determinística do escoamento turbulento. Essa complexidade obriga o uso da simplificação das considerações físicas para tornar o tratamento matemático mais simples. De acordo com Stull, 1988, Reynolds propôs que essas variáveis fossem escritas como uma separação do escoamento em partes turbulentas e não turbulentas. Tomando como exemplo, velocidade instantânea, u sobre um período de tempo, a flutuação turbulenta, u' , pode ser obtida subtraindo-se da velocidade

instantânea a velocidade média, \bar{u} (definida a seguir), conforme a eq. 3.1 e a Figura 2.1.

$$u' = u - \bar{u} \quad (3.1)$$

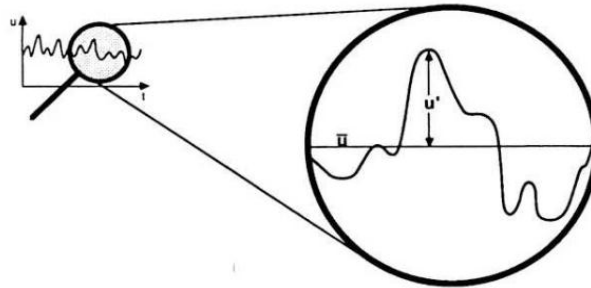


Figura 2.1 - Velocidade instantânea do vento (u) no tempo. Velocidade média (\bar{u}) e a flutuação da velocidade em relação à média (u'). (Adaptado de Stull, 1998).

Escoamentos turbulentos apresentam um amplo espectro de energia, possuindo uma larga banda de frequências, ou seja, apresentam estruturas com baixas (grandes comprimento de onda) e altas frequências (pequenos comprimentos de onda). As interações entre estruturas de tamanhos e frequências variadas constituem um refinado e complexo processo de troca de energia. Apesar de a turbulência ser classificada como imprevisível, é possível através de processos estatísticos determinar médias e flutuações a fim de caracterizar o fenômeno.

Segundo Ferziger, 2001, para escoamentos turbulentos identifica-se uma parte determinística compondo cerca de apenas 10% do escoamento na forma de estruturas coerentes. Onde estas são responsáveis por aproximadamente 90% do transporte de energia.

Ainda não há uma definição precisa do que sejam as estruturas coerentes, embora vários trabalhos tenham procurado determinar suas características mais gerais, muitas vezes relacionadas aos fenômenos de intrusão e ejeção no escoamento turbulento próximo a um contorno rígido, Bolzan, 2004. Uma definição dada por Hussain, 1983, e citada por Bolzan, 2004, trata das estruturas coerentes de grande escala como sendo uma região do escoamento turbulento que possui vorticidade coerente sobre uma significativa extensão espacial. Bolzan, 2004, cita ainda Robinson, 1991, que definiu as estruturas coerentes como uma região tridimensional, onde pelo menos uma das variáveis fundamentais do escoamento (componente da velocidade, massa específica, temperatura, etc.) apresenta uma

significativa correlação com ela mesma ou com outra variável num intervalo temporal que é significativamente maior do que as menores escalas locais do escoamento.

O efeito da geometria de diversos corpos pode ser considerado uma condição à formação deste tipo de estrutura. Parte da energia produzida no escoamento se dá pelas estruturas coerentes. Em 1929, Nikuradse fotografou o escoamento turbulento em um canal hidráulico, Schlichting, 1968. As diversas fotografias obtidas com velocidades diferentes da câmera, que acompanha o escoamento, mostram as estruturas formadas com a adição de pequena quantidade de pó na superfície livre, Figura 2.2. É observada a formação, ora de uma distribuição aleatória de partículas, ora de uma sucessão de vórtices (coerentes).

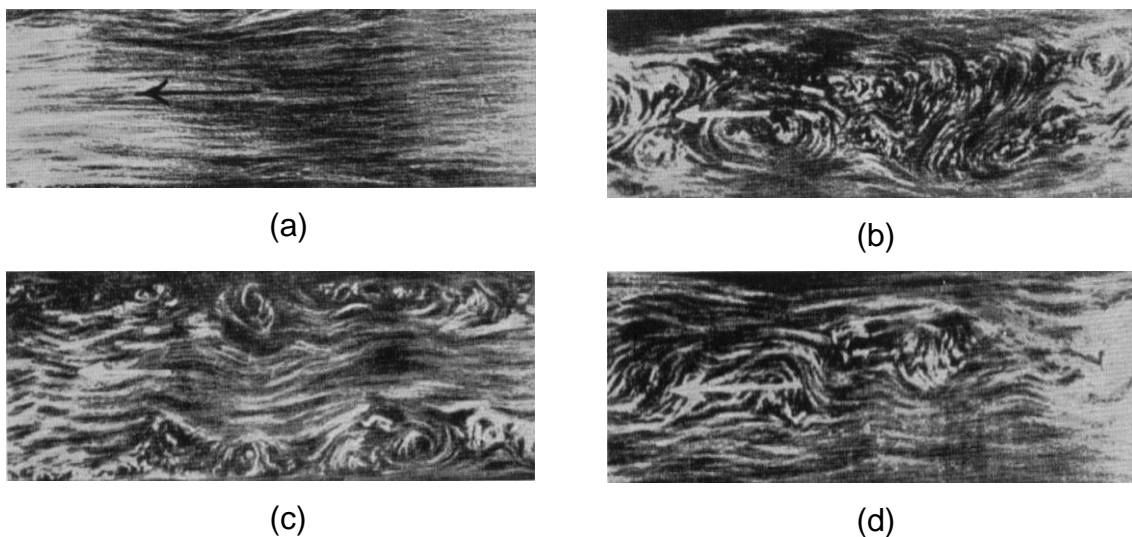


Figura 2.2 – Escoamento turbulento em um canal hidráulico, fotografado com a variação da velocidade da câmera em 1929, por Nikuradse (Schlichting, 1968). Velocidades da câmera: (a) 12,15 cm/s, (b) 20 cm/s, (c) 25 cm/s e (d) 27,6 cm/s.

Segundo Bonnet e Delville, 2001, a caracterização e identificação de tais estruturas no escoamento turbulento seguem a vários propósitos. Contudo, são os propósitos práticos relacionados com a presença dessas estruturas que chamam mais atenção. Estruturas coerentes têm essencial influência nos processos de mistura, (transferência de calor, dispersão de poluentes entre outros processos difusivos), arrasto, emissão de ruídos e no campo da interação fluido-estrutura. Nesse último, as características dinâmicas desses turbilhões devem ser bem conhecidas a fim de evitar vibrações induzida pelo escoamento principal, tal como escoamento em bancos de tubos, por exemplo.

2.2 Características do Escoamento Turbulento em Canais Compostos

Canais compostos podem ser descritos como aqueles cuja seção transversal é caracterizada pela presença de canais adjacentes conectados por fendas (subcanais), nas quais e em sua maioria, o fluido escoava axialmente. Exemplos destes tipos de canais são os canais de irrigação e abastecimento de água, os feixes de barras no núcleo dos reatores nucleares e os canais aletados para resfriamento de dispositivos eletrônicos.

A Figura 3.3 apresenta diferentes tipos de canais compostos. A Figura 3.3 (a) mostra, a seção usada por Rehme, 1978, a 3.3 (b) mostra subcanais adjacentes à parede do canal ou subcanais centrais, marcada pela letra A. A Figura 3.3 (c) mostra a seção trabalhada por Wu e Trupp, 1993.

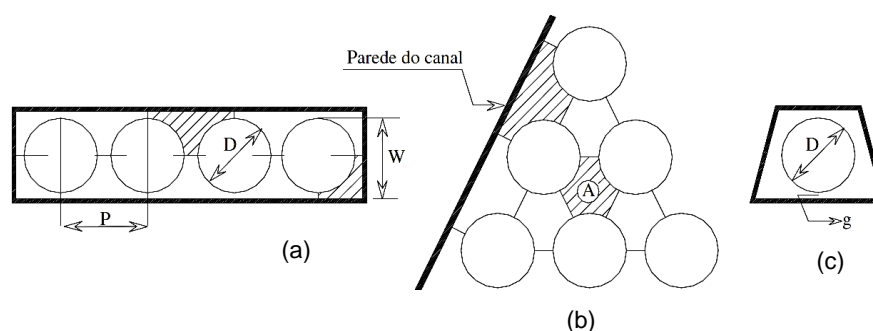


Figura 2.3 – Exemplos de Canais Compostos, Adaptado de Goulart et al., (2013).

A necessidade da predição da distribuição de temperatura entre os vários subcanais, formados pelo arranjo de barras, requer informações acerca dos processos de mistura dentro destas estruturas. Tais processos são responsáveis pelo aumento das características difusivas do escoamento turbulento. Conforme Rehme, 1992, a previsão detalhada da distribuição de temperatura nos feixes de barras é de grande importância para a segurança operacional de reatores nucleares. A análise termo-hidráulica destes equipamentos é feita através da solução das equações de quantidade de movimento, conservação de massa e a solução da equação da energia.

Neste sentido, o trabalho de Guellouz e Tavoularis, 2000, afirma que as análises termo-hidráulicas têm sido bastante inadequadas. Baseados nos conceitos de transporte local, tais análises falham ao predizer, até mesmo, características bastante conhecidas em canais compostos, como o aumento da intensidade de

turbulência e o coeficiente local de transferência de calor na região das fendas. Estas características, segundo os autores, são creditadas ao aumento dos coeficientes de mistura naquela região, devido a presença de estruturas de grandes escalas com comportamento quase-periódico, as chamadas “pulsações do escoamento”. Os primeiros a estudarem o que chamaram de pulsções do escoamento foram Rowe et al., 1973.

Conforme Möller, 1991, estas instabilidades 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 a 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 dos coeficientes de mistura entre os subcanais.

A presença de pulsções do escoamento em geometrias bastante simples é mostrada nos trabalhos de Wu e Trupp, 1993 e Meyer e Rehme, 1994 e 1995. As conclusões desses trabalhos apontam para o fato de que estas instabilidades do escoamento poderiam surgir em qualquer canal onde existia pelo menos um subcanal principal ligado a uma fenda e que os mecanismos que dariam origem a elas poderiam ser os mesmos que originariam pulsções em feixes de barras.

A conexão entre o processo de desenvolvimento do escoamento turbulento, em um subcanal de um feixe de barras com razão de espaçamento $P/D = 1,15$, e a formação de estruturas coerentes relacionadas a pulsções do escoamento, foi investigada por Parizzi, 1998. O feixe de barras era de arranjo quadrangular de duas linhas, sendo construído de tal forma que uma das barras pudesse ser retirada e trocada por outra de diferente comprimento, conseguindo-se, assim, relações entre o comprimento da seção e o diâmetro-hidráulico: $L/D_h = 1,61, 8,65, 13,59$ e $19,77$.

As flutuações de velocidade foram tomadas na região da fenda entre as barras (subcanal central). Os resultados mostraram que a distribuição de intensidades de turbulência na direção axial tende a aproximar-se, com algum espalhamento, daquela obtida em dutos circulares.

Guellouz e Tavolaris, 2000, afirmam que a formação destas estruturas coerentes em geometrias bastante simples, claramente demonstra que tais estruturas não são oriundas de assimetrias ou de outra peculiaridade qualquer em

subcanais, mas de um inevitável resultado de instabilidade do escoamento entre canais ligados por fendas estreitas.

A presença de estruturas de grande escala, com comportamento quase-periódico, também foi observada em outros tipos de canais compostos. A Figura 2.4 mostra em (a) a seção de testes estudada por Meyer e Rehme, 1994, em (b), (c), e (d) as seções de Meyer e Rehme, 1995, em (e) a seção que Biemüller et al., 1996, trabalharam. Em (f) mostra a seção de testes de Soldini et al., 2004.

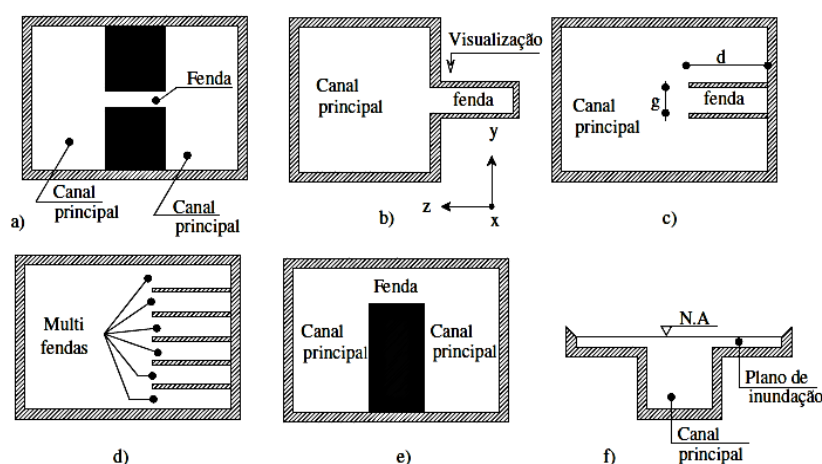


Figura 2.4 - Canais compostos onde foram observadas pulsações (Meyer e Rehme, 1994).

Meyer e Rheme, (1995), investigaram, experimentalmente, a distribuição de velocidade e as características do escoamento turbulento em canais retangulares com fendas na parede lateral, para uma faixa de número de Reynolds de 2300 até 100000. Para todas as configurações, a seção de testes foi assumida longa o suficiente para o desenvolvimento do escoamento, a relação entre o comprimento das seções e o diâmetro hidráulico, L/D_h , variou entre 45 e 94.

Biemüller et al. (1996), investigaram numericamente as características do escoamento turbulento em dois canais retangulares conectados por uma fenda, junto à parede superior, usando Simulação de Grandes Escalas, Figura 2.5. A altura e largura do canal eram, respectivamente, 180 mm e 331,6 mm e seu comprimento 504 mm. A fenda que conecta os dois canais principais possui altura g e largura d , de 10,20 mm e 40,6 mm, respectivamente, portanto uma relação $g/d=4$. No domínio computacional a seção transversal foi considerada infinita, com condições de contorno periódicas nesta direção. Também obteve condições de contorno

periódicas na direção principal do escoamento. O número de Reynolds da simulação variou de 3300 a 580000. Os resultados mostraram picos de tensões de Reynolds junto às fendas e grandes vórtices carregados pelo escoamento médio girando em direções opostas, como modelado por Möller (1991).

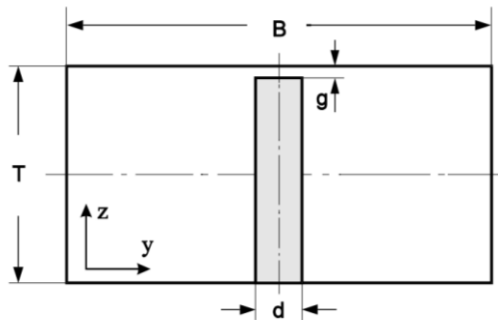


Figura 2.5 - Geometria do canal estudado numericamente por Biemüller et al. (1996).

A geração e evolução de vórtices de grande escala, em um canal composto sob condições do escoamento quase uniforme é investigado por Stocchino e Brocchini, 2009, Figura 2.6. Os autores discutem as possíveis semelhanças e diferenças na camada de cisalhamento no escoamento livre, induzido pela reunião de riachos rasos de diferentes velocidades. Os experimentos foram realizados utilizando a técnica PIV (Particle Image Velocimetry). Foram avaliadas 9 seções de testes diferentes, com diferentes números de Reynolds variando de $1,3 \times 10^4$ a $3,6 \times 10^4$. Uma das conclusões deste trabalho foi que a geração de macro-vórtices no escoamento, para este tipo de canal composto, depende fortemente da taxa de profundidade do canal.

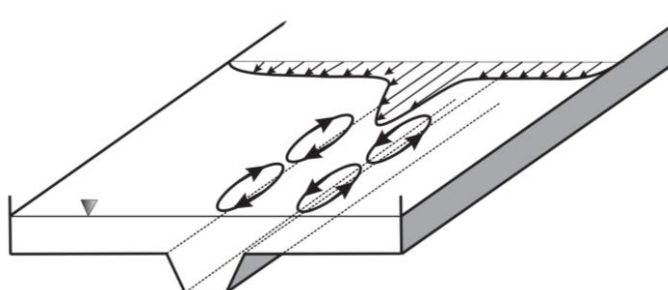


Figura 2.6 - canal composto mostrando vórtices em transição e distribuição da velocidade média na região do escoamento ao longo da coordenada transversal.

Stocchino e Brocchini,(2009).

Em Souza e Goulart, 2011, os autores empregam simulação numérica para avaliar o desenvolvimento do escoamento turbulento em um canal composto previamente estudado experimentalmente. O comprimento do canal simulado foi de 2600 mm com relação de $P/D = 6,25$ e Reynolds de $8,43 \times 10^4$. Picos de vorticidade puderam ser vistos na região da fenda. Os iso-contornos de velocidades instantâneas na direção transversal mostraram a presença de grandes vórtices dominando a região da fenda. Tal como predito por Möller, 1991. A Figura 3.7 mostra grandes vórtices na região da fenda girando em sentidos opostos e viajando no escoamento principal com uma velocidade. Neste trabalho foi utilizado URANS, baseado no modelo de turbulência Spalart-Allmaras. Observa-se da Figura 3.(a), que as estruturas tiveram seu início em $L/D_h = 15$. A Figura 3.7 (b) mostra visualização do escoamento em um canal de água, realizada por Meyer e Rheme, 1995. A visualização do escoamento foi realizada em um canal semelhante ao utilizado no trabalho, com $P/D = 5,78$, $Re = 2.00 \times 10^5$ e $L/D_h = 52,23$.

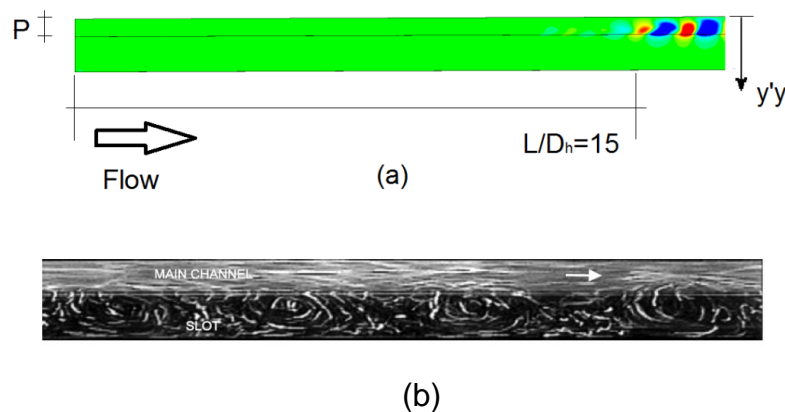


Figura 2.7 -(a) início do aparecimento de estruturas de grande escala no escoamento. (b) A visualização do escoamento de vórtices em movimento na ranhura longitudinal - Meyer e Rheme (1995).

Yan, 2012, investigou em seu trabalho numérico com o código de CFD Fluent®, um canal com feixe de tubos com relação $P/D = 1,06$, onde avaliou o efeito de diferentes números de Reynolds no aparecimento de estruturas coerentes no escoamento em fenda estreita. A Figura 3.8 mostra os resultados encontrados pelo autor, onde as estruturas coerentes para Reynolds de 120.000 e 200.000 são bastante evidentes. Os vórtices nestes dois casos são muito maiores do que nos demais resultados. Isto significa que à medida que o número de Reynolds aumenta,

as estruturas coerentes se tornam mais evidentes e estáveis. Os resultados do autor também indicam que a estrutura coerente também se manifesta em baixo número de Reynolds ($Re = 10.000$). Estes resultados vão ao encontro com o trabalho realizado por Meyer e de Rehme (1995), onde os resultados indicaram que esses vórtices estão presentes também em números de Reynolds muito baixos. O autor conclui que a estrutura coerente existe uma faixa muito ampla do número de Reynolds.

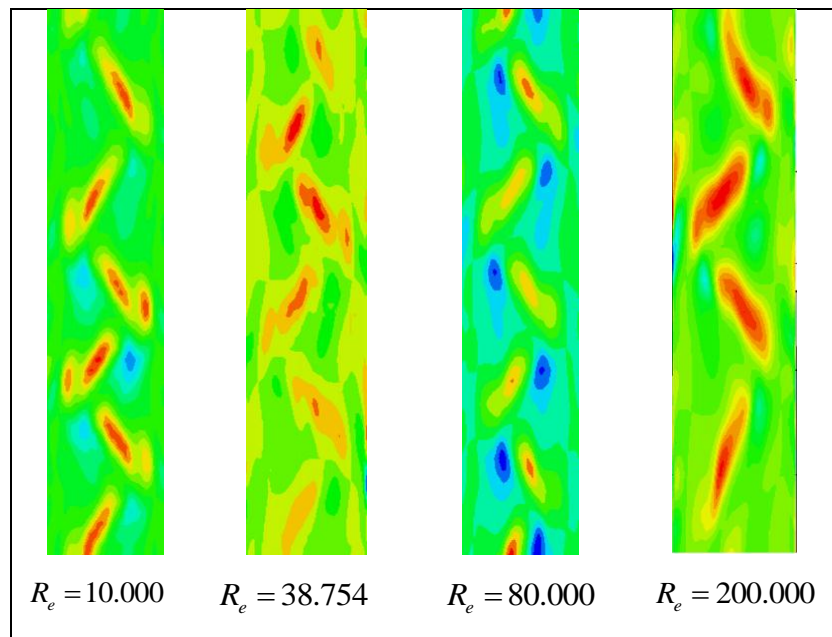


Figura 2.8 - Estruturas Coerentes para diferentes números de Reynolds. Yan, 2012.

Souza et al. 2014, reproduziram os resultados experimentais de Guellouz e Tavolares, (2000), numericamente, através do código comercial ANSYS-CFX13, utilizando como modelo de turbulência o SST-SAS. Os testes foram feitos em um canal retangular com um tubo no centro, Figura 3.9 (a), com $D = 101\text{mm}$ e comprimento L de $80D$. Os resultados de sua pesquisa apresentaram o aparecimento de estruturas coerentes como papel importante no processo de transferência de calor. O escoamento está envolvido por essas estruturas de larga escala quase periódicos após a posição x/D igual a 15. Estas estruturas começam a aparecer na região da fenda e sua influência avança para a região próxima ao centro do tubo, Figura 3.9 (b). Os resultados foram comparados com os dados experimentais de Guellouz e Tavoularis (2000), se mostrando satisfatórios.

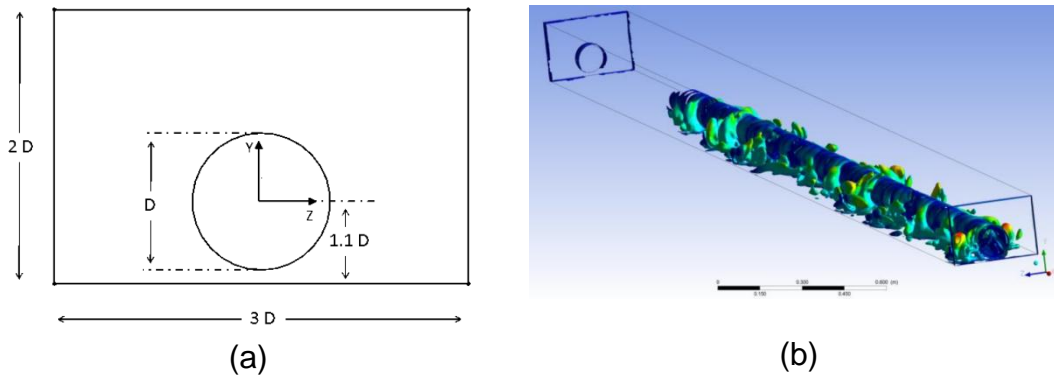


Figura 2.9 -(a) geometria do canal estudado. (b) Evidencia de estruturas correntes no escoamento.

Recentemente Choueiri e Tavoularis, 2014, investigaram o campo de velocidades ao longo de um canal circular excêntrico, Figura 2.10, através da técnica LDV (laser Doppler velocimetry). Com uma relação de diâmetros de 0,5 e uma excentricidade de 0,8 para um número de Reynolds de 7300. A sonda LDV avaliou as evoluções da componente de velocidade axial média em cinco posições do canal.

A observação do escoamento identificou três regiões distintas: a região de entrada, a região de crescimento das flutuações (FG), e a região de rápida-mistura (RM), Figura 2.11. Fracas oscilações de velocidade quase periódicas foram detectadas a jusante da região de entrada, e cresceu conforme foram feitas as medições ao longo do comprimento do canal. Duas camadas de mistura foram identificadas em ambos os lados da fenda, que geraram uma esteira de vórtices e mistura completa em grande escala do fluido no canal.

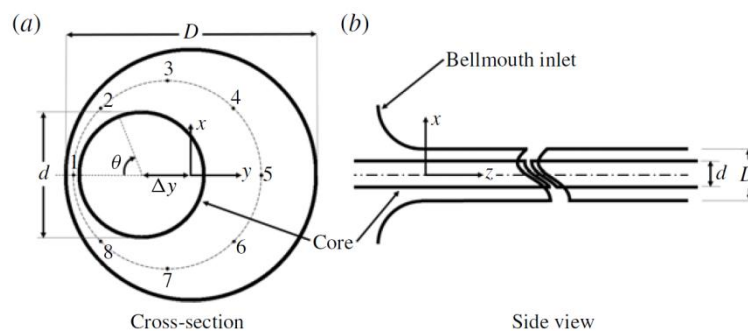


Figura 2.10 – Geometria da seção e testes investigada por Choueiri e Tavoularis, 2014.

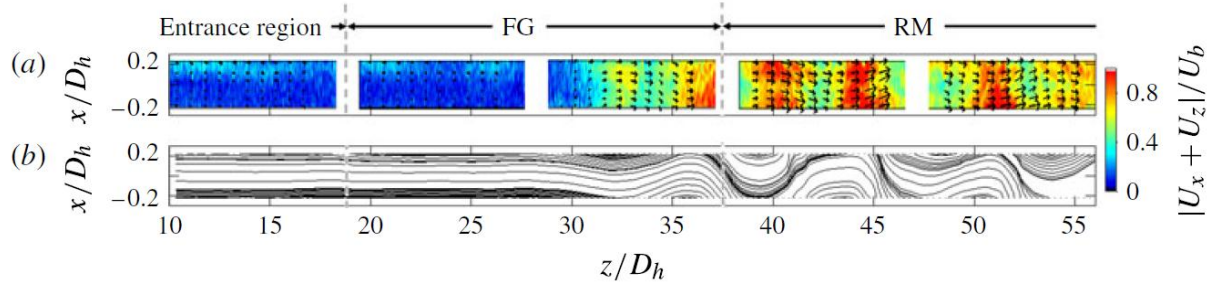


Figura 2.11 – (a) Identificação das três regiões observadas no escoamento, pelos autores. (b) Mapa de velocidade axial do escoamento na fenda. Choueiri e Tavoularis, 2014.

A existência de diferenças de velocidade no interior de um escoamento é responsável pelo desenvolvimento da camada de mistura. Essa camada é um modelo de escoamento extremamente importante para a compreensão do desenvolvimento da turbulência em escoamento de canais compostos.

Goulart et al., 2013, apresentou os resultados de sua pesquisa sobre canais retangulares compostos. O autor avaliou diferentes números de canais compostos que contenham uma única fenda. O trabalho experimental teve como objetivo determinar o quão importante os parâmetros geométricos são neste tipo de canais, através da anemometria de fio quente, com sonda dupla e tubo de Pitot. Os principais resultados revelaram que o perfil de velocidade axial, ao longo da linha de simetria, pode ser dividido em três diferentes regiões: nas zonas 1 e 3 a velocidade de perfil é governado pelas paredes laterais do canal principal, enquanto que a zona 2, entre as paredes, uma camada de mistura se desenvolve, além disso, os perfis de velocidade apresentados, pelo autor, sem exceção, apresentaram pontos de inflexão na fronteira do canal principal e do subcanal, $y/P = 1$, indicando que este tipo de escoamento é instável. Tais características são mostradas na Figura 2.12 (a) e (b).

De acordo com os autores as principais características dessa camada de mistura foram governadas pelos parâmetros geométricos da fenda, profundidade, P , largura da fenda, D , e comprimento, L . As tensões de Reynolds medidas mostraram picos elevados na borda da fenda (entre canal principal e a fenda).

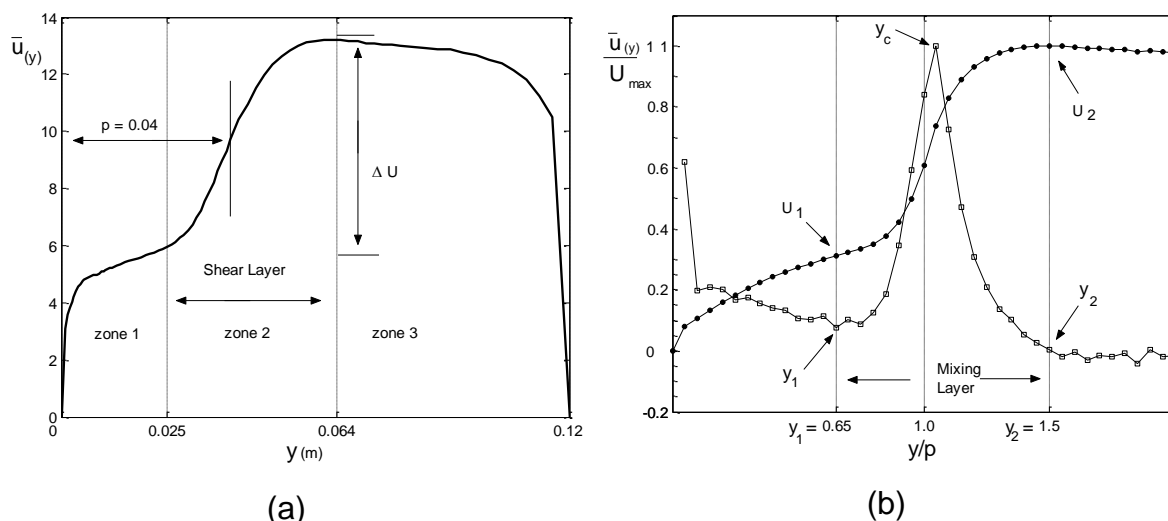


Figura 2.12 - (a) Perfil de velocidade axial média. (b) Gradiente da velocidade média. Goulart et al. 2013.

2.3 Estudo do escoamento turbulento através da Transformada de Ondaletas

A análise de ondaletas tem sido extensivamente formalizada devido aos esforços de matemáticos, físicos e engenheiros nas últimas décadas. Criou-se um grande interesse nessas comunidades, em áreas tanto teóricas quanto aplicadas. Este estudo foi aplicado inicialmente em sinais sísmicos em geofísica nos anos 80 Morlet et al.1984.

Farge, 1992, fez a primeira descrição sobre a aplicação da Transformada de Ondaletas a escoamentos turbulentos. A autora faz inicialmente uma apresentação geral sobre a transformada contínua e a transformada discreta de ondaletas, de maneira a fornecer informações básicas sobre o uso dessa ferramenta. O enfoque de seu trabalho corresponde à necessidade de uma decomposição do sinal nas respectivas escalas que o compõe, baseada na evidência (tanto experimental quanto numérica) da existência de estruturas coerentes no escoamento turbulento. São apresentados novos diagnósticos, todos baseados nos coeficientes de ondaletas, que podem ser úteis para analisar, modelar ou calcular escoamentos turbulentos.

O uso de transformada de ondaletas para modelar um campo experimental é feito por Hajj et al., 2000, que estudam o efeito de vários tipos de promotores de turbulência em um túnel de vento para simulação de camada limite atmosférica. A transformação discreta de ondaletas com as funções Daubechies com quatro

momentos nulos foi usada para estudar os níveis de energia e sua intermitência em cada escala.

Gilliam et al. 2000 verificaram que a análise de ondaletas pode ser empregada para detectar estruturas coerentes em grandes séries temporais. Os autores sugerem duas técnicas estatísticas: o estimador de taxa de intermitência, calculando a fração de tempo ocupado por estruturas coerentes e uma técnica de contagem de evento com base na análise de ondaletas para extrair estruturas coerentes. O estudo foi feito a partir de dados experimentais do vento, coletados no campo de pesquisa no Texas. Ainda revelam que a combinação dessas duas técnicas estatísticas pode ajudar a obter maiores informações sobre a magnitude, frequência característica e comprimentos desses fenômenos localizados.

Indrusiak, 2004, estudou a aplicação das transformadas de ondaletas aos sinais experimentais obtidos em escoamentos turbulentos transientes e permanentes em canal aerodinâmico com a técnica de anemometria de fio quente. Durante a aquisição de series de velocidades na esteira do tubo central da terceira fileira de um banco de tubos alinhados, com razão de espaçamento de 1,26, foi identificado um regime de escoamento não estacionário, diferente do esperado, que só foi revelado através da decomposição dos sinais em bandas de frequências.

Olinto, 2005, identificou a presença de escoamento biestável para dois tubos dispostos lado a lado, para um número de Reynolds de 3×10^4 . O autor também investigou instabilidades no escoamento cruzado em bancos de tubos, com três razões diferentes de espaçamento $P/D = 1,26, 1,4$ e $1,6$. O autor aplicou a Transformada contínua e discreta de Ondaletas para identificar onde os processos intermitentes estão presentes neste tipo de escoamento.

De Paula et al., 2012, apresenta um estudo experimental sobre o fenômeno da biestabilidade que ocorre em escoamentos turbulentos em dois cilindros dispostos lado-a-lado. Neste estudo foi aplicada a transformada contínua e discreta de ondaletas, para analisar o fenômeno. Segundo o estudo, o uso em conjunto das transformadas discreta e contínua de ondaletas auxilia muito na identificação de comportamentos transitórios de energia, pois facilita a localização em ambas às escalas de tempo, frequência e energia.

Xuan Wu et al., 2013, avaliaram os sinais de velocidade do escoamento de um polímero no estudo da redução de arrasto. Por meio de simulação numérica

direta, (DNS), com o modelo de elemento-discreto. Os resultados foram analisados via transformada de ondaletas. As Características dos diferentes componentes das series temporais, como espectros de energia, fator intermitente, e energia intermitente da frequência, são examinados por transformada discreta de ondaletas. Onde puderam identificar os efeitos do polímero sobre distribuição de energia turbulenta no escoamento e na redução do arrasto.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Equações de Balanço

A seguir será feita uma introdução à descrição das equações que governam o escoamento de um fluido. O estudo dos escoamentos turbulentos é feito, normalmente, através da solução das equações de conservação de massa e conservação da quantidade de movimento.

3.2 Conservação da Massa

Para um sistema de coordenadas cartesianas a equação da conservação da massa ou equação da continuidade, que descreve o movimento de um fluido contínuo e compressível, pode ser escrita na forma:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} \vec{u} = \frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u_i)}{dx_i} = 0 \quad (4.1)$$

onde:

ρ = massa específica do fluido, [ks/m³].

u_i = componente da velocidade nas direções ortogonais, [m/s].

x_i = são coordenadas espaciais, [m]

t = tempo, [s]

$i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Considerando as variáveis do escoamento como a soma de um valor médio e sua flutuação e conforme a hipótese de Reynolds, dada pela eq. 4.2.

$$u = \bar{u}_i + u'_i \quad (4.2)$$

A equação (4.1) pode ser reescrita pela eq. 4.3.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \overline{\rho' u'_i}) = 0 \quad (4.3)$$

Para o caso de escoamentos incompressíveis, onde é constante, a equação (4.3), torna se a eq. 4.4.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.4)$$

3.3 Conservação da Quantidade de Movimento

As equações de conservação da quantidade de movimento podem ser deduzidas a partir da Segunda Lei de Newton, a qual estabelece que a variação da quantidade de movimento, em uma dada direção é igual ao somatório das forças externas (forças de campo ou forças superficiais) que agem sobre a massa do fluido na mesma direção. As equações de balanço de quantidade de movimento também são conhecidas como equações de Navier-Stokes, sendo dada por:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + f_i + \rho g_i \quad (4.5)$$

onde:

p = pressão, [Pa].

μ = viscosidade dinâmica, [m²/s].

f_i = são as forças de campo nas direções ortogonais, [N/m³].

As forças de inércia, forças de pressão, forças viscosas e forças de campo, são representadas pelo primeiro, segundo, terceiro e quarto termo da equação (4.4), respectivamente. Utilizando a hipótese de Reynolds, onde as grandezas de velocidade e pressão são decompostas em sua parte média e flutuante, equações (4.2) e (4.6), e combinando estas equações com a equação da conservação da massa, (4.3), pode-se reescrever a equação (4.5), conforme eq. 4.7.

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (4.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + f_i \quad (4.7)$$

3.4 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 são adquiridos como séries temporais, e cada série tem um comprimento e será adquirida com uma determinada frequência de amostragem, conforme a necessidade de se dar maior ênfase a uma determinada característica do fenômeno estudado.

Após a obtenção destes dados, os mesmos são tratados por ferramentas matemáticas que permitem uma análise no domínio da frequência, bem como uma análise conjunta nestes dois domínios (tempo-frequência).

Toda a análise 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. Este fato não se verifica em geral com os dados experimentais de processos físicos, tal como a vibração de uma estrutura.

Conforme observa Morettin (1999), o emprego do método de Fourier para análise de dados não ergódicos deixa-se de ter acesso às informações sobre a distribuição de frequências e a densidade de energia em relação ao intervalo de tempo em que se desenvolve a série, visto que, estas informações variam no desenvolvimento da série não estacionária. 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.

3.5 Classificação de sinais

Devido a diversidade de sinais existentes, a classificação dos sinais é feita de modo amplo. Se um sinal não varia em algum sentido, então se diz que ele é estacionário, caso contrário ele é não estacionário. Todo sinal que muda no tempo é chamado de transiente.

Se um sinal é explicitamente conhecido, diz-se que se tem um sinal determinístico. Muito frequentemente os sinais são governados por eventos randômicos, possibilitando o surgimento de vários sinais. Nesse caso o sinal é dito randômico ou estocástico.

Um processo estocástico é dito ergódico, se com apenas uma realização do processo é possível caracterizá-lo. Esta propriedade é importante, pois se deseja caracterizar os processos gerados de uma dada série temporal a partir de uma única realização desta, o que nos leva a pensar que a própria série é a realização de um processo estocástico ergódico.

O conteúdo espectral é usado para classificar sinais. Sinais cujo espectro se concentra em uma faixa frequencial relativamente pequena são chamados de banda limitada, caso contrário é chamado de banda larga.

3.6 Transformada de Fourier

Uma das ferramentas mais conhecidas para a análise de sinais é a transformada de Fourier, que decompõe o sinal utilizando como bases senos e cossenos de diferentes frequências. Outra maneira de pensar na transformada de Fourier é como uma técnica matemática para transformar o sinal observado no domínio do tempo (ou do espaço, sem perda alguma de generalidade) para o domínio da frequência.

Para muitos sinais, a transformada de Fourier é extremamente útil, pois o conteúdo de frequência é de extrema importância. Na transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, perde-se totalmente a informação sobre a localização temporal (ou espacial). Ao se observar a transformada de Fourier de um sinal, é impossível dizer onde um evento em particular está localizado, pois o que é obtido são apenas as frequências que compõem o sinal.

Se um sinal “não se altera no tempo”, ou seja, se é um sinal dito “estacionário”, esta peculiaridade não tem importância alguma. Entretanto, a maioria dos sinais contém numerosas características não estacionárias ou transitórias, tais como: tendências, mudanças abruptas e o início ou final de eventos, essas características são geralmente as partes mais importantes de um sinal e a transformada de Fourier é incapaz de detectar tais processos.

Formalmente, a transformada de Fourier de uma função $f(t): \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R}, f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ é definida para tempo (t) e frequência (f) reais contínuos, pela eq. 4.8, Morettin, 1999, que fornece informações sobre o conteúdo de frequência de um processo ou sinal, mas não fornece informações sobre a localização destas frequências no domínio do tempo. A quantidade $|F_f(f)|^2$ é o chamado espectro da energia de Fourier, Figura 4.1.

$$F_f(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-ift} dt \quad (4.8)$$

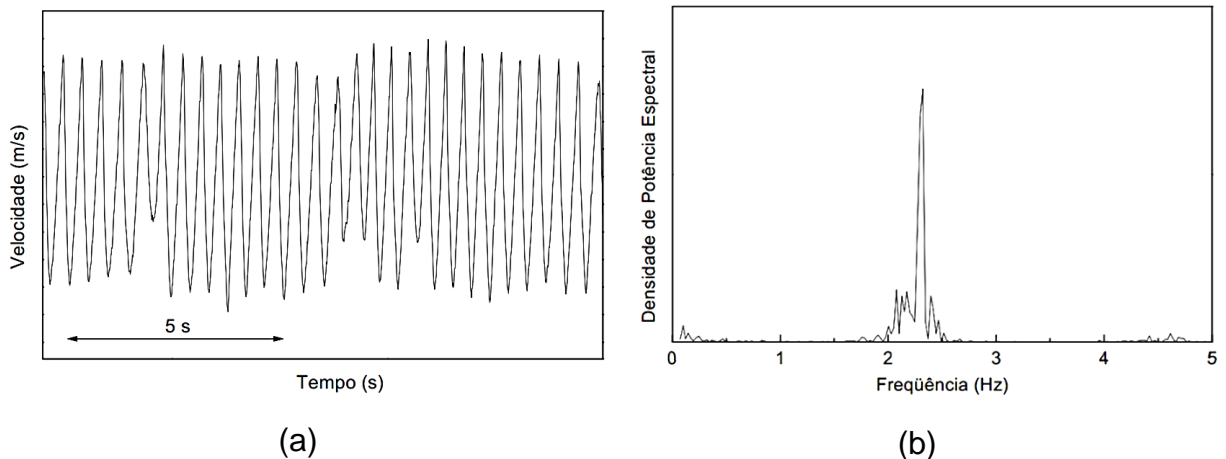


Figura 3.1 – Sinal de velocidade (a) no domínio do tempo. (b) em frequência.

A fim de destacar as principais informações presentes nos sinais adquiridos, usa-se a função densidade espectral de potência (PSD- power spectral density), a qual é o espectro de Fourier da série, suavizado sobre os intervalos de frequência e sobre conjuntos de estimativas, Bendat e Piersol, 1971.

3.7 Transformada de Ondaleta

Quando a hipótese da egordicidade não pode ser mantida, devido a fenômenos transientes de diferentes escalas, a análise de Fourier torna-se inadequada, visto que as informações temporais não são visíveis neste espaço. Isso se deve aos coeficientes, estarem referidos a todo o domínio temporal do sinal, pois as componentes da base de Fourier são funções do tipo seno e cosseno, com suporte infinito.

Estas funções são localizadas no domínio da frequência, mas infinitamente distribuídas no domínio do tempo. Com isso, os coeficientes de Fourier representam um valor médio para todo o domínio, mascarando a presença de intermitências e de fenômenos transitórios, Alam e Sakamoto, 2005. Como alternativa a essa limitação, podem ser usadas transformadas de ondaletas, que permitem o estudo dos fenômenos turbulentos sem a hipótese de egordicidade.

A transformada de Ondaleta permite o uso de longos intervalos onde se deseja mais precisão sobre as baixas frequências, e regiões de tamanho menor para obter informações sobre as altas frequências, a elaboração dessa ferramenta foi efetuada de Morlet em 1980. Yves Meyer, por sua vez, demonstrou as condições de ortogonalidade desse novo operador matemático, oferecendo condições seguras para a aplicação da nova técnica, Meyer, 1990.

A motivação original para a criação da teoria de ondaleta foi o desenvolvimento de um método de aquisição, transformação e armazenagem de um traço sísmico, Morlet et al. 1984, em que ondaleta é uma função de uma variável no domínio do tempo, que deve satisfazer as propriedades listadas abaixo:

- ❖ A contribuição de cada uma das diferentes bandas de frequência deve ser razoavelmente separada (no domínio da frequência);
- ❖ Esta separação deve ser alcançada sem a perda excessiva de resolução na variável tempo;
- ❖ A reconstrução da função original a partir de sua representação ou transformada deve ser obtida por um método que seja capaz de oferecer uma alta precisão e que ao mesmo tempo seja robusto, ou seja, que o mesmo seja estável diante as pequenas perturbações.

As duas primeiras condições caracterizam essencialmente a propriedade conhecida como localização no tempo e na frequência.

O termo *ondaletas*, derivado do francês *ondelettes*, também conhecido na língua inglesa por *wavelets*, significa uma pequena onda que cresce e decai em um período finito de tempo. O oposto ocorre com a função seno (grande onda), por exemplo, que oscila durante todo o domínio real, Percival e Walden, 2000.

A transformada de ondaletas revela onde ou quando a energia do sinal analisado é transferida de um período/frequência para o outro. Um fato básico sobre ondaletas, é que elas são localizadas no tempo, por isso denominada de funções de suporte compacto, contrariamente ao que ocorre com as funções trigonométricas. Por isso, tornaram-se ideais para analisar sinais não ergódicos.

Ondaletas são funções obtidas a partir de uma função protótipo, a ondaleta mãe, $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, por meio de dilatações (ou contrações) e translações (deslocamentos). O objetivo primordial em se realizar essas operações é o de se obter uma família de funções, base para descrever outras funções pertencentes a $L^2(\mathbb{R})$. Introduzindo as dilatações por meio de um fator de escalamento "a" e translações por meio de uma variável "b", deduz-se a forma geral de uma família de ondaletas, onde $\psi(t)$ é a ondaleta primitiva ou mãe, conforme eq. 4.9.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a,b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (4.9)$$

onde a é a escala e b é a posição da ondaleta. Uma função de escala, $\phi(t)$, é associada a cada ondaleta, e satisfaz a propriedade, conforme eq. 4.10.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(t) dt = 1 \quad (4.10)$$

Esta função escala também irá gerar uma base, por meio de dilatações e translações, conforme eq. 4.11.

$$\Phi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{b}} \Phi, \quad a,b \in \mathbb{R}, \quad a > 0 \quad (4.11)$$

Desta função escala são obtidos coeficientes que representam a média ponderada do sinal nas escalas consideradas. Da função ondaleta são obtidas oscilações ponderadas em torno da média, nas mesmas escalas, Indrusiak, 2004.

Uma função $\psi(t)$, é uma função de ondaleta, se satisfaz duas propriedades

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1 \text{ e } \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 .$$

Na transformada de Ondaletas, quando o parâmetro de escala a aumenta ($a > 1$), a ondaleta se expande e carrega apenas informação sobre o comportamento dos grandes períodos (baixas frequências); analogamente, quando a diminui ($a < 1$), a ondaleta se contrai e carrega apenas informação sobre o comportamento dos pequenos períodos (altas frequências).

Deslocar ou transladar a ondaleta significa movê-la para frente ou para trás no eixo do sinal. Matematicamente, o deslocamento de uma função $f(t)$ por k é representada por $f(t-k)$. Pode se visualizar esse processo em conjunto com a dilatação e compressão da ondaleta, na Figura 3.2.

A Figura 4.2 ilustra algumas Ondaletas filhas obtidas através da dilatação da Ondaleta mãe da família “Morlet”. Nesta ilustração é possível perceber a correlação entre a largura (escala) de uma Ondaleta e sua frequência de análise.

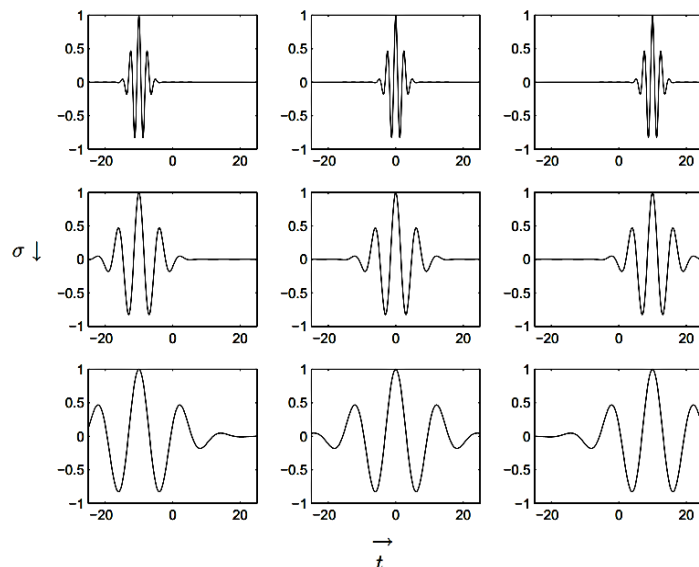


Figura 3.2 - Funções base da transformada de ondaletas obtidas através da dilatação, compressão e translação da ondaleta-mãe da família de Morlet – parte real. (Loss, 2004).

A utilidade das ondaletas está na sua possibilidade de atuarem como funções base na decomposição de outras funções $\in L^2(\mathbb{R})$. As bases ondaletas podem ser redundantes ou ortonormais, cobrindo e descrevendo completamente o espaço $L^2(\mathbb{R})$, de uma forma mais sofisticada que as bases senoidais dos métodos de Fourier.

Suponha uma ondaleta-mãe $\psi(x)$ tal que $\psi_{j,k} = 2^{j/2}\psi(2^j x - k)$, onde j é a escala, k é uma localização temporal e $\psi_{j,k}$ são as ondaletas-filhas. Nota-se que se usa uma dilatação binária 2^j e uma translação diática $k2^{-j}$ com $j,k \in \mathbb{Z}$.

3.8 Funções de Ondaleta

Nesta seção serão abordadas as principais ondaletas encontradas na literatura e alguns critérios usados para a sua escolha.

3.8.1 Exemplos de ondaletas unidimensionais

Devido à flexibilidade de escolha das ondaletas, muitas funções têm sido utilizadas como ondaleta. Abaixo pode se ter um resumo de algumas usadas na literatura.

Ondaleta de Haar: A ondaleta de Haar, Figura 3.3, é a mais simples de todas as ondaletas e pertence à família das ondaletas ortogonais com suporte compacto e é definida pela eq. 4.12.

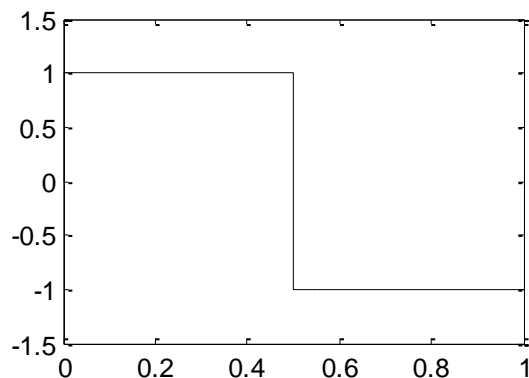


Figura 3.3 - Visualização da Ondaleta de Haar

$$\begin{cases} \psi(t) = 1, & \text{se } 0 \leq t < 0,5 \\ \psi(t) = -1, & \text{se } 0,5 \leq t < 1 \\ \psi(t) = 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.12)$$

Em um sinal unidimensional, discretamente amostrado, essa ondaleta pode ser vista atuando como um operador de diferenciação, ou seja, fornecendo diferenças das médias não sobrepostas da observação.

Ondaleta de Chapéu Mexicano (Mexican Hat Wavelet): Esta ondaleta é a derivada segunda da função gaussiana $f(t) = e^{1/2t^2}$, pertence à família das ondaletas reais não ortogonais, e pode ser visualizada graficamente na Figura 3.4 e é definida pela eq. 4.13.

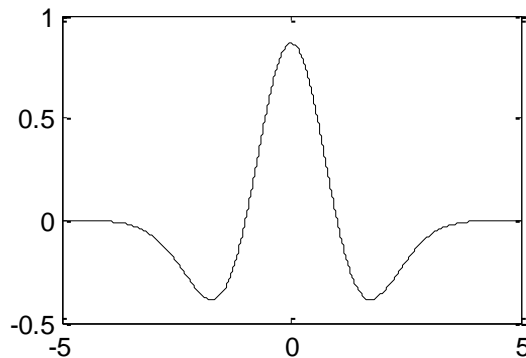


Figura 3.4 - Visualização da Ondaleta de Chapéu Mexicano

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-0,25} (1 - t^2) e^{-0,5t^2} \quad (4.13)$$

Ondaleta de Morlet: O conceito de ondaleta, na atual forma teórica, foi, pela primeira vez, proposto por Jean Morlet e o grupo de Física Teórica de Marseille. Na Figura 3.5 podemos observar a ondaleta de Morlet. A ondaleta de Morlet pertence à família de ondaletas complexas não ortogonais e é definida pela eq. 4.14, que geralmente é aproximada pela eq. 4.15.

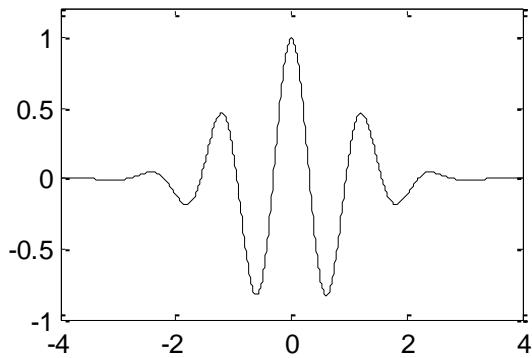


Figura 3.5 - Visualização da Ondaleta de Morlet

$$\psi(t) = \pi^{-0,25} e^{-iw_0 t - e^{-1/2w_0^2}} e^{-1/2t^2} \quad (4.14)$$

$$\psi(t) \pi^{-0,25} e^{-iw_0 t} e^{-1/2t^2}, \text{ para } w_0 \geq 5 \quad (4.15)$$

Ondaleta de Daubechies: São ondaletas ortonormais de suporte compacto, o que faz a análise discreta de ondaletas mais praticável. Os nomes das ondaletas da família de Daubechies são escritas como dbN, onde N é a ordem e o “db” o “sobrenome” da ondaleta. A ondaleta db1 equivale à ondaleta de Haar. Na Figura 3.6 podem-se observar os membros dessa família.

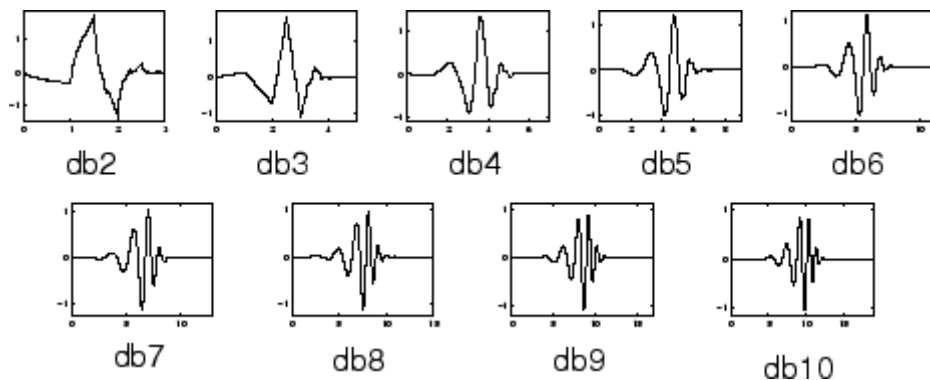


Figura 3.6 - Visualização da família de ondaletas de Daubechies.

Essas ondaletas não têm expressão explícita, à exceção de db1, que, como foi apresentado, é a ondaleta de Haar.

3.8.2 Recomendações para a Escolha da Ondaleta

Uma das principais críticas direcionadas à transformada de Ondaletas é a escolha da função ondaleta-mãe $\psi(t)$. Nessa escolha, existe uma série de critérios e recomendações na literatura, que devem ser considerados. Têm-se, inicialmente, as considerações dadas abaixo, Torrence e Compo, 1998.

Ortogonais ou não ortogonais: A transformada de Ondaletas, utilizando-se famílias de ondaletas ortogonais, Meyer, 1989, fornece uma representação mais compacta do sinal estudado. Reciprocamente, a Transformada de Ondaleta obtida utilizando-se famílias de ondaletas não ortogonais é altamente redundante em escalas maiores, na qual o Espectro de Ondaleta em tempos adjacentes é altamente correlacionado. A Transformada de Ondaleta não ortogonal é útil na análise de séries temporais (válida também para séries espaciais) em que atenuações e variações contínuas na amplitude são esperadas;

Complexa ou real: Uma função ondaleta complexa irá fornecer informação da amplitude e da fase e é mais bem adaptada para capturar comportamentos oscilatórios de séries temporais. Uma função ondaleta real fornece apenas informação sobre uma componente e pode ser utilizada apenas para localizar picos e descontinuidades;

- ❖ *Suporte*: A resolução de uma função ondaleta é determinada pelo balanço entre seu suporte no espaço real e o seu suporte no espaço na frequência. Uma função com um suporte mais compacto (mais estreita) vai ter uma boa resolução no domínio do tempo e uma resolução mais pobre no domínio da frequência, enquanto uma função com suporte mais amplo (mais larga) terá uma resolução mais pobre no domínio do tempo e uma boa resolução no domínio da frequência (características determinadas pelo princípio da incerteza de Heisenberg);
- ❖ *Formato*: A função ondaleta escolhida deve refletir o tipo de características presentes na série temporal. Para séries com picos ou descontinuidades, uma boa escolha seria a ondaleta de Haar, enquanto, para séries mais suaves e com variações mais sutis, deve-se escolher uma função como a ondaleta de Morlet. Se o interesse principal é a obtenção do Espectro de Energia de

Ondaleta, então a escolha da função ondaleta não é crítica e qualquer uma delas irá fornecer o mesmo resultado qualitativo.

Existem diversos tipos de ondaletas, e em geral os resultados podem depender fortemente da escolha destas. Assim, deve-se escolher a melhor ondaleta para realçar as características de interesse do fenômeno estudado.

As famílias de ondaletas disponíveis no aplicativo computacional Matlab® são: *BiorSplines*, *Coiflets*, *Daubechies*, *Gaussian*, *Haar*, *Mexican_hat*, *Meyer*, *Morlet* e *Symlets*. Neste trabalho, são usadas as mesmas famílias de ondaletas empregadas por Indrusiak, 2004 e Olinto, 2005, em função dos fenômenos estudados e das características procuradas. Para transformadas contínuas (espectrogramas) foi utilizada a ondaleta de *Morlet* (*morl*), e para as reconstruções dos sinais (filtragens) foi utilizada a ondaleta *Daubechies 20* (*db20*).

De maneira geral, a transformada de ondaletas realiza uma análise do sinal no tempo e escala. Contudo, para fins práticos, é mais conveniente expressar os resultados em termos de frequência. Assim, os valores dos coeficientes de escala “a”, podem ser transformados em valores de frequência, através de uma aproximação periódica por transformada de Fourier. Chama-se de pseudo-frequência, F_{ψ} , da ondaleta. A frequência do módulo máximo da transformada de Fourier, dada pela eq. 4.16:

$$f_a = F_{\psi} \frac{f_s}{a} \quad (4.16)$$

onde f_s é a frequência de aquisição e a é a escala.

Alguns valores típicos de F_{ψ} são:

- ❖ Ondaleta de Morlet ($F_{\psi} = 0,8125$);
- ❖ Ondaleta de Mayer ($F_{\psi} = 0,6902$);
- ❖ Ondaleta db20 ($F_{\psi} = 0,6667$).

Existem três tipos básicos de transformadas de ondaletas: a transformada contínua de ondaletas (CWT – Continuous Wavelet Transform), a transformada discreta de ondaletas (DWT – Discrete Wavelet Transform) e a transformada discreta de pacotes de ondaletas (DWPT – Discrete Wavelet Packet Transform). A seguir estes três tipos são brevemente descritos.

3.9 Transformada Contínua de Ondaletas (TCO)

É representada pela convolução linear do sinal $x(t)$ e a ondaleta mãe $\psi_{a,b}(t)$. Matematicamente é descrita pela eq. 4.17. Já o espectro de ondaletas, ou espectrograma, é definido pela eq. 4.18.

$$\tilde{X}_{(a,b)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t) dt \quad (4.17)$$

$$P_{xx(a,b)} = \left| \tilde{X}_{(a,b)} \right|^2 \quad (4.18)$$

O termo espectrograma é devido à característica da transformada de ondaletas permitir a representação da distribuição da energia de sinais transientes sobre os domínios do tempo e da frequência.

3.9.1 Escalograma: representação da Transformada Contínua de Ondaleta

Os coeficientes de ondaletas de um sinal são todas as entradas da matriz $\tilde{X}_{(a,b)}$ da TCO. O escalograma é dado pelo quadrado do módulo dos coeficientes da matriz, equação 4.18, o qual mede o nível de energia ou de excitação de um dado sinal em termos do espaço e da escala, uma vez que a Transformada de Ondaletas é uma transformação que preserva a energia do sinal. O escalograma também pode ser dado apenas pelo módulo dos coeficientes da TCO. O escalograma informa se o sinal analisado possui características multi-escalares e quais escalas participam do processo descrito pelo sinal.

Como uma propriedade da análise ondaleta, é possível mostrar que a amplitude do coeficiente de ondaleta é associada com a variação abrupta do sinal ou detalhes das altas frequências, Meyer, 1990, Daubechies, 1992, Chui, 1992.

O processo de obtenção do Escalograma pode ser resumido de forma simples, por basicamente cinco passos, que englobam a TCO e que estão listados abaixo.

- 1) Efetua-se a escolha de uma ondaleta através de testes e/ou com a ajuda da seção 4.8. Faz-se localizar ondaleta através de uma translação de b_0 , em uma escala a_0 , no início do sinal $f(t)$ a ser estudado,

- 2) Efetua-se então a “comparação” da ondaleta com uma porção do sinal contida em seu início, através do produto interno dado pela equação 4.17, gerando um coeficiente $\tilde{X}_{(a,b)}$, para b_0 e a_0 dados inicialmente. Esse coeficiente representa a correlação da ondaleta com a porção do sinal que está sendo analisado (ver Figura 4.7).

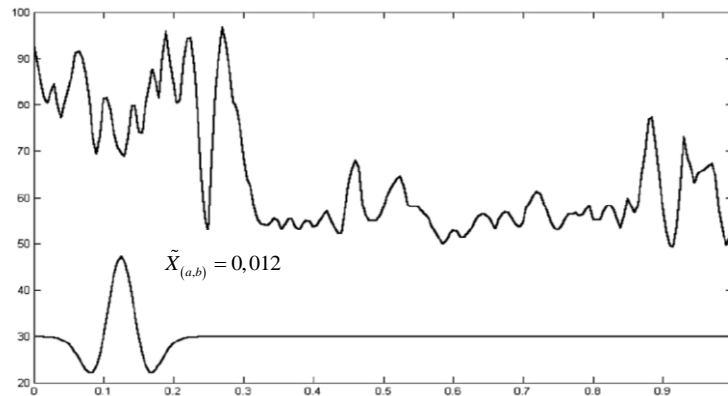


Figura 3.7 - Ondaleta de Chapéu Mexicano (abaixo) comparada com o sinal (acima) (adaptado de Protázio, 2002).

- 3) Translada-se a ondaleta para uma segunda localização b_1 e iniciam-se novamente os passos (1) e (2) dados acima com b_1 no lugar de b_0 . Repetir esse processo até que todo o sinal seja percorrido pela ondaleta de escala a_0 (Figura 3.8).

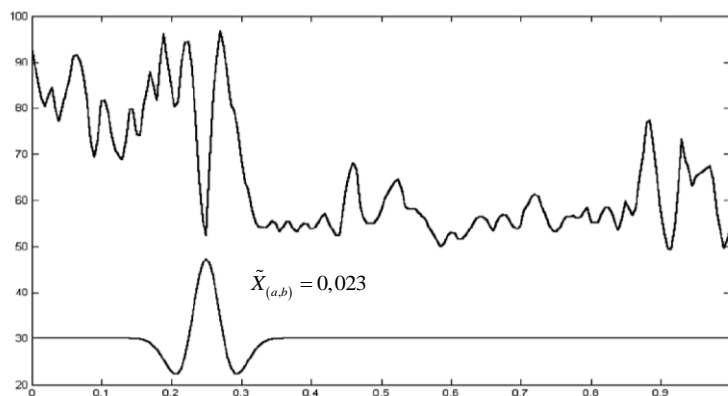


Figura 3.8 - Ondaleta de Chapéu Mexicano transladada efetuando comparação com outra parte do sinal (adaptado de Protázio, 2002).

- 4) Muda-se a escala da ondaleta de a_0 para outra escala a_1 e repete-se todo o processo de (1) a (3), conforme se observa na Figura 4.8.

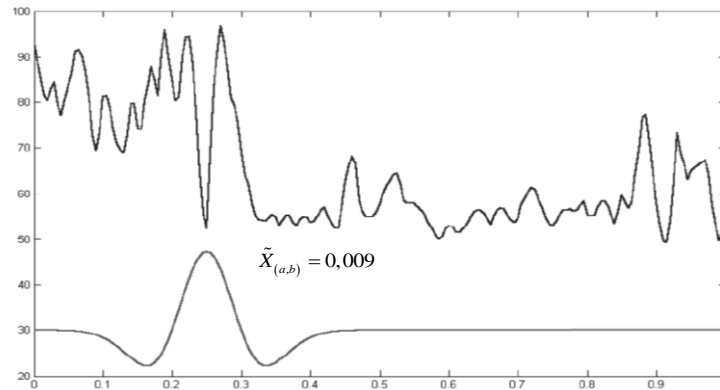


Figura 3.9 - Ondaleta de Chapéu Mexicano transladada e dilatada efetuando comparação com o sinal (adaptado de Protázio, 2002).

- 5) Repetem-se os processos de (1) a (4) em todo o sinal e para todas as escalas, resultando na Figura 4.10.

Todo esse processo explicitado acima é chamado, na literatura, de Processo de *Convolução* e pode ser observado, novamente, na Figura 4.11. Nesse tipo de análise é possível observar, com bastante clareza, a variabilidade temporal (ou espacial) do sinal estudado.

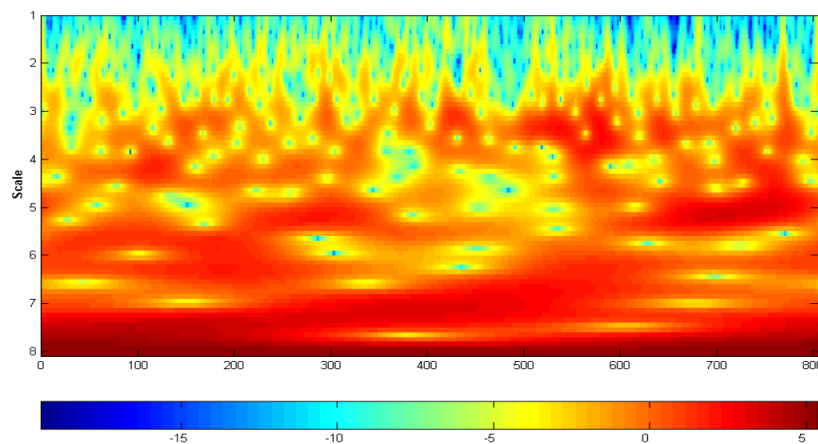


Figura 3.10 - Processo finalizado com os coeficientes $\tilde{X}_{(a,b)}$ produzidos em diferentes escalas a para diferentes pontos b do sinal (adaptado de Protázio, 2002).

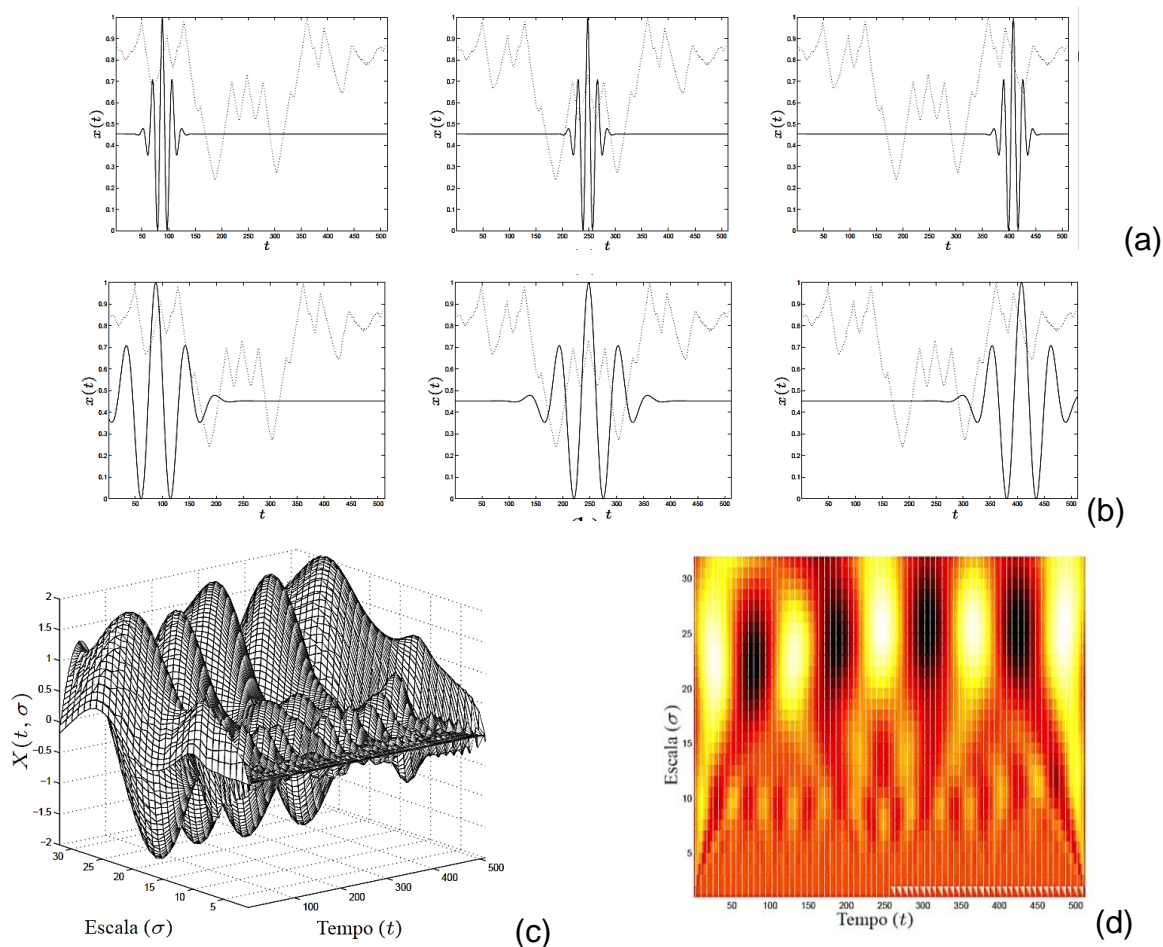


Figura 3.11 - Etapas da aplicação da TCO com bases de Morlet. (a) Etapa de decomposição com janelas com mesma largura para diferentes instantes t . (b) Etapa de decomposição com as janelas dilatadas para diferentes instantes t . (c) Espaço “tempo x escala” resultante da TCO. (d) Vista superior da TCO (adaptado de Loss, 2004).

3.10 Transformada Discreta de Ondaletas (TDO)

Quando os parâmetros a e b da transformada de Ondaleta $\tilde{X}_{(a,b)}$ assumem valores contínuos, tem-se a TCO (como mostrado na seção anterior). Para aplicações práticas, o parâmetro de escala a e o parâmetro de localização b precisam ser discretizados, gerando a transformada discreta de ondaleta (TDO).

Estas transformadas são obtidas mediante a escolha de valores discretos para os coeficientes de escala (a) e posição (b), geralmente através de séries diádicas (potências de dois), substituindo estes nas equações 4.18 e 4.19, respectivamente,

por 2^j e $k2^j$, onde j e k são os coeficientes de dilatação e translação. Isto resulta nas equações:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4.19)$$

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k) \quad (4.20)$$

A transformada discreta de ondaletas é uma elaborada sub-amostragem da transformada contínua ondaletas em escalas diádicas, Percival e Walden, 2000, dada pela eq. 4.20. A definição de espectro discreto de ondaletas é dada pela eq. 4.21.

$$D_{j,k} = \sum_t x(t) \psi_{j,k}(t) \quad (4.21)$$

$$P_{xx}(j,k) = |D_{j,k}|^2 \quad (4.22)$$

Porém, o número de níveis de transformações que podem ser calculados é limitado em função do número de pontos da série temporal. Diferentemente da transformada de Fourier, na transformada de ondaletas, os coeficientes remanescentes são relacionados com as frequências mais baixas, que não são desprezadas, incluindo o valor médio do sinal. Assim, a transformada discreta de ondaletas de uma série com 2^N elementos é calculada até um nível conveniente $J < N$ e as informações remanescentes correspondendo aos valores médios na escala 2^J são determinadas pela eq. 4.22.

$$C_j(t) = \sum_{k \in Z} C_{j,k} \phi_{j,k}(t) \quad (4.23)$$

A aproximação $C_j(t)$ tende à média do sinal para valores de J suficientemente grandes. Para valores de J pequenos, a aproximação será a média acrescida das flutuações das maiores escalas. A escolha de $J < N$ determina a frequência abaixo da qual não há mais interesse na análise.

O cálculo dos vetores de coeficientes de detalhes e aproximações é realizado através de um algoritmo piramidal, baseados em filtros simétricos de quadratura.

Com isso, o sinal original pode ser reconstruído somando-se a última aproximação, e todos os detalhes. Esses detalhes contêm a informação perdida entre duas aproximações sucessivas, Figura 4.12. Através das ondaletas contínuas é possível observar mais claramente as características dos sinais, porém, as ondaletas discretas necessitam de menor tempo de computação e consumo de memória, além de permitir o tratamento de sub-amostras do sinal.

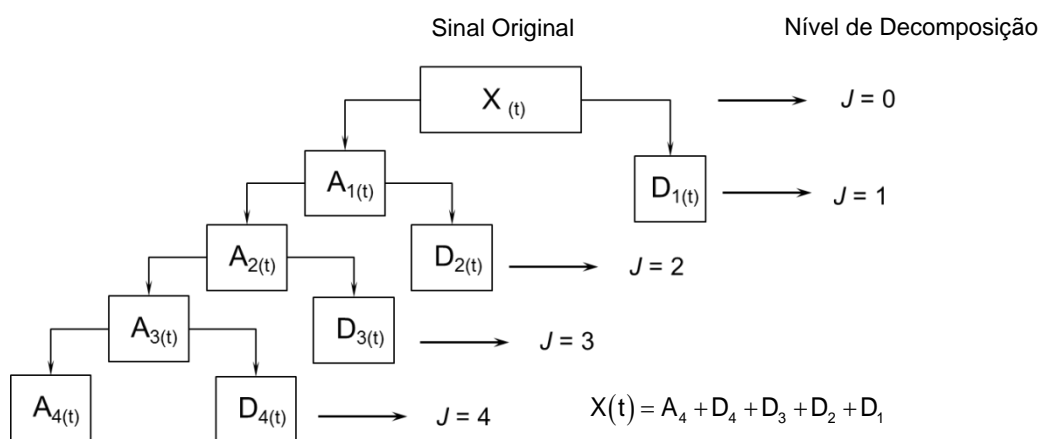


Figura 3.12 – Árvores de ondaletas de nível $j = 4$. Transformada discreta de ondaletas.

3.11 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 3.13 ilustra o comportamento do algoritmo piramidal para a transformada discreta de pacotes de ondaletas. Enquanto a transformada de ondaletas os detalhes d_j não são mais analisados, na transformada de pacotes de ondaletas, ao contrário, todos os vetores dos coeficientes detalhes de todos os níveis são também divididos em dois subconjuntos, cada um com metade do intervalo de frequência do conjunto original. A cada nível j correspondem a $m=2^j$ vetores de coeficientes $\{\tilde{X}_{(j,m,k)}, k=1\dots 2^{N-j}\}$ que irão gerar as reconstruções ou sínteses parciais $D_{j,m}$, $m=0\dots 2^j-1$, em que cada vetor $D_{j,m}$ corresponde as frequências no intervalo $[m2^N/2^{j+1}, (m+1)2^N/2^{j+1}]$. A transformada de pacotes de ondaletas permite, portanto, a análise do sinal por meio dos parâmetros tempo, escala e frequência, esta ultima indicada pelo índice de modulação m .

Cada transformada de pacote de ondaleta é associada com um nível j . Esse nível decompõe o intervalo de frequência do sinal original em 2^j intervalos de igual largura de banda. O sinal original pode ser reconstruído somando-se todas as reconstruções do nível j .

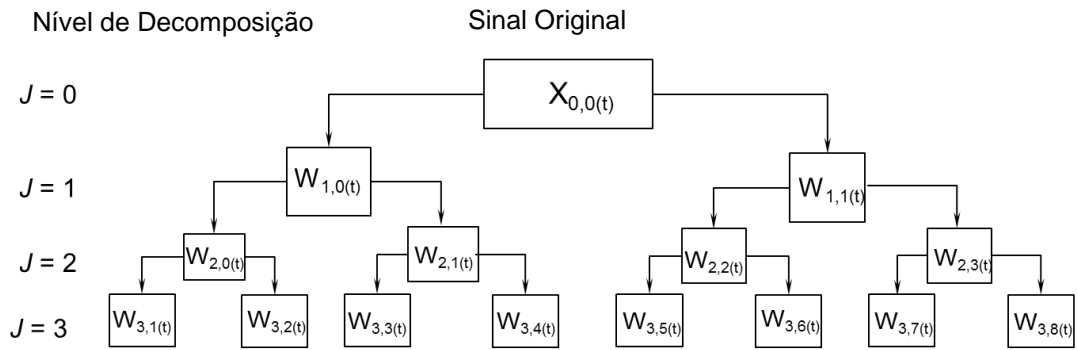


Figura 3.13 – Árvore de Decomposição da transformada de pacotes de ondaletas em nível 3.

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. 4.24.

$$\tilde{X}_{(j,m,k)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,m,k}(t) dt \quad (4.24)$$

E sua transformada inversa é determinada pela eq. 4.25.

$$x(t) = \sum_j \sum_m \sum_k \tilde{X}_{(j,m,k)} \psi_{(j,m,k)}(t) \quad (4.25)$$

A conservação da energia é representada pela eq. 4.26.

$$\sum |x(t)|^2 = \sum_j \sum_m \sum_k |\tilde{X}_{(j,m,k)}|^2 \quad (4.26)$$

Nas equações (4.23) e (4.24) acima o índice j será um valor fixo igual ao nível de decomposição da transformada de pacotes de ondaletas que está sendo utilizado.

A função original $x(t)$ pode também ser reconstruída para qualquer intervalo de frequência desejado, escolhendo-se j tal que o intervalo de frequência corresponda a $[m2^N / 2^{j+1}, (m+1)2^N / 2^{j+1}]$, segundo eq. 4.5.

$$D_{j,m}(t) = \sum_k \tilde{X}_{(j,m,k)} \psi_{j,m,k}(t) \quad (4.25)$$

A Figura 3.14 mostra as primeiras oito funções de pacotes de ondaletas obtidos das funções originais de Haar e Db2.

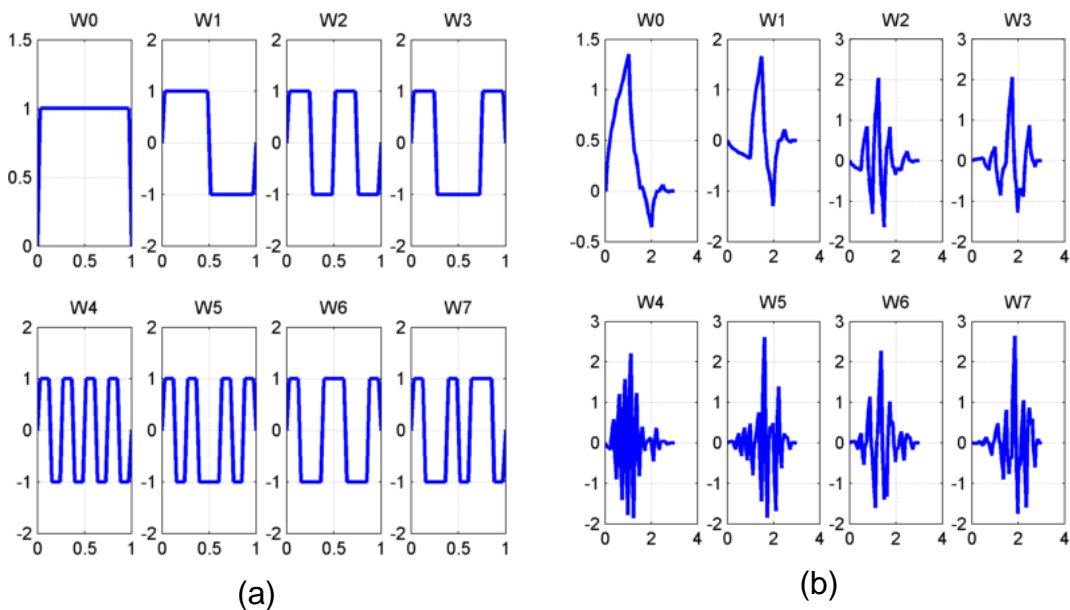


Figura 3.14 - Primeiras oito funções de pacotes de ondaletas (a) Funções de Haar ou Db 1. (b) Funções de Db 2. (MatLab, 2012).

O sinal original será a soma de todas as reconstruções $D_{j,m}$ para um valor j escolhido, a soma de todas as reconstruções correspondem á árvore admissível. Figura 3.13, conforme eq. 4.26.

$$x(t) = \sum_{m=0}^7 D_{3,m} \quad (4.26)$$

Também existem decomposições diádicas disjuntas, que são empregadas quando se quer analisar uma faixa de frequência em especial do total do sinal. Porém, o estudo destas decomposições foge ao escopo do presente trabalho.

4 SEÇÃO DE TESTES E INSTRUMENTAÇÃO

4.1 Técnica Experimental

Para um estudo quantitativo das características do escoamento através de um canal composto com fenda estreita, foi empregado o canal aerodinâmico ilustrado nas Figuras 5.1(a)(b) e 5.2. Neste canal aerodinâmico são realizadas medições de velocidade média e de flutuações de velocidade do ar.

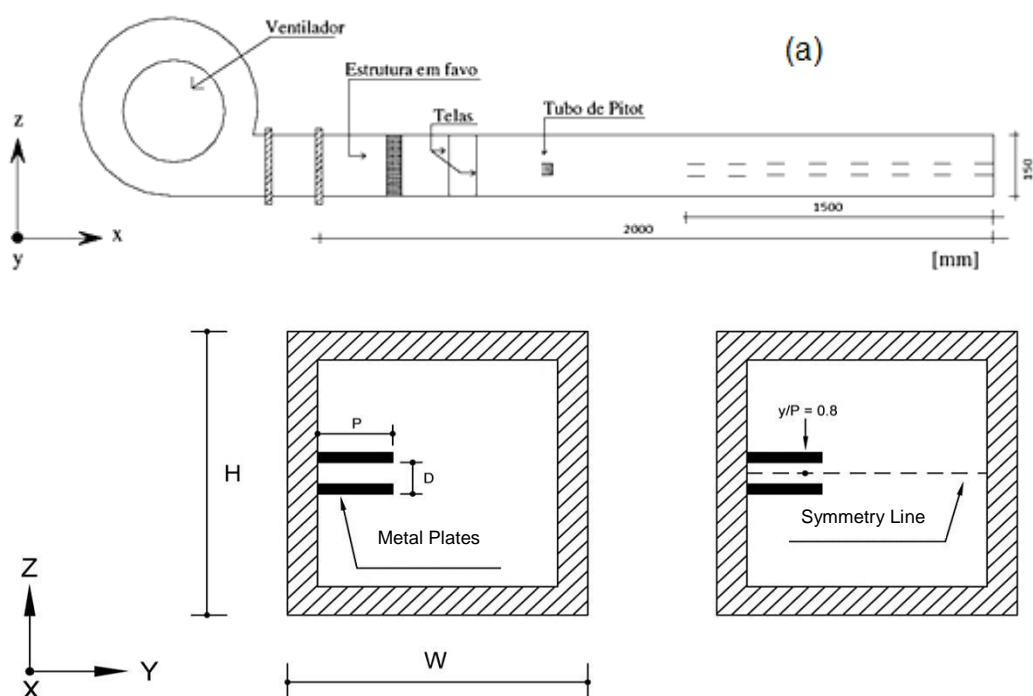


Figura 4.1 - Visão esquemática da seção de testes: (a) configuração do túnel de vento e (b) visão frontal da seção de testes e localização da linha de medições

O canal, de circuito aberto, possui uma seção de testes retangular com dimensões de 200 mm de largura, (W), por 150 de altura, (H), confeccionado de placas de acrílico transparente. O ar é dirigido por um ventilador centrífugo, passando por homogeneizadores tipo colméia e tela. A montante desta, a 150 mm de distância, está fixado um tubo de Pitot. O tubo de Pitot, com o auxílio de um medidor de pressão eletrônico, permite a medição da velocidade de referência do escoamento não perturbado. Os experimentos são realizados em temperatura ambiente. A jusante da seção de testes, fora do canal aerodinâmico, é montado um

sistema de posicionamento tridimensional, que permite um alinhamento milimétrico do suporte da sonda.

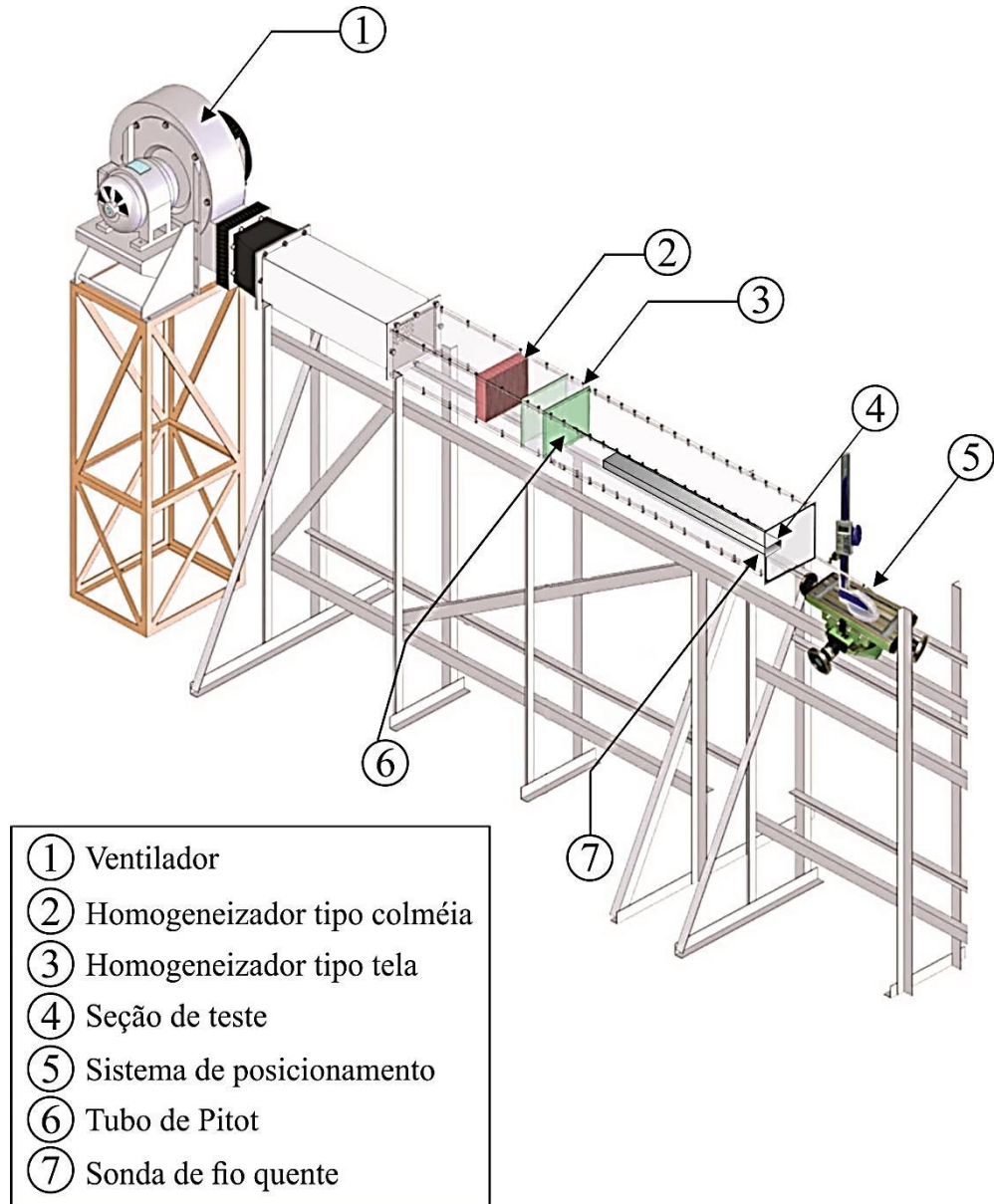


Figura 4.2 - Ilustrações esquemáticas: (a) canal aerodinâmico. (Adaptado De Paula, 2012).

A velocidade do ar no interior do canal aerodinâmico é controlada por intermédio de um inversor de frequência, o qual permite variar a rotação do motor elétrico do ventilador centrifugo. A intensidade turbulenta medida no canal livre foi de 3,7 %.

Para o canal livre (sem o subcanal), a velocidade média do ar foi de $\bar{U} = 8,04 \text{ m/s}$, determinada pela eq. 5.1.

$$\bar{U} = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (5.1)$$

Foram avaliadas 12 tipos de seções de testes. O número de Reynolds das diferentes seções pode ser avaliado da maneira mais usual em se tratando de escoamentos em canais compostos, é a composição do número de Reynolds por meio da velocidade média do escoamento, (\bar{U}), diâmetro-hidráulico do canal, (D_h), e a viscosidade cinemática do fluido, (ν), eq. (5.2), onde os resultados estão expostos na tabela (5.1).

$$R_e = \frac{\bar{U} \cdot D_h}{\nu} \quad (5.2)$$

Dentro do canal, na parede lateral, foram montadas duas placas finas paralelas de espessura, $e = 1,0 \text{ mm}$, com profundidade “P”, distância entre elas “D” e comprimento “L”. Estas dimensões podiam ser livremente alteradas, no entanto, com base em algumas análises preliminares e nos trabalhos de Meyer e Rehme, 1994 e 1995 e Goulart 2013, foram escolhidos alguns valores adimensionais para P/D. Sendo este último escolhido de forma a não criar mais um conjunto de variáveis ao problema. Foram, então, avaliadas três diferentes relações P/D, sendo esta relação o principal parâmetro na investigação de estruturas de grande escala em canais compostos. Os valores determinados para P, D e os demais valores adimensionais estão descritos na Tabela 1, bem como as definições dos nomes para os diferentes canais.

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

Seção de teste	P	D	L	P/D	L/P	$L/\sqrt{P.D}$	L/D	L/D _h	Re
S1	22	2	250	11	11,3	37,69	125	1,62	7,98x10 ⁴
S2	22	2	500	11	22,7	75,38	250	3,25	7,98x10 ⁴
S3	22	2	1000	11	45,4	150,76	500	6,50	7,98x10 ⁴
S4	22	2	1500	11	68,1	226,13	750	9,75	7,98x10 ⁴
S5	20	4	250	5	12,5	27,95	62,5	1,62	7,98x10 ⁴
S6	20	4	500	5	25	55,90	125	3,25	7,98x10 ⁴
S7	20	4	1000	5	50	111,80	250	6,50	7,98x10 ⁴
S8	20	4	1500	5	75	167,71	375	9,75	7,98x10 ⁴
S9	20	6	250	3,33	12,5	22,82	41,66	1,62	7,98x10 ⁴
S10	20	6	500	3,33	25	45,64	83,33	3,25	7,98x10 ⁴
S11	20	6	1000	3,33	50	91,29	166,66	6,50	7,98x10 ⁴
S12	20	6	1500	3,33	75	136,93	250	9,75	7,98x10 ⁴

4.2 Metodologia de Ensaio

As medições foram realizadas a pressão atmosférica e a uma temperatura ambiente, considerada, de 25 °C. Os procedimentos de medições se davam após o ventilador entrar em regime estacionário. A velocidade de referência era avaliada por meio de um tubo de Pitot.

A sonda de fio quente foi localizada entre as placas, na posição $y/P= 1,10$ para as seções com relação de $P/D= 11$ e $y/P= 0,80$ para as relações de $P/D= 5$ e $3,33$. Onde todas as medições envolvendo velocidade média e flutuações de velocidade se deram 20 mm a montante da saída da seção de teste, no plano de simetria do canal, Figura 5.1 (b).

A cada nova medição o procedimento de calibração da sonda de fio quente era novamente realizado, obtendo novos coeficientes de calibração.

4.3 Anemometria De Fio-Quente

A anemometria de fio-quente (AFQ) constitui-se em um método de investigação pouco intrusivo devido às pequenas dimensões do elemento sensível. São essas pequenas dimensões que, combinadas a um circuito eletrônico de controle empresta a técnica elevadas frequências de resposta, podendo atingir a ordem de centenas de kHz.

Basicamente, um anemômetro de fio-quente consiste de um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Este filamento fica conectado a um circuito eletrônico que é capaz de monitorar a sua variação de resistência elétrica pela ação de escoamento.

O princípio de funcionamento de AFQ é baseado na transferência de calor por convecção entre um fio aquecido e o fluido escoando ao seu redor. O instrumento é composto basicamente por um pequeno sensor, que realiza a avaliação pontual do escoamento, e por um circuito controlador.

O sensor de fio-quente é constituído de um corpo de material cerâmico, onde estão fixas duas agulhas. O elemento sensível é em geral um fio de tungstênio de 5 μm de diâmetro e 1,25 mm de comprimento, soldado a extremidade de cada agulha, Figura 4.3. Existem muitas variedades de sensores dedicados a diferentes aplicações; eles divergem basicamente pelo número de elementos sensíveis, pela posição das agulhas, e pelo tipo de material do fio ou tipo de recobrimento.

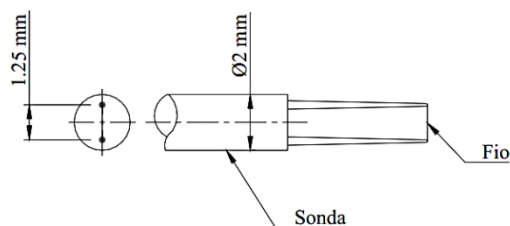


Figura 4.3 - Detalhe da sonda de anemometria de fio quente, Barcellos, (2001).

O anemômetro de fio-quente a temperatura constante (CTA) consiste de uma ponte de wheaststone e um servo amplificador, onde a sonda é o braço ativo desta ponte, Figura 4.4. A sonda é mantida a temperatura constante e o escoamento tende a resfria-la, fazendo com que a resistência ôhmica caia, desbalanceando a ponte, a

qual é alimentada pelo servo amplificador que tem a de restabelecer a resistência original da sonda por acréscimo ou redução na tensão de operação da ponte. Logo, a velocidade do fluido é determinada pela variação na transferência de calor entre o fio da sonda e o escoamento, Möller, 2003.

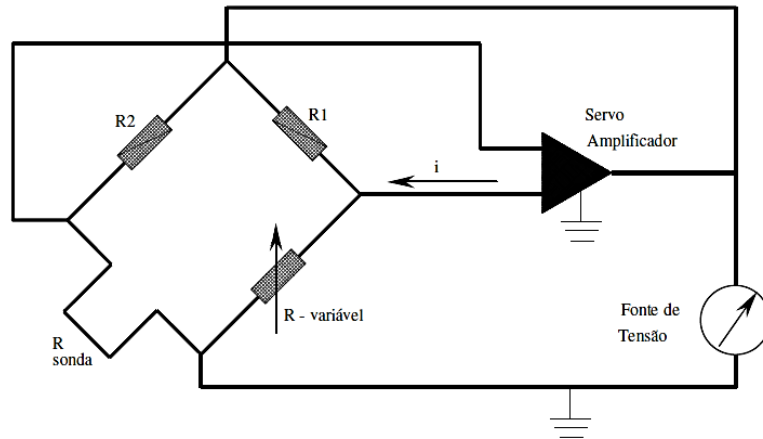


Figura 4.4 - Circuito de medição em anemometria de fio quente, Dantec, (1992).

A determinação das Velocidades Médias com o Anemômetro de Fio Quente - Sonda reta de Fio Simples, neste trabalho foi utilizado o método de Hooper, 1980, que tem como base a formulação proposta por Collins e Williams, 1959, equação (5.3).

$$E^2 - E_0^2 = BU^n \quad (5.3)$$

Sendo que E é tensão medida pela sonda, E₀ é a Tensão a velocidade zero, U é a velocidade e B, n são coeficientes obtidos a partir da calibração. A calibração típica do sensor pode ser vista no apêndice A.

4.4 Aquisição e Análise de Dados

A aquisição dos sinais de flutuação de velocidade foi feita utilizando uma placa conversora analógica digital, A/D, 6023E com 12 bits da marca National Instruments. As frequências de aquisição dos dados, o tempo de duração dos registros e o filtro passa baixa utilizado, foram estabelecidos em função de testes realizados em medições prévias. Sendo respectivamente de 3,0 kHz, um número de amostragem de 131.072 (2¹⁷), levando a um tempo de registro de 43,69 s para as seções de P/D= 11 e 3,333, já para as seções de P/D=5 foi de 65.536 (2¹⁶),

amostragens com um tempo de 32,84 s e o filtro passa baixa de 1,0 kHz. Esses valores de frequência de aquisição, tempo de amostragem e filtro passa baixa, foram utilizados nas medições envolvendo anemometria de fio quente. Sendo assim, buscou-se, uniformidade e repetibilidade dos resultados, bem como a melhor definição das curvas de funções estatísticas obtidas, de modo a permitir a interpretação física dos resultados.

A faixa de variação do sinal de entrada foi previamente analisada para uma seleção adequada da faixa de ganho do conversor que visava, por um lado não perder informações devido a sobre ou sub-tensões e, por outro, aperfeiçoar o uso dos níveis do conversor disponíveis. O resultado era armazenado em meio magnético para posterior conversão ao domínio da grandeza física (velocidade) com o uso da curva de calibração correspondente, previamente obtida.

5 RESULTADOS

5.1 Análises via Densidade Espectral de Potência (PSD)

O alto fluxo cisalhante, que ocorre em canais compostos, dá origem a um forte campo de vorticidade entre a fenda e o canal principal, Möller, 1991. Essa singularidade introduz no escoamento perturbações, que dependendo do estado do escoamento, vórtices, que viajam ao longo da direção axial, podem aparecer. Estruturas de grande escala são conhecidas por seus padrões quase-periódicos no escoamento. Tal comportamento periódico pode ser visto através da análise espectral das flutuações de velocidade.

A Figura 6.1 mostra as funções de densidade espectral de potência para a componente da velocidade axial das seções de teste S1, S2, S3 e S4, conforme Tabela 1. O sinal de flutuação de velocidade foi captado em $y/P = 1,10$. Esta posição, no canal principal, foi determinada devido à dificuldade de introduzir a sonda de fio quente na fenda estreita de 2 mm. As funções espectrais foram computadas usando 128 blocos de 1024 elementos, dando origem a uma largura de banda de 2,93 Hz e um erro estatístico de 8,83%.

A Figura 6.1 (a), (b), (c) e (d), apresenta uma boa visão sobre a sensibilidade das características dinâmicas do escoamento turbulento em relação ao aumento do comprimento da seção de testes. Pode se ver que a função espectral não mostra picos para a seção mais curta, (S1 - 250 mm). Por outro lado, com o aumento da seção observa se que um pico único começa a aparecer em 40 Hz, mantendo-se constante durante todo o tempo. Em relação à largura de banda, que parece aumentar à medida que se aumenta seção de teste, atingindo seus valores máximos de energia para a maior seção de teste, S4 - 1500 mm.

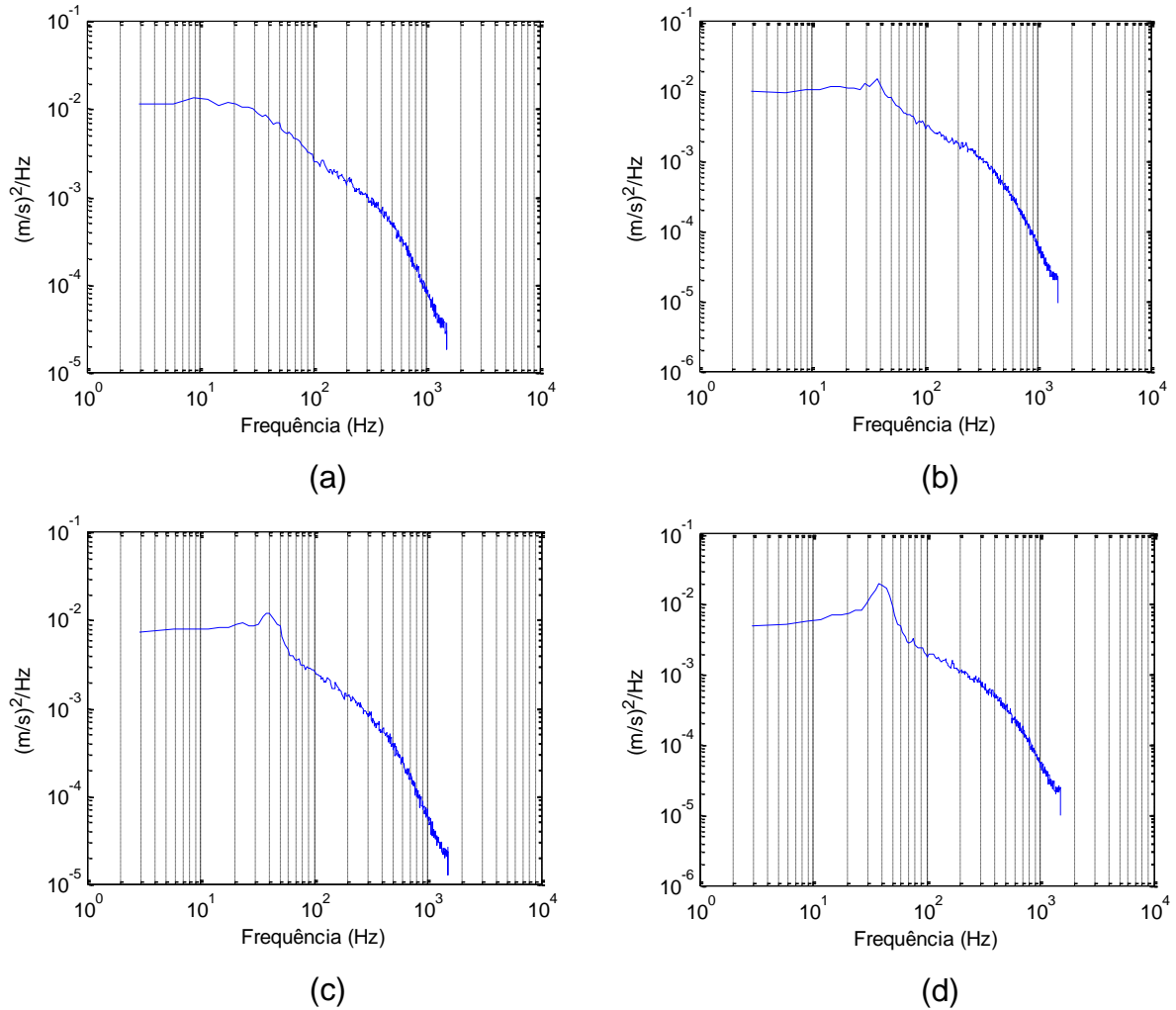


Figura 5.1 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D=11$. a) Seção S1, $L=250$ mm, b) Seção S2, $L=500$ mm, c) Seção S3, $L=1000$ mm, d) Seção S4, $L=1500$ mm.

As funções de densidade espectral de potência também foram aplicadas para as seções de teste S5, S6, S7 e S8. Como a largura da fenda dessas seções é de 4 mm, foi possível adquirir os sinais de velocidades na posição adimensional $y/P=0,8$. As semelhanças entre o processo anterior pode ser observado: a ausência de padrões periódicos da velocidade para a seção mais curta e um único pico no espectro começa a aparecer nas seções seguintes. Os resultados revelam que a largura da fenda e o comprimento do canal parecem produzir efeitos diferentes no comportamento dinâmico da velocidade. A frequência não permaneceu constante para os demais comprimentos das seções. Pode se ver um deslocamento na direção da maior frequência, aproximadamente, a 50 Hz. Além disso, picos largos

são apresentados na Figura 6.2 (b) e (c), o que sugere que os vórtices de diferentes escalas (tempo, velocidade e comprimento) estão dominando o escoamento (Meyer e Rehme, 1995). Tal amplitude do pico no espectro pode indicar um descompasso dos fenômenos, e esse comportamento parece ser governado pela largura de fenda muito mais do que o comprimento do canal.

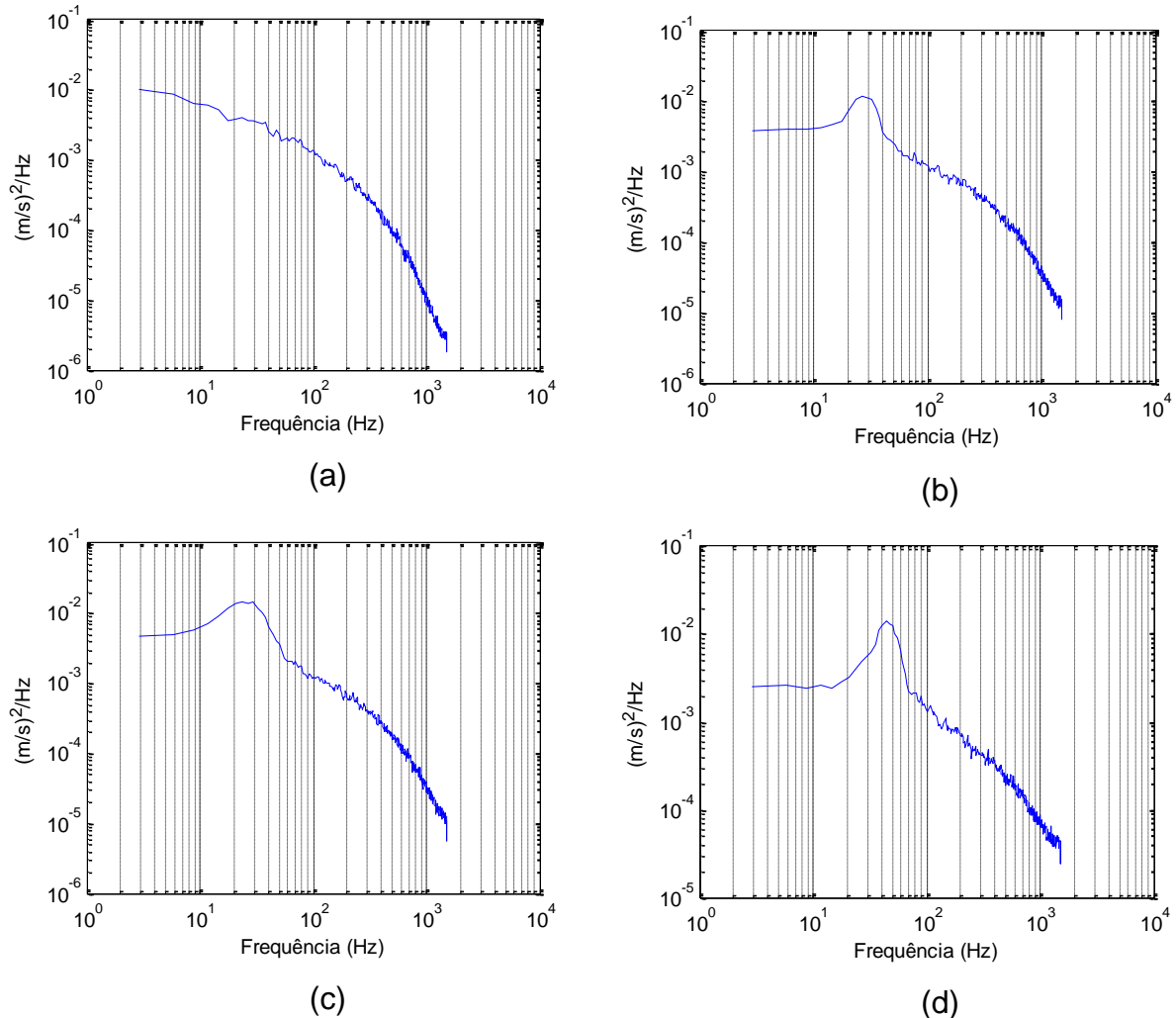
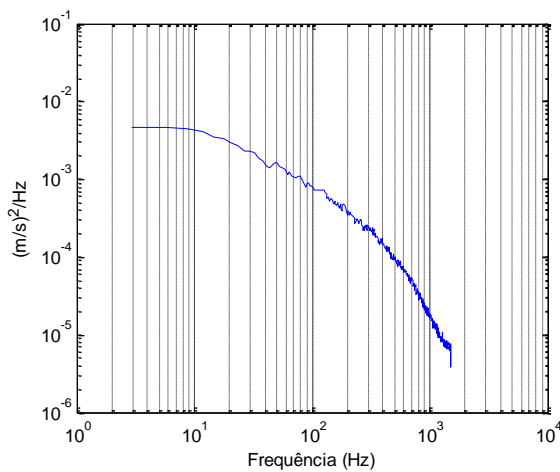


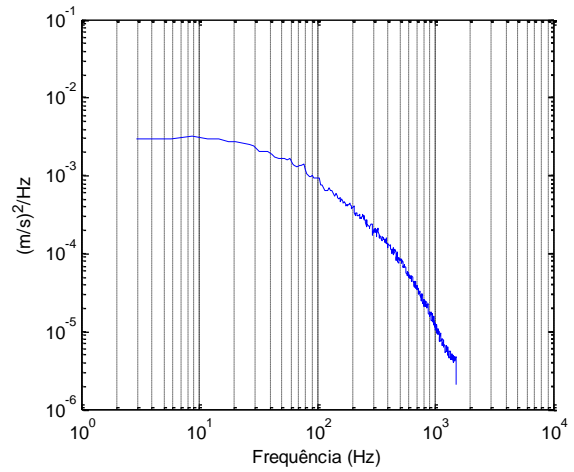
Figura 5.2 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D = 5$. a) Seção S5, $L=250$ mm, b) Seção S6, $L=500$ mm, c) Seção S7, $L=1000$ mm, d) Seção S8, $L=1500$ mm.

A Figura 6.3, apresenta a análise feita por PSD para a relação $P/D = 3,33$. Nessas seções a largura da fenda é maior do que nas demais, 6 mm, e o papel desempenhado por esta dimensão no aparecimento de estruturas, fica ainda mais evidente. Pode se observar que a análise de Fourier não foi capaz de mostrar

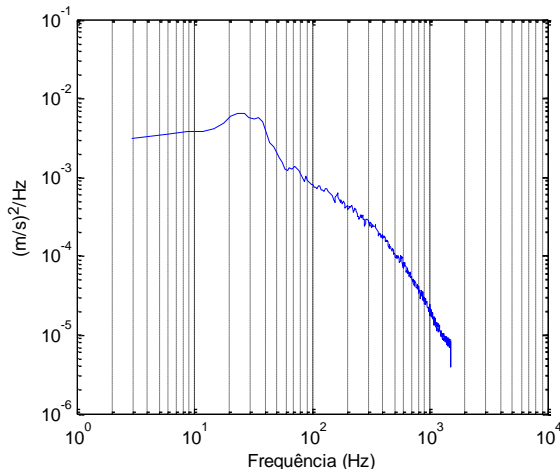
qualquer traço de padrões periódicos no escoamento para seção de teste S9- L=500 mm. Este fato pode sugerir uma relação entre o comprimento da seção e a largura da fenda, L/D , por exemplo. Somente depois de atingir certa distância adimensional, L/D , as estruturas são suficientemente desenvolvidas permitindo serem medidas. Nas Figuras 6.3 (c) e (d) o pico no espectro são muito largos e a frequência fundamental é de aproximadamente de 20 Hz.



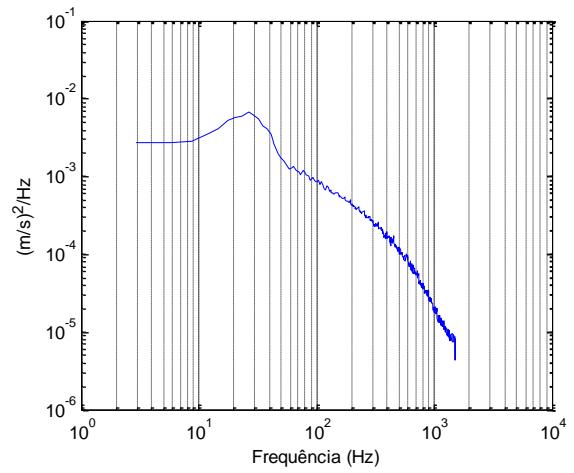
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.3 - Espectros de Potência das seções com relação de $P/D=3.33$. a) Seção S9, L=250 mm, b) Seção S10, L=500 mm, c) Seção S11, L=1000 mm, d) Seção S12, L=1500 mm.

5.2 Número de Strouhal

Os resultados anteriores mostraram que as configurações estudadas dão origem as estruturas coerentes de grandes escalas. Essas estruturas possuem como características principais uma frequência fundamental e uma velocidade característica.

O número de Strouhal é um número adimensional importante para análise de escoamentos, ele caracteriza a frequência adimensional do fenômeno. A formação de vórtices produz forças, sobre a estrutura do canal, de natureza periódica. O conhecimento da intensidade destas forças e a sua frequência de oscilação são fundamentais para projetos de estruturas expostas à ação do vento, por exemplo.

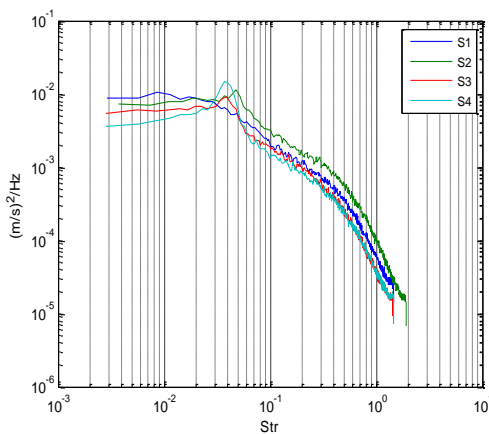
Meyer e Rehme, (1994 e 1995), realizaram estudos através da análise espectral da velocidade em vários tipos de canais compostos. O objetivo dos autores foi procurar compreender os principais mecanismos por trás da formação de estruturas de grande escala, além disso, os autores também tentaram correlacionar à frequência característica, a velocidade do escoamento e uma escala de comprimento do canal. De acordo com os resultados de Meyer um número de Strouhal poderia ser desenvolvido usando como escala de comprimento a raiz quadrada do produto entre a profundidade, P , e a largura da fenda, D . E como escala de velocidade, a velocidade axial da borda pode ser uma alternativa, U_e . Dessa forma o número de Strouhal é dado pela eq. 6.1. A velocidade da borda U_e , é a velocidade que ocorre em $y/P = 1$. Apesar da boa concordância entre a correlação e os valores experimentais, foram detectadas algumas falhas. A adimensionalização das frequências, através das referidas escalas, se mostrou sensível a forma do canal os autores também relatam que a correlação não obteve bons resultados para fendas profundas onde $P/D \geq 7$, pois a frequência associada aos fenômenos foi o dobro do que a prevista pela correlação.

No presente estudo espera se que o número de Strouhal esteja de acordo com aquele encontrado por Meyer e Rehme, 1995. Após avaliação de vários canais os autores chegaram a valores de Str de $0,08 \pm 0,01$ para este tipo de canal.

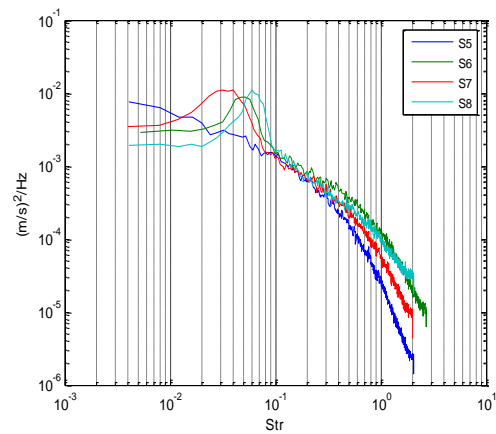
$$Str = \frac{f\sqrt{PD}}{U_e} \quad (6.1)$$

A análise das flutuações de velocidade no espaço de Fourier é apresentada na Figura 6.4 (a), para as seções com relação de $P/D=11$, na Figura 6.4 (b) para as seções de relação de $P/D=5$ e na Figura 6.4 (c) para as seções com relação de $P/D=3.33$. A frequência é apresentada de forma adimensional em função do número de Strouhal, conforme eq. (6.1).

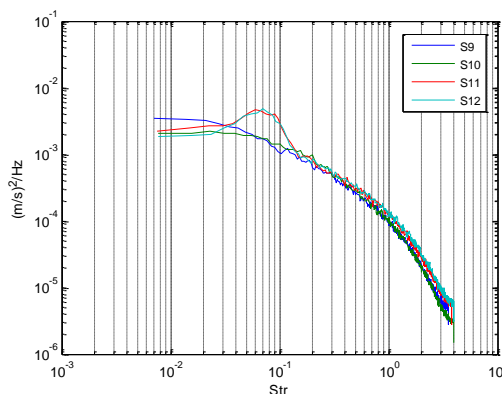
De maneira geral na seção de menor comprimento não foram encontrados indícios de estruturas coerentes, os auto espectros de flutuação de velocidade mostram o deslocamento das estruturas das seções de L menor para as maiores, variando o número de Strouhal para as seções de $P/D=5$, entre 0,04 e 0,06. Para as seções de $P/D=11$ o número de Strouhal se apresentou menor com uma variação de 0,03 a 0,05, o maior valor encontrado foi de 0,07 na seção S12 para relação $P/D=3.33$.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 - Densidades auto espectrais das componentes axial de flutuação de velocidade para as seções de testes adimensionalizadas pelo número de Strouhal.

A Figura 5.5 mostra a variação do número de Strouhal em relação às diferentes medidas adimensionais de comprimento. Quatro diferentes correlações com o comprimento, L , foram avaliadas, L/P , L/D , L/D_h e $L/\sqrt{P.D}$. A fim de avaliar um comprimento adimensional em que sinais de periodicidade se apresentam no escoamento.

A correlação que é possível visualizar um valor compatível para todas as seções de teste foi a de $L/\sqrt{P.D}$, Figura 6.5(d). A correlação L/D_h é interessante para avaliar um escoamento desenvolvido. Observa-se que o pico no espectro só aparece para uma relação de $L/\sqrt{P.D} \geq 56$, pode-se dizer que abaixo desse valor não existe o aparecimento de estruturas de grande escala.

Esse comportamento parece ser típico para um problema ainda em desenvolvimento, esperado que para canais muito maiores, onde o escoamento esteja desenvolvido, o número de Strouhal não varie mais, mas sim, se aproxima assintoticamente a certo valor tal como mostrado em Meyer e Rehme, 1994 e 1995. Pode-se notar que principalmente na seção S12 o número de Strouhal se apresenta próximo ao encontrado pelos autores. Esta pequena diferença pode ser atribuída ao fato de que o escoamento não está plenamente desenvolvido na saída do canal estudado, enquanto na seção utilizada por Meyer e Rehme, que tinha 7 m de comprimento, o escoamento estava completamente desenvolvido.

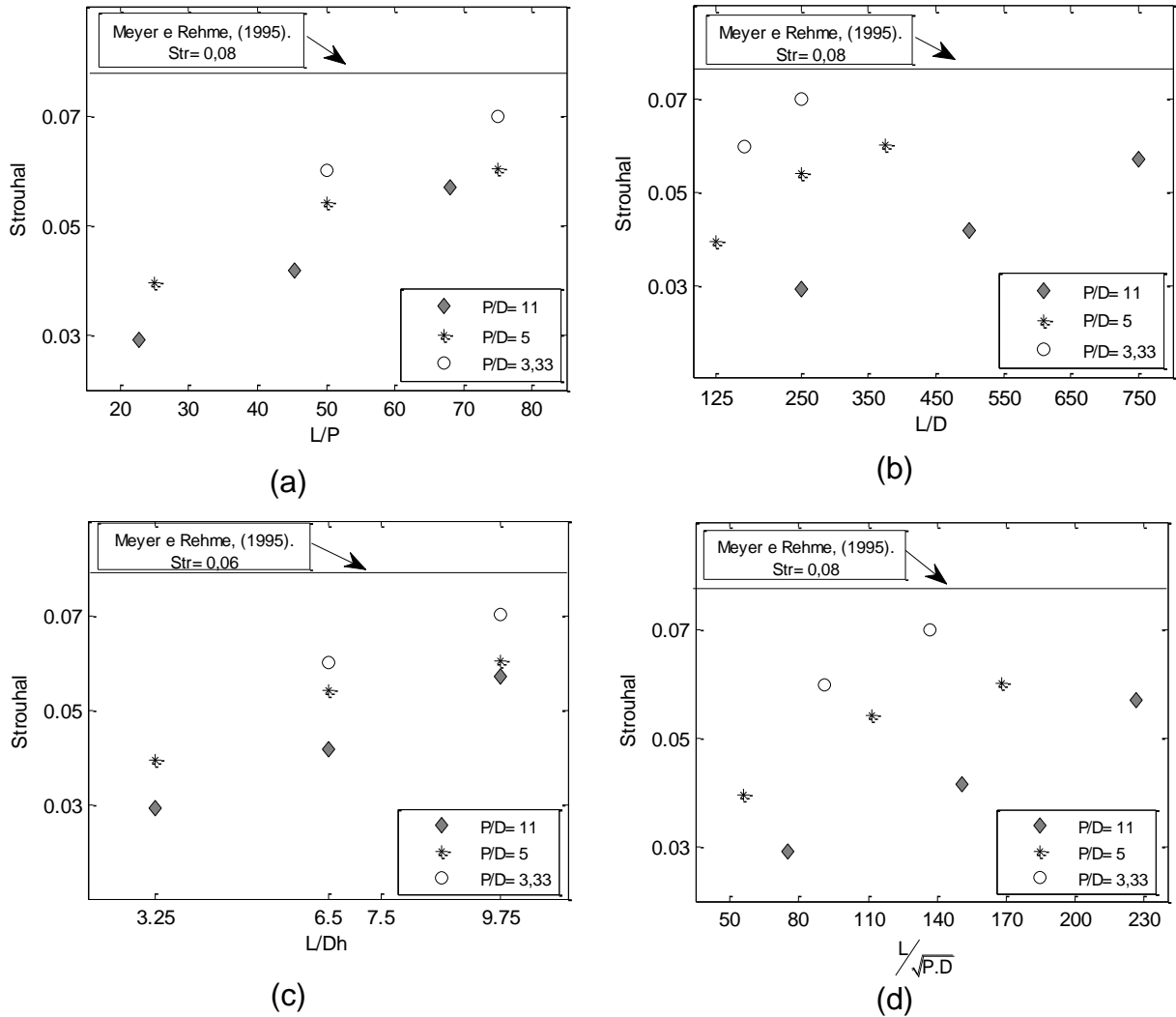


Figura 5.5 - Número de Strouhal x correlações de L.

5.3 Análise via Transformada Contínua de Ondaletas

Com o objetivo de analisar as características das flutuações de velocidade, foram gerados espectrogramas para os sinais correspondentes as seções de testes, tabela 1. Os espectrogramas foram gerados através da transformada contínua de ondaletas utilizando a ondaleta de Morlet (morl), onde mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente. Os gráficos dos espectrogramas são apresentados na forma tridimensional, onde os eixos da base representam o tempo e a frequência e as elevações, a energia contínua no sinal. Essa representação permite uma visão

global do comportamento dos sinais, contudo, dificulta a identificação das coordenadas associadas às elevações.

Os espectrogramas mostrados na seção 6.3, foram gerados para uma faixa de frequência de interesse, de 15 a 80 Hz, com escalas distribuídas a intervalos correspondentes a aproximadamente 2,93 Hz.

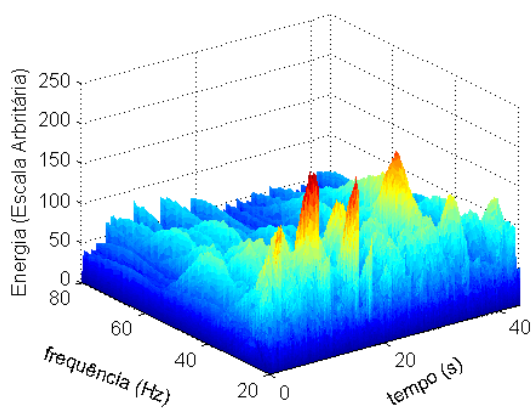
A Figura 6.6 mostra picos de energia para as seções com relação $P/D= 11$, (S1, S2, S3 e S4). Os resultados apresentados mostraram a distribuição energética e uma grande banda de frequência, entre 20 e 60 Hz, onde observam-se picos no tempo de aproximadamente 15 s e outro no tempo de 30 s.

A Figura 6.7 apresenta os espectros contínuos de ondaletas para as seções S5, S6, S7 e S8, onde se observa o aparecimento de estruturas coerentes em uma banda de frequência entre 20 e 50 Hz. Nota-se que na seção S5, Figura 6.7 (a), um nascimento pequeno de frequências de baixa energia, não encontradas pela análise de PSD.

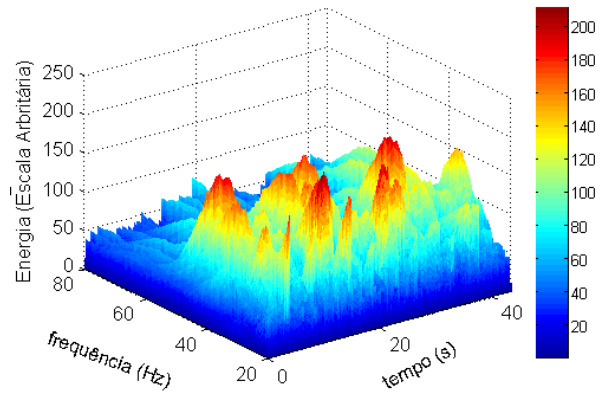
Observa-se que à medida que o comprimento do canal aumenta as frequências ligadas ao escoamento, que aparecem nos espectrogramas se apresentam com maior energia. Na seção S6 os picos de frequência de maior energia se localizam no tempo aproximadamente de 12 s e na frequência de 20 Hz, Figura 6.7 (b).

As maiores frequências predominantes no escoamento apareceram na seção S7, Figura 6.7 (c), onde as estruturas apareceram em uma larga faixa de frequência quando comparadas as demais seções, enquanto a seção S12, Figura 6.7 (d), as estruturas mantiveram-se concentradas em uma banda de frequência entre 30 e 50 Hz. Já para as seções de $P/D= 3,33$, os resultados são apresentados na Figura 6.8. Onde a análise nos mostra que um pico em aproximadamente 20 Hz no tempo de 20 s, começa a se manifestar nas seções de menor comprimento e se mantém nessa banda, até as seções maiores, Figura 6.8 (d).

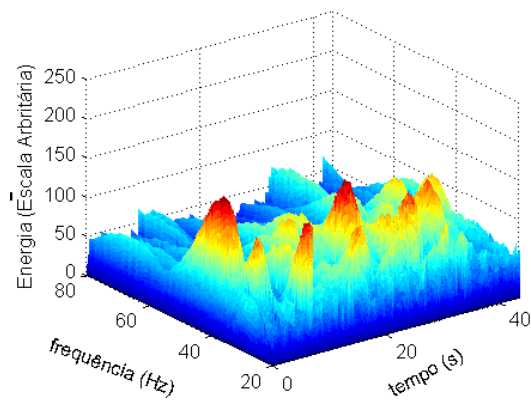
Os resultados mostram que existe uma distribuição da energia em diferentes bandas de frequência, que através da análise de Fourier é incapaz de detectar picos grandes como os apresentados nos espectrogramas.



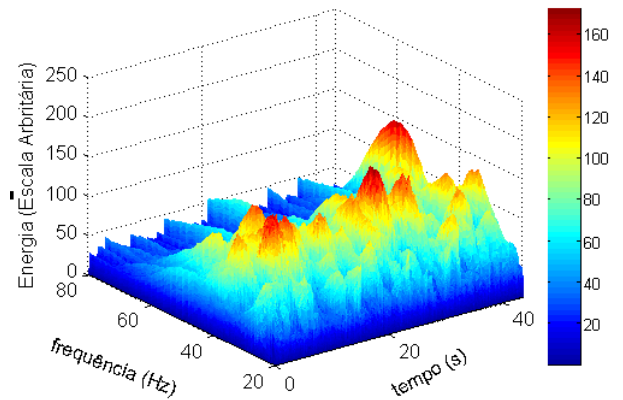
(a)



(b)

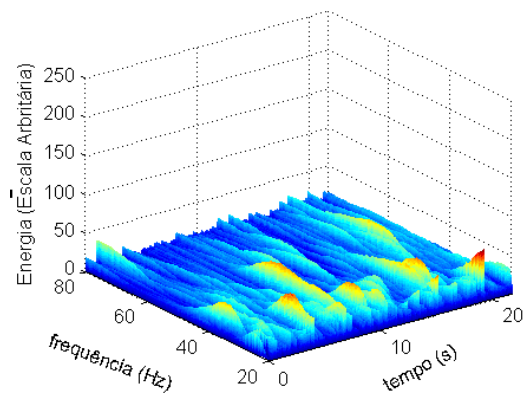


(c)

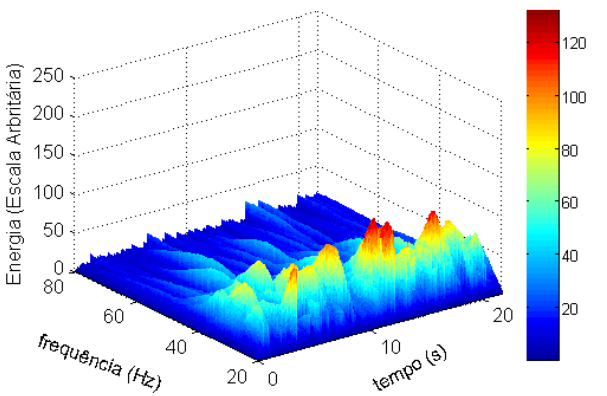


(d)

Figura 5.6 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=11$. a) $L=250$ mm, b) $L=500$ mm, c) $L=1000$ mm, d), $L=1500$ mm.



(a)



(b)

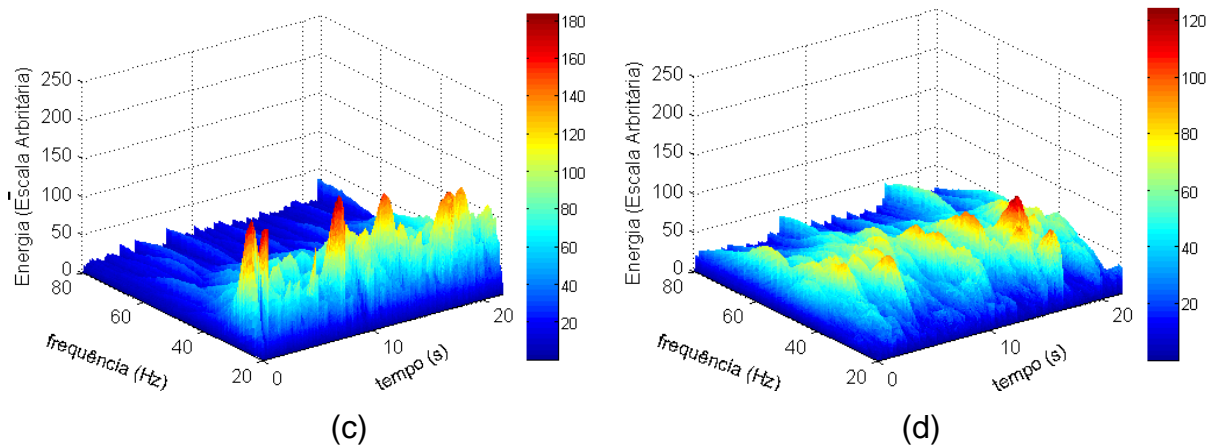


Figura 5.7 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 5$. a) $L=250$ mm, b) $L=500$ mm, c) $L=1000$ mm, d), $L=1500$ mm.

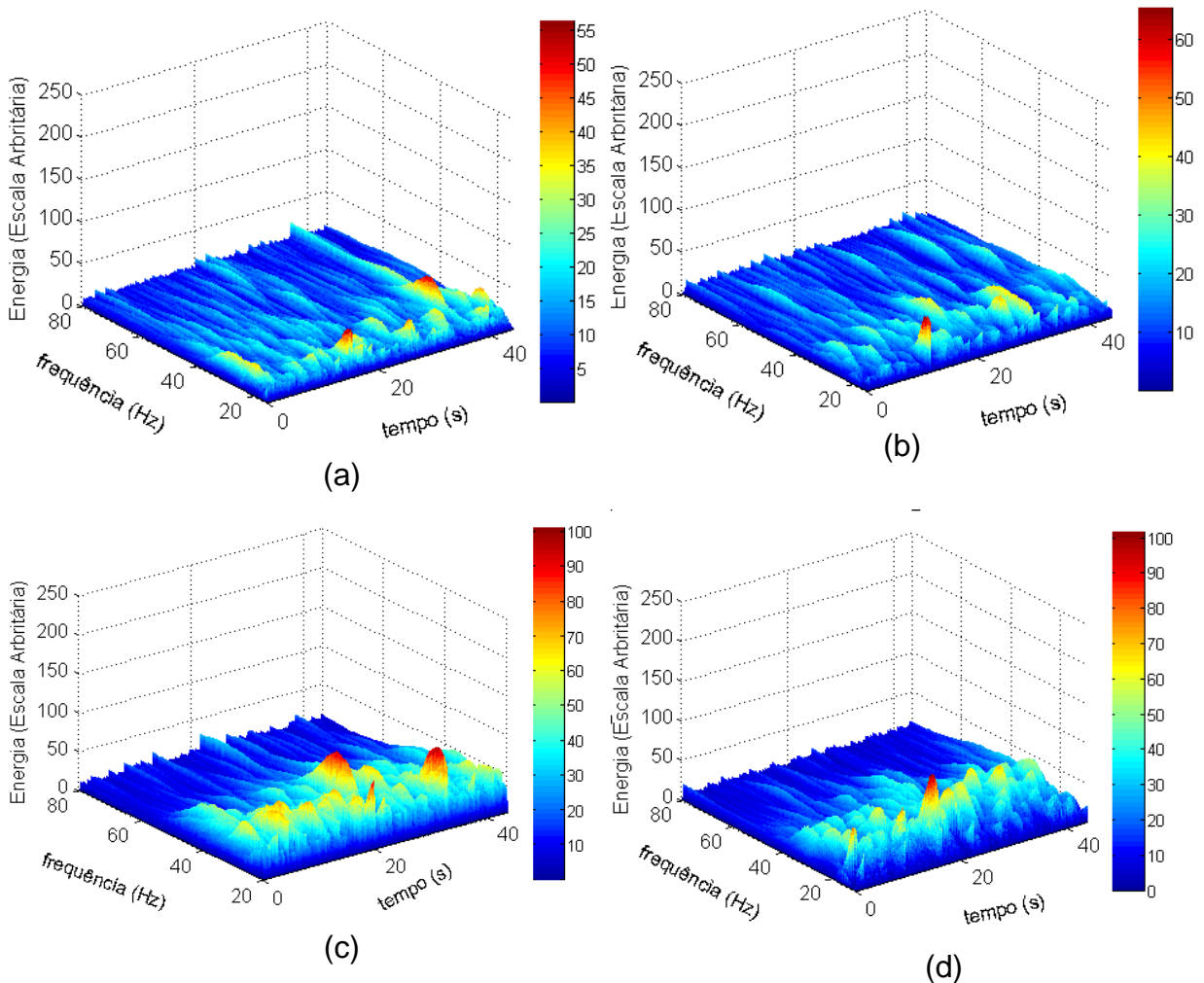


Figura 5.8 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 3.33$. a) $L=250$ mm, b) $L=500$ mm, c) $L=1000$ mm, d) $L=1500$ mm.

5.4 Fator e Energia de Intermitência do Sinal Turbulento

O fenômeno de intermitência da turbulência está relacionado com a alternância das estruturas turbulentas no escoamento. Qualitativamente, intermitência refere-se às flutuações, temporalmente irregulares não periódicas entre dois estados polares durante um período definido de tempo, Salmond, 2005. Fisicamente, a intermitência está relacionada com a presença de raros, mas fortes gradientes de velocidade ou de escalares com acentuada localização no espaço ou no tempo, que são gerados por estruturas altamente coerentes, Camussi, 1997. Que aumentam fortemente a taxa de dissipação local de energia cinética turbulenta. A Figura 6.9 mostra o exemplo de um sinal intermitente de flutuações de velocidade.

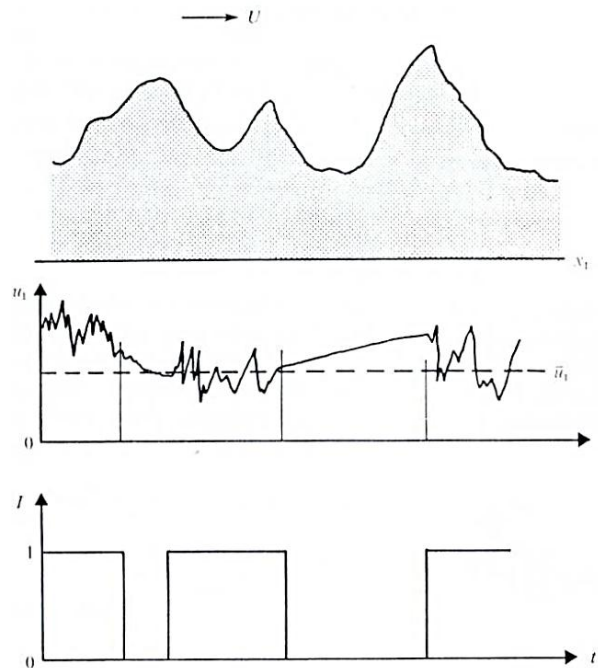


Figura 5.9 - Exemplo de sinal intermitente de flutuações de velocidade. (Libby, 1975)

Neste trabalho, a técnica de análise de ondaletas foi aplicada, para estudar os níveis de energia e sua intermitência em cada escala de decomposição. Uma vez que se é capaz de proporcionar variações temporais da energia das diferentes escalas contidos em um campo do escoamento flutuante. A transformada de ondaletas usa janelas curtas em frequências altas e janelas longas em baixas frequências.

A ondaleta ortogonal db20, foi utilizada para estudar as séries temporais das componentes de velocidade do escoamento no canal composto, e determinar as variações temporais da energia contidas nas diferentes escalas. Esta análise permite examinar a intermitência de cada escala de decomposição separadamente.

Conforme Xuan et al., 2013, o fator de intermitência é determinado, a partir dos coeficientes da transformada de ondaletas, sendo definido, como uma relação entre o número de eventos com energia maior que o “limite”, (th_a) , $(I_{a,b} = 1)$, e o total de eventos do sinal (N_a) , determinado pela eq. 6.2.

$$IF_a = \frac{\sum_{b=1}^{N_a} I_{a,b}}{N_a} \quad (6.2)$$

$$I_{a,b} = \begin{cases} 1, & |DWT_{a,b}|^2 > th_a \\ 0, & \text{outros.} \end{cases}$$

onde $DWT_{a,b}$ representam os coeficientes de ondaletas calculados para uma escala a , e um tempo b .

Para quantificar a intermitência, considera-se a seguinte abordagem: Quando o quadrado do coeficiente de ondaletas é maior do que certo “limite” (threshold) determinado, o sinal é considerado num estado de alta energia. Esse limite é definido por Hajj, 1999, como sendo o dobro da energia média do sinal, $(\bar{E}_{a,b})$, para a escala de decomposição da transformada de ondaleta, conforme eq. 6.3.

$$th = 2\bar{E}_{a,b} \quad (6.3)$$

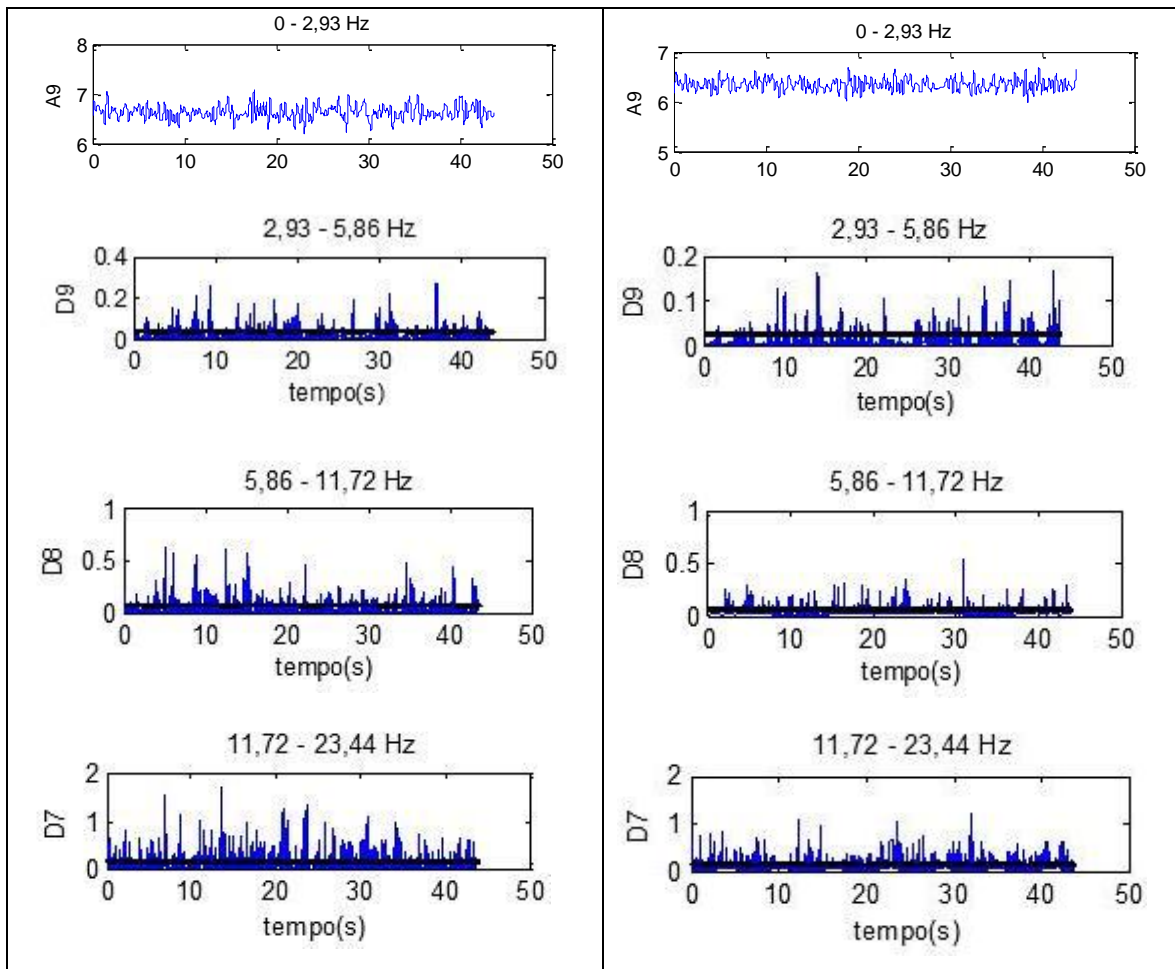
Ao examinar o conteúdo da energia nas diferentes escalas da transformada de ondaletas, pode se notar que a percentagem da energia total contida em cada escala varia de uma escala para a outra. A energia de intermitência neste trabalho é dada pela eq. 6.4, esta equação é uma adaptação da proposta feita por Xuan, 2013. Onde ela é definida como a porcentagem de eventos com energia maior que o limite, (th) , em relação à energia média da escala de decomposição da ondaleta, (\bar{E}_a) .

$$IE_a = \frac{\overline{E_{a,b}}}{E_a} \quad (6.4)$$

A fim de limitar o ruído dos coeficientes de ondaletas pela intermitência local do escoamento turbulento, os coeficientes foram suavizados utilizando uma média móvel dos coeficientes em uma janela de 8 pontos.

A Figura 6.10, apresenta a reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais de velocidade para as seções com o comprimento de $L= 1000$ e 1500 mm para as relações de $P/D= 11$. Por meio da transformada discreta de ondaletas, em suas referentes bandas de frequência. Onde pode se observar os eventos com energia superior a duas vezes a energia média do sinal na banda analisada, conforme eq. 6.3.

No apêndice B é apresentada a reconstrução da aproximação e dos detalhes dos demais sinais para $P/D= 11$ e para as relações $P/D= 5$ e $P/D= 3,3$.



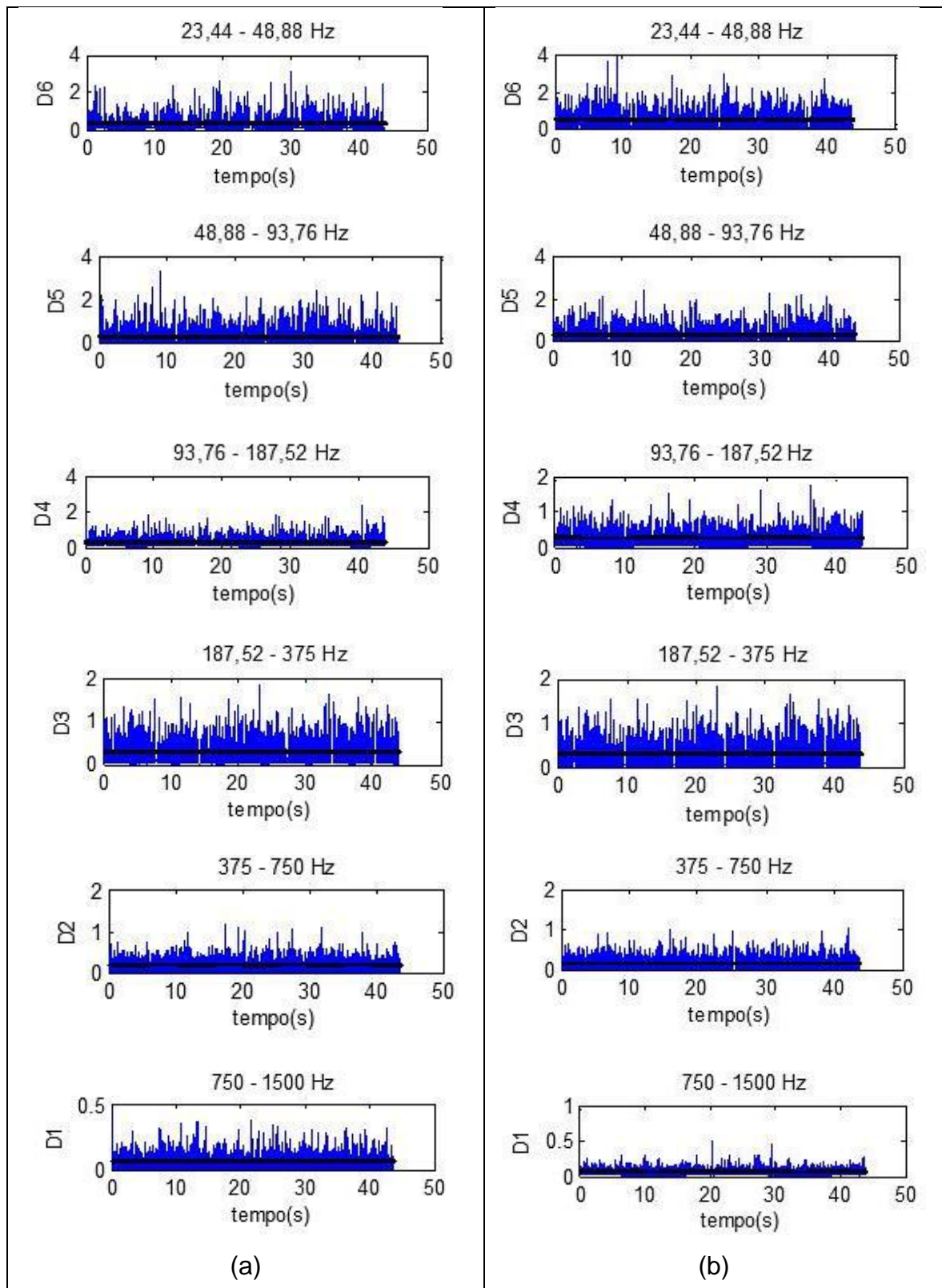


Figura 5.10 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D=11$. (a) $L=1000$ mm, (b) $L=1500$ mm.

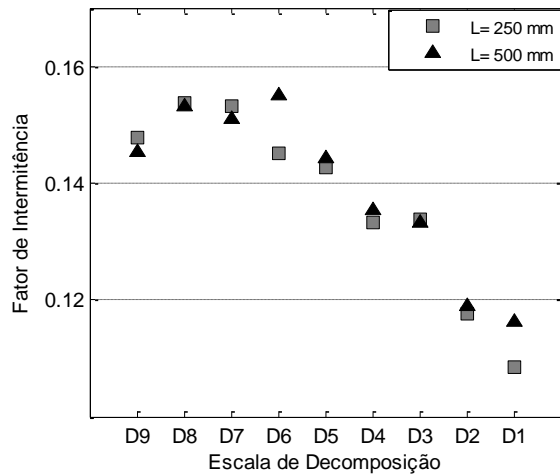
Através das equações 6.2, 6.3 e 6.4 foi possível determinar o Fator e a Energia de Intermitência. Onde o Fator de Intermitência é determinado a partir do somatório de todos os eventos com energia maior que duas vezes o limite estabelecido dividido pelo número total de eventos da série temporal. Já a Energia de Intermitência se dá a partir do somatório da energia de todos os eventos maiores que o limite, divididos pela energia total da banda de decomposição.

A Figura 6.11 apresenta uma análise feita para o fator e a energia de intermitência para as seções com relação $P/D= 11$. A Figura 6.12 mostra a análise para as seções com relação de $P/D= 5$ e a Figura 6.13 para as seções de $P/D= 3.33$. Relacionando o fator e a energia de intermitência com o comprimento, L , das seções. Este fator indica a porcentagem de tempo em que a energia dos coeficientes de ondaleta de uma escala particular é maior do que o dobro do seu valor médio.

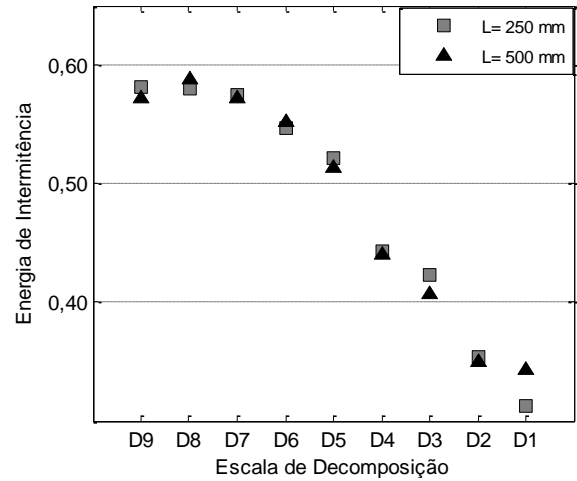
Os resultados mostram que, para ambos as relações de P/D , que nas escalas de decomposição entre $D5$ e $D9$ têm consistentemente um fator de intermitência se apresenta entre 14 e 16%. Além de medir o fator de intermitência, o trabalho investiga a porcentagem de energia de cada escala contida durante os eventos intermitentes.

Os resultados mostram que entre 40 e 60% da energia de cada escala aparecem eventos intermitentes. Este resultado indica que para as seções estudadas, a maior parte dos eventos nas escalas contendo energia aparece em curtos períodos de tempo, entre 13 e 16% do tempo.

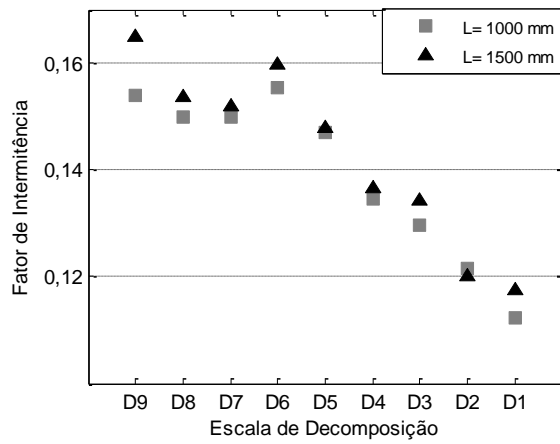
Estes resultados também são importantes porque eles mostram que, considerando os valores médios de energia, como seria estimada a partir do espectro de potência, não é suficiente.



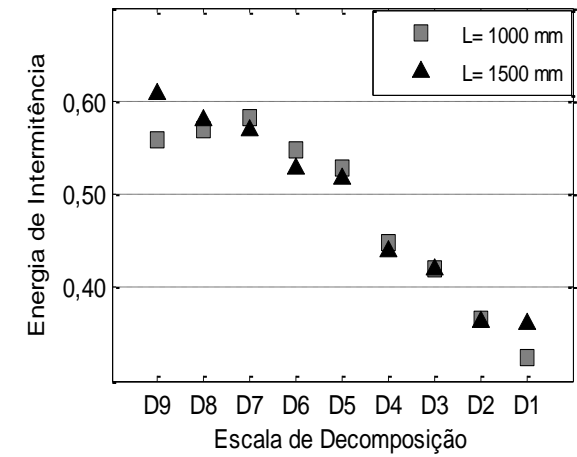
(a)



(b)

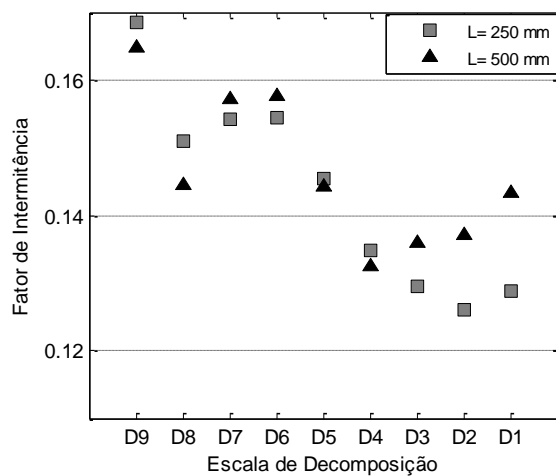


(c)

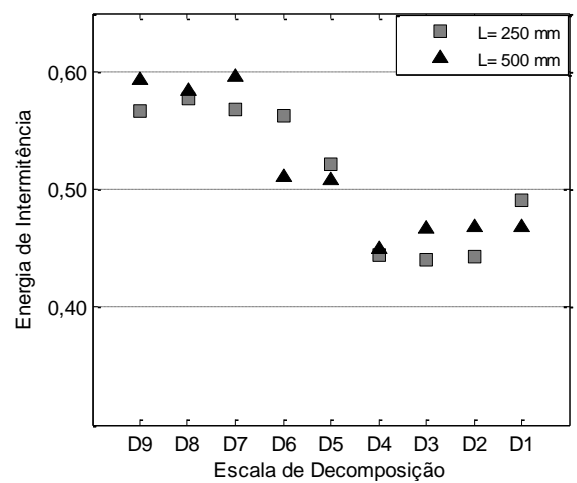


(d)

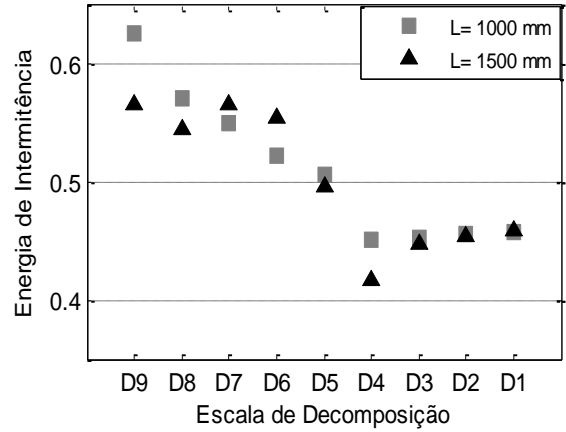
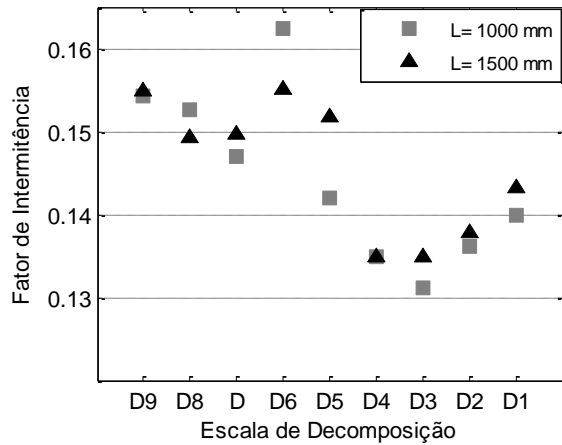
Figura 5.11 – Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D=11$. (a) $L=250$ mm. (b) $L=500$ mm. (c) $L=1000$ mm. (d) $L=1500$ mm.



(a)



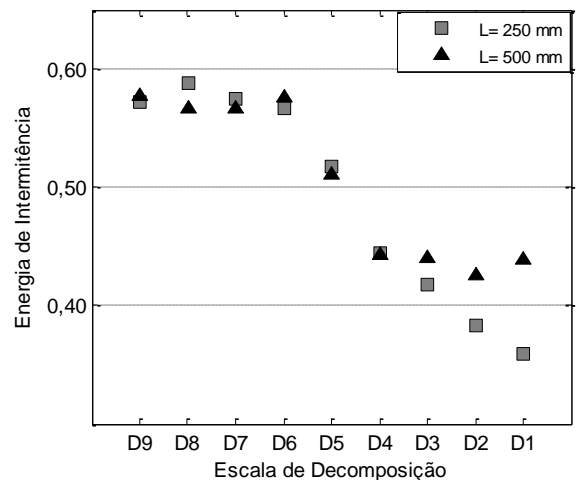
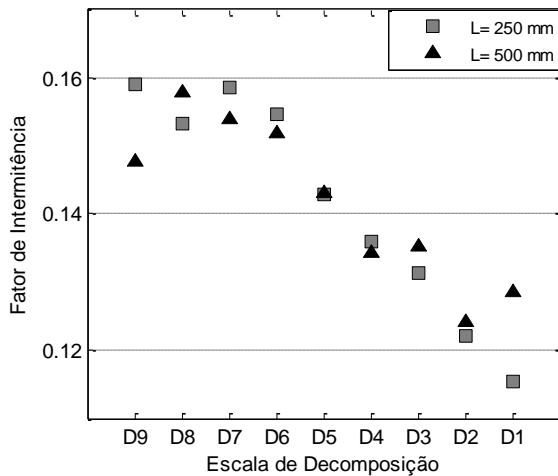
(b)



(c)

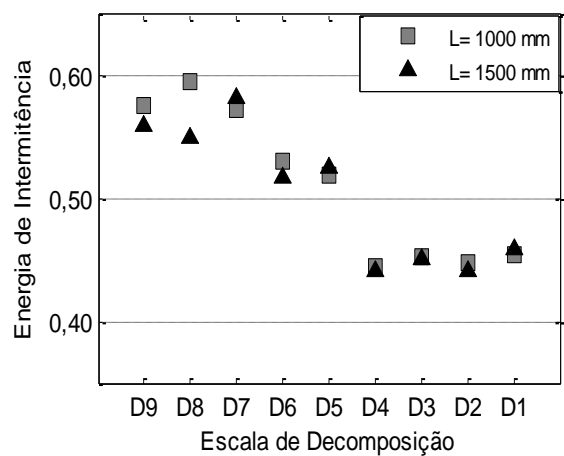
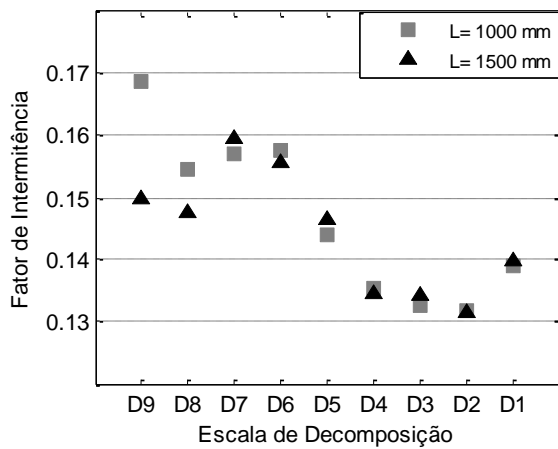
(d)

Figura 5.12 - Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D= 5$. (a) $L= 250$ mm. (b) $L= 500$ mm. (c) $L= 1000$ mm. (d) $L= 1500$ mm.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 5.13 - Análise do Fator e da Energia de Intermitência para as seções de $P/D= 3,33$. (a) $L= 250$ mm. (b) $L= 500$ mm. (c) $L= 1000$ mm. (d) $L= 1500$ mm.

As Figuras 6.14 (a) e (b) mostra para as seções de $L= 1000$ mm, e a Figura 5.15 (a) e (b) apresenta o estudo para as seções de $L= 150$ mm, o mesmo tipo de análise do fator e da energia de intermitência é aplicado, porém avaliando a relação da largura da fenda, (D), das seções com o aparecimento de estruturas coerentes.

Analizando o fator e a energia de intermitência em relação às singularidades geométricas dos canais testados, pode se dizer que a largura da fenda não teve para este estudo, grande influência nos resultados obtidos. Visto que os percentuais de tempo em que os eventos de grande energia acontecem são bastante próximos para ambas às relações de P/D . O parâmetro que parece realmente influenciar na análise desses fenômenos é com comprimento do canal.

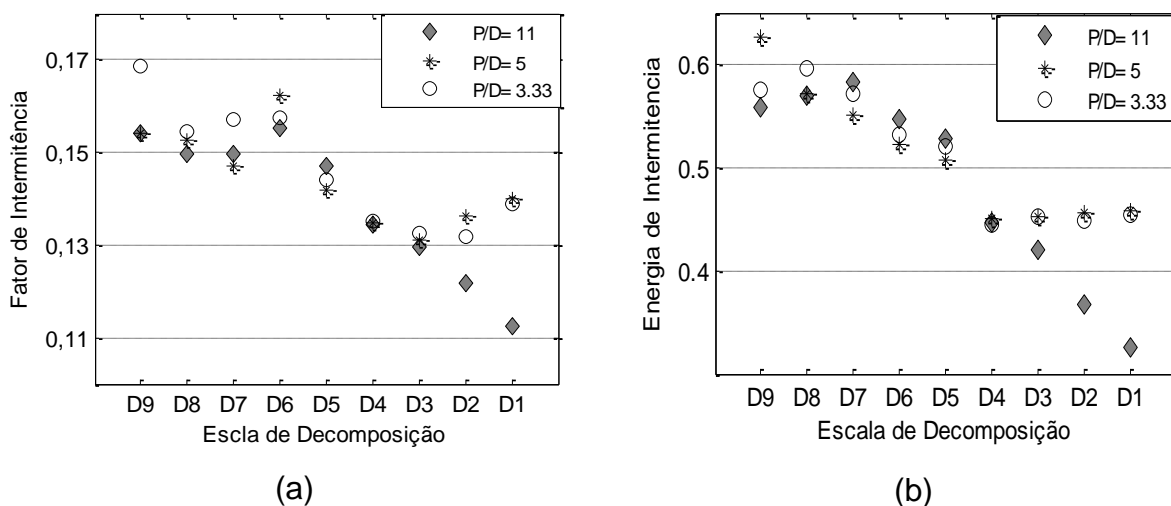


Figura 5.14 - seções com $L= 1000$ (a) Fator de Intermitência. (b) Energia de Intermitência.

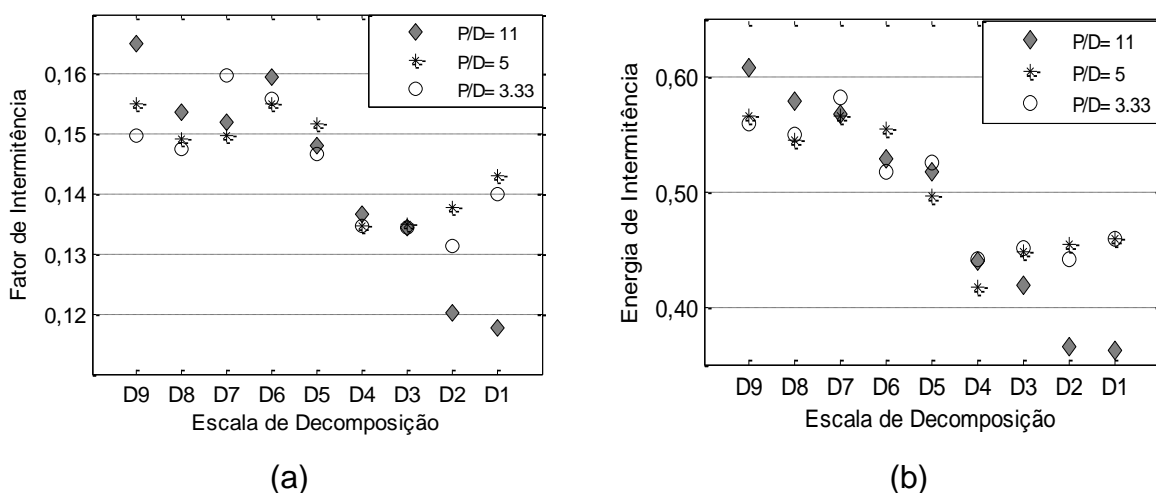


Figura 5.15 - seções com $L= 150$ (a) Fator de Intermitência. (b) Energia de Intermitência

As Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 apresentam os espectrogramas obtidos via transformada contínua de ondaletas, para as seções estudadas, onde pode se visualizar o comportamento dos eventos intermitentes no tempo. Nota se a existência desses eventos, para todas as seções, porém, eles se manifestam com maior energia nas seções de maior comprimento.

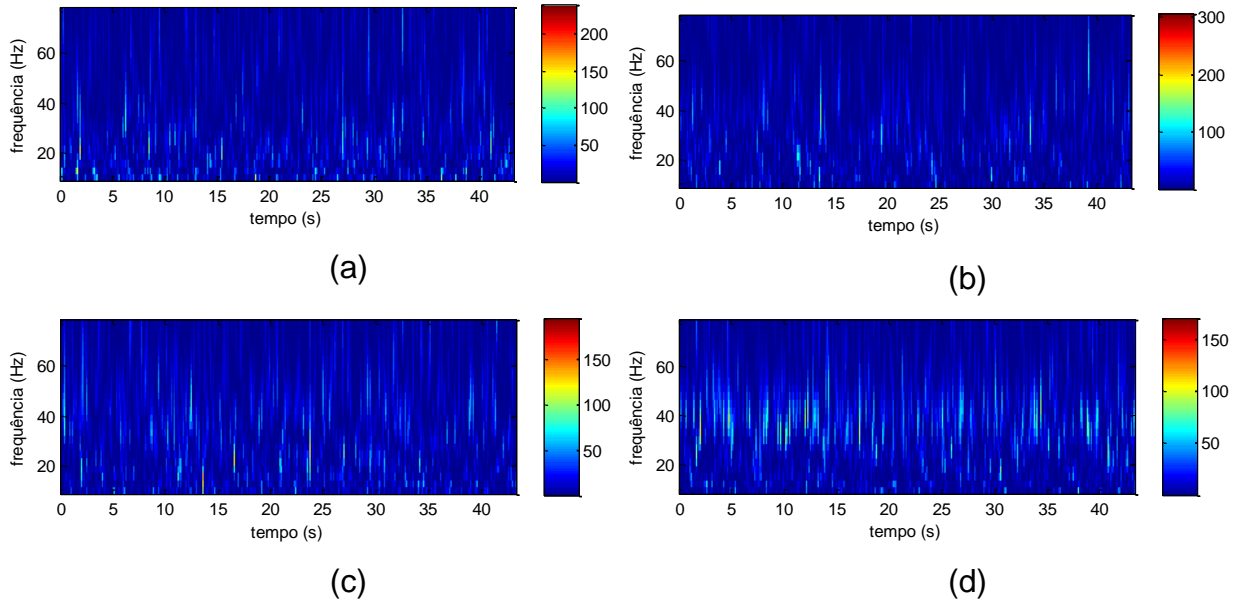


Figura 5.16 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=11$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.

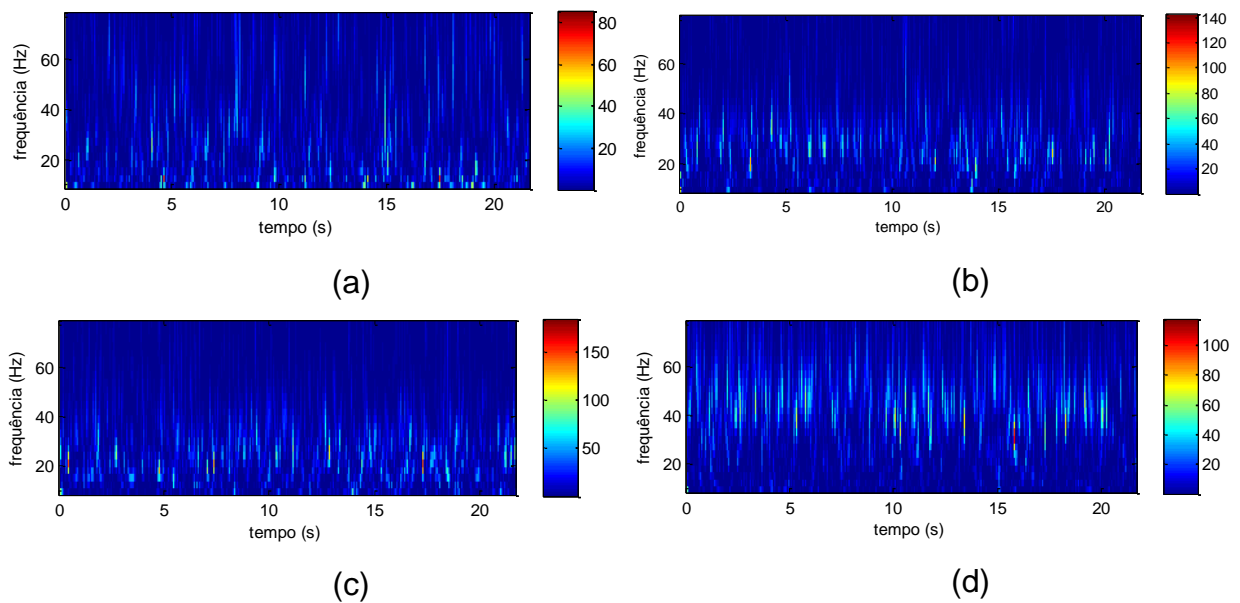


Figura 5.17 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D=5$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.

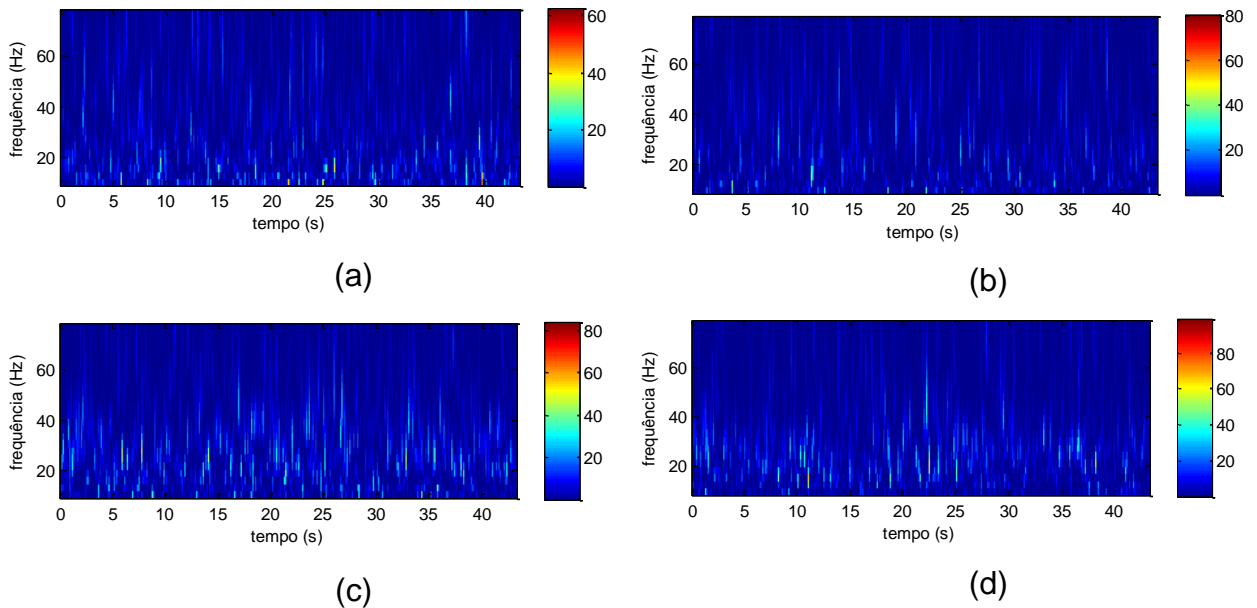


Figura 5.18 - Espectrograma dos sinais de velocidades instantâneas para as seções de teste com relação de $P/D = 3,33$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.

A fim de entender melhor a distribuição da energia sobre a flutuação de velocidade, a contribuição energética das diferentes bandas de frequência foi calculada, pela eq. 6.4, onde a energia da escala de decomposição, (E_a), é dividida pela energia total do sinal em todas as escalas de decomposição, ($\sum E_a$).

$$EC_a = \frac{E_a}{\sum E_a} \quad (6.4)$$

A Figura 6.19 mostra a distribuição da energia total dos sinais de velocidade, onde esta energia se apresenta nas diferentes escalas de decomposição da transformada discreta de ondaletas. De modo geral a maior porcentagem de energia de todos os sinais se apresentaram concentradas no detalhe D6, isto é, na banda de frequência que vai de 23,44 a 46,88 Hz e um menor percentual de energia está no detalhe D9 (2,83 – 5,86). O mesmo acontece na Figura 6.13 (d), para as seções com $L = 1500$ mm. Porém para a seção com relação $P/D = 5$, (S8), as maiores energias do sinal se apresentam em duas escalas de decomposição D6 e D5, indicando que existem fenômenos de grande intensidade nessas bandas de frequência que vai de 23,44 a 93,72 Hz.

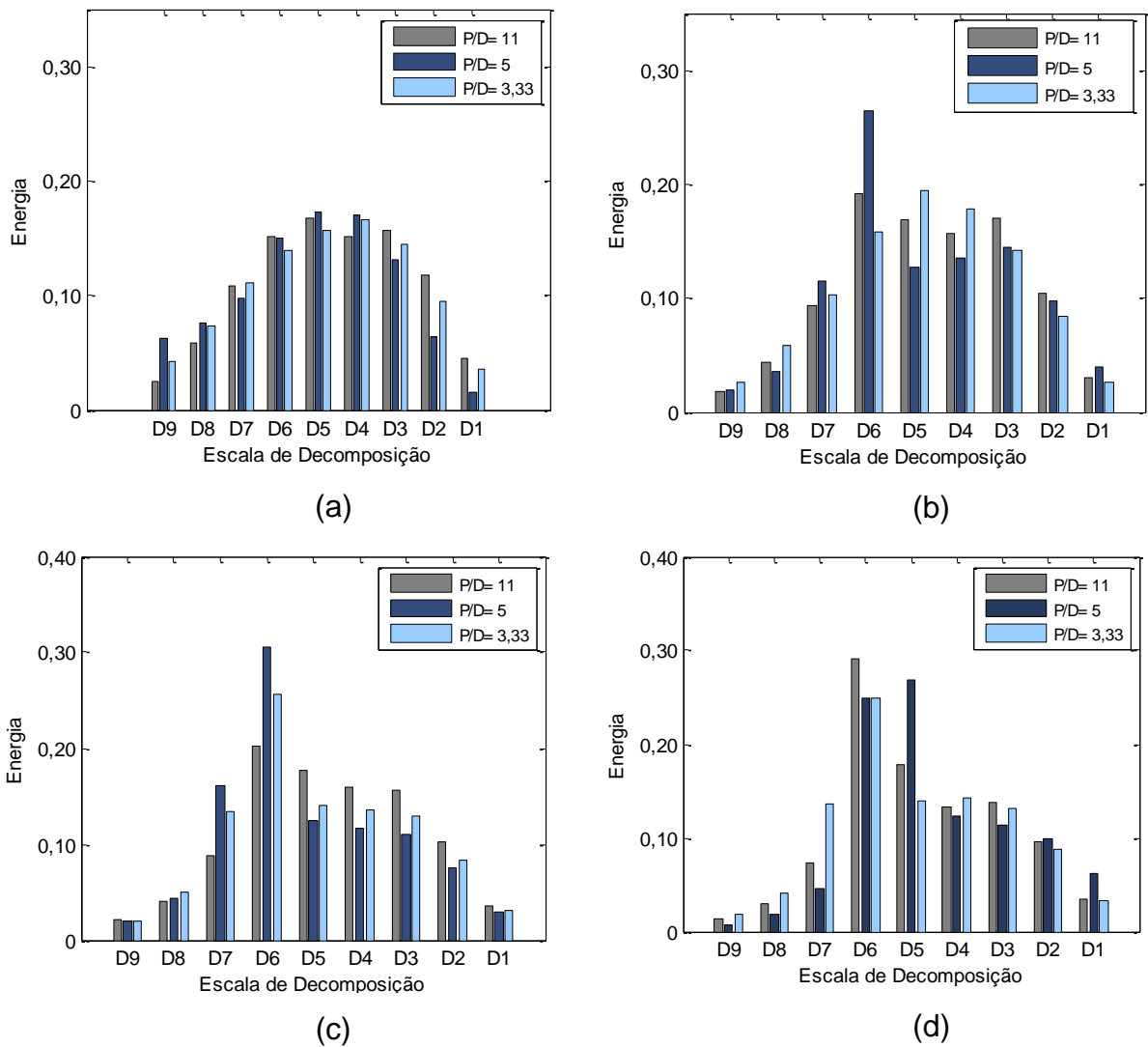


Figura 5.19 - Distribuição da energia dos diferentes níveis de decomposição. (a) L= 250 mm. (b) L= 500 mm. (c) L= 1000 mm. (d) L= 1500 mm.

5.5 Transformada discreta de Pacotes de Ondaletas

Para melhor avaliar o comportamento das frequências no escoamento, foi aplicada a transformada discreta de pacotes de ondaletas nos sinais estudados.

O método de pacotes de ondaletas é uma generalização da decomposição de ondaletas que oferece uma análise de sinais mais rica. No procedimento da decomposição da ondaleta ortogonal, o passo genérico divide os coeficientes de aproximação em duas partes. Após a divisão, obtemos um vetor de coeficientes de aproximação e um vetor de coeficientes de detalhe. A informação perdida entre duas aproximações sucessivas é armazenada nos coeficientes de detalhe. Em seguida, o próximo passo consiste em dividir o novo vetor de coeficiente aproximação.

Na técnica de pacotes ondaletas, cada coeficiente de detalhe também é decomposto em duas partes usando a mesma abordagem que na divisão do vetor de aproximação.

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. As reconstruções para os primeiros intervalos de frequência das seções com relação de $P/D= 11$, $P/D= 5$ e $P/D= 3,33$, estão apresentadas no apêndice II, respectivamente. A análise da distribuição da amplitude de flutuação da velocidade foi realizada para os intervalos de frequência 2,93 até 108,41 Hz no distribuídos em certo intervalo de tempo.

Para melhor visualizar os resultados obtidos por esta análise, apresenta se apenas o resultado para a seção de teste S8. Os demais resultados encontram se no apêndice B, onde modo geral observou se que nas seções de menor comprimento, ($L= 250$ e 500 mm), não houve o aparecimento de grandes energias nas bandas de frequência analisadas.

Para a seção S3- $L= 1000$ mm com relação de $P/D= 11$ observa se que o aumento da amplitude aparece no intervalo de frequência 23,44 até 43,95 Hz e também há um sinal energético na banda de 70,32 a 76,18 Hz. Assim como para seção S4 onde os resultados da análise estão apresentados no apêndice B, Figura B4, onde o aumento da amplitude no intervalo de frequência de 23,44 até 46,88 Hz e em 70,32 a 73,25 Hz, no intervalo de tempo de 43,69 s.

A seção S7 apresenta o sinal mais energético na banda de frequência que vai de 11,72 até 46,88 Hz, Figura B5 (c). A Figura 6.20 apresenta os resultados para a seção S8, onde nos intervalos de frequência de 23, 44 até 35,16 Hz e 70,32 até 79,11Hz, há um aumento da energia do sinal mais pronunciado. Os resultados para as seções de $P/D= 3,33$ estão apresentados no apêndice B, Figura B6. Onde tanto para $L=1000$ e 1500 mm as energias se apresentaram na banda de frequência que vai de 11,72 até 46,88 Hz.

Através dessa técnica pode se analisar a dinâmica das flutuações, obtendo assim a localização das frequências predominantes do escoamento. Os resultados desta análise concordam com os resultados apresentados na Figura 6.19, onde grande parte da energia do sinal se localiza na banda de frequência que vai de 23,44 a 46,88 Hz.

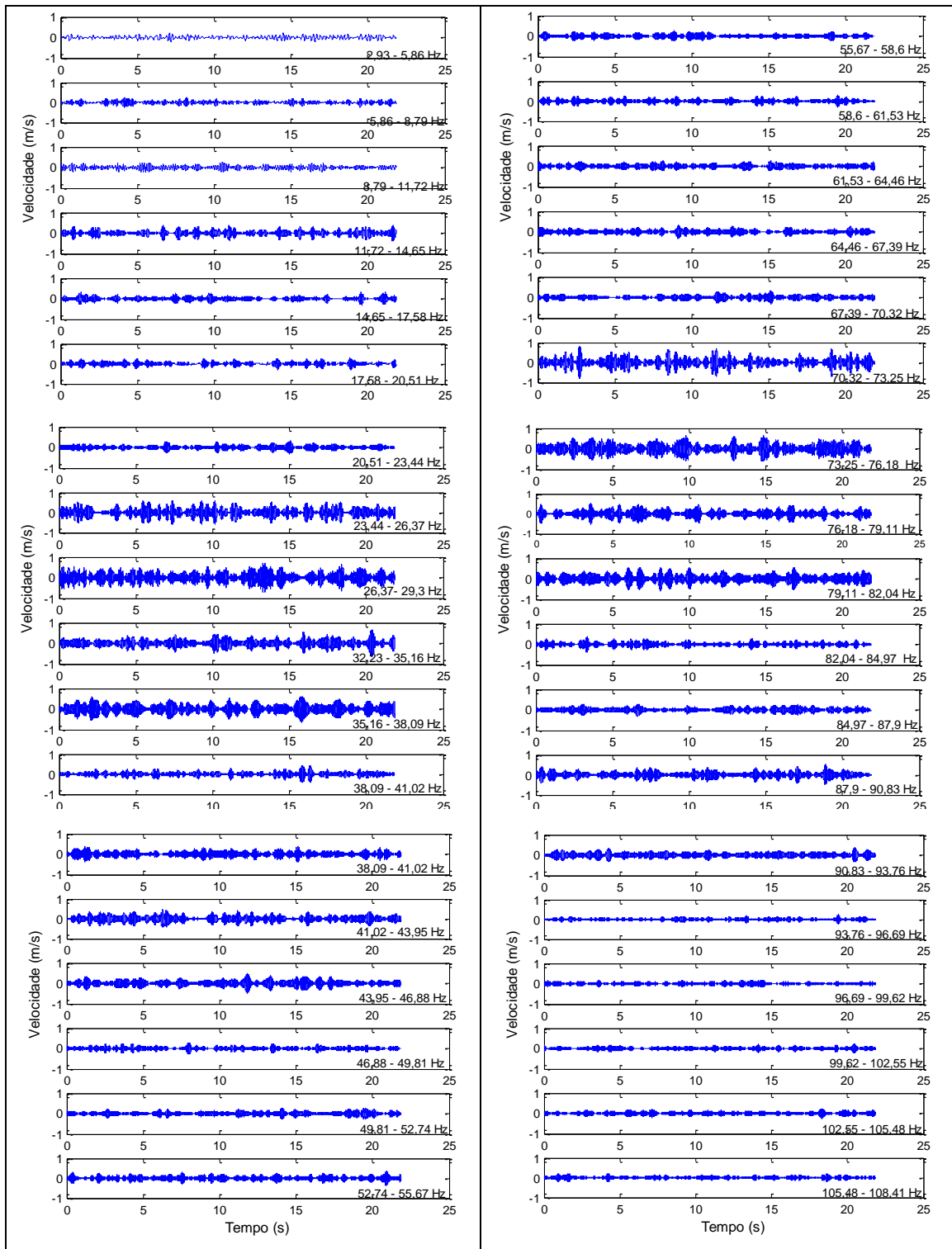


Figura 5.20 - Análise do sinal da seção de teste S8, por meio da transformada de pacotes de ondaletas para a relação de P/D= 5.

5.6 Energia Quadrática Média dos Sinais

As Figuras 6.21, 6.22 e 6.23 apresentam os gráficos da energia quadrática média dos detalhes dos sinais estudados, dada pela eq. 6.5, decompostos na banda de frequência de 2,93, por meio da transformada de pacotes de ondaletas no nível 9, seção 6.5. 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.

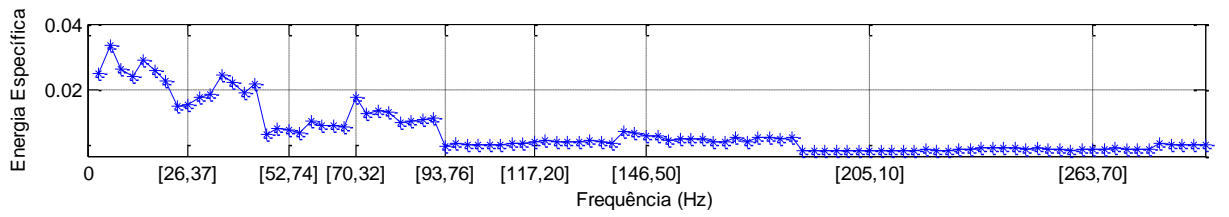
$$E_s = \overline{|DWT_{a,b}|^2} \quad (6.5)$$

Os espectros descrevem as distribuições 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).

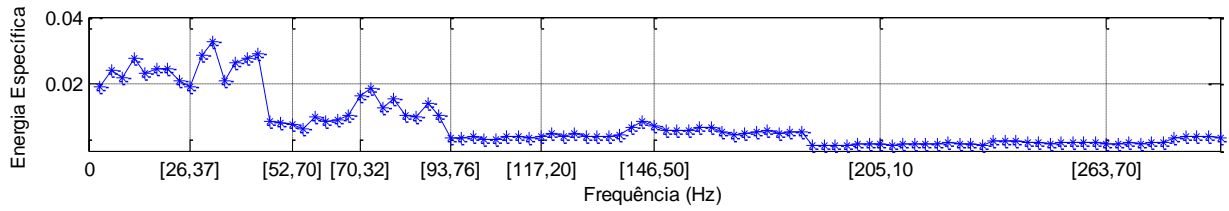
Pode se observar com essa análise o comportamento dessas energias, onde o os resultados obtidos para as menores seções produziram frequências de baixa energia. Observando as demais seções visualiza se a evolução dessa energia, aumentando conforme se altera o comprimento da seção.

Através da análise da distribuição da energia do sinal na frequência pode se observar o aparecimento de picos energéticos no sinal em diferentes frequências como nas Seções S8- Figura 6.26 (d) e S12- Figura 6.27 (d). Outro aspecto observado no estudo foi de que apresenta se mais de um número de Strouhal para o processo, diferentemente do que acontece através da análise de Fourier, onde estabelece um único Strouhal médio.

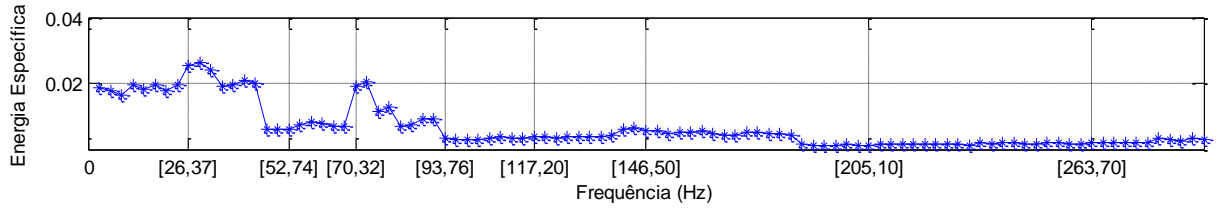
O número de Strouhal foi calculado em cada banda onde apareceram picos de energia, mostrando a variação do Strouhal conforme a decomposição do sinal. Onde pode se notar que nas seções de maior comprimento, os valores de Strouhal obtidos nesta avaliação chegaram a um valor aproximado ao valor encontrado por Meyer e Rehme, 1995. Para a seção S8 foi de 0,093, com uma frequência característica de 70,32 Hz, Figura 5.22 (d). Pode se notar que a partir de 100 Hz não aparece vestígios de energia no sinal para todos os sinais.



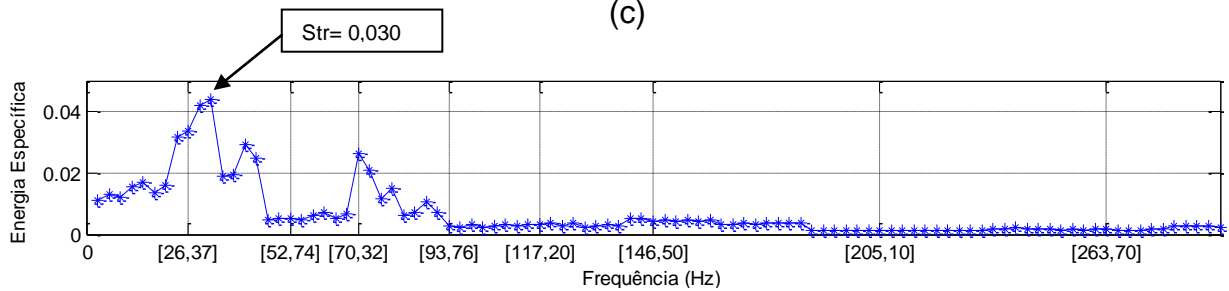
(a)



(b)

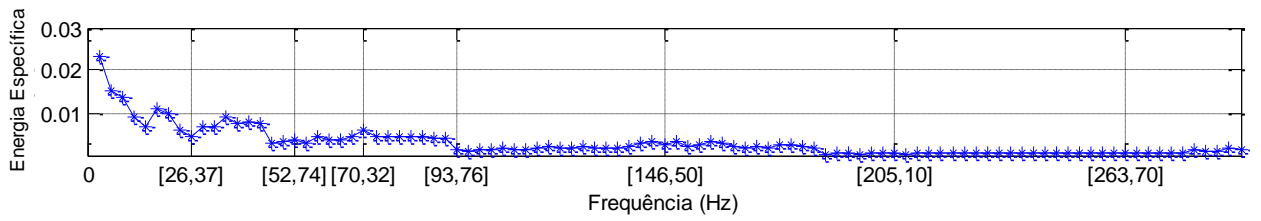


(c)

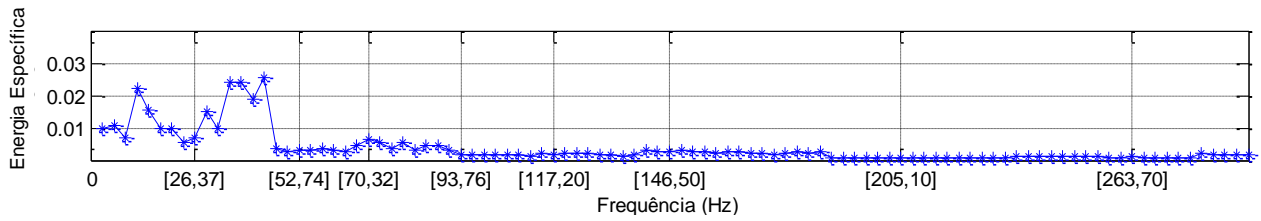


(d)

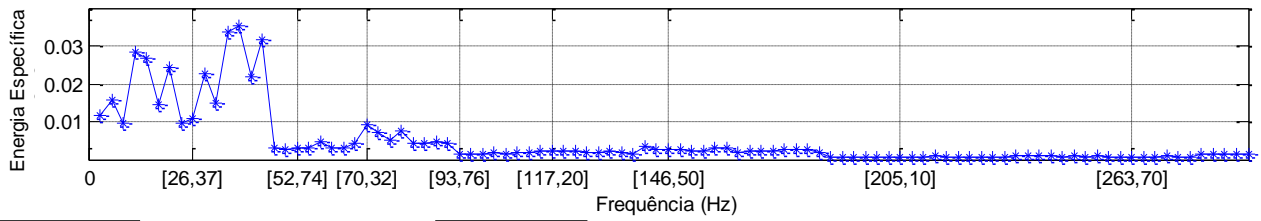
Figura 5.21 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D=11$. a) Seção S1, $L=250$ mm, b) Seção S2, $L=500$ mm, c) Seção S3, $L=1000$ mm, d) Seção S4, $L=1500$ mm.



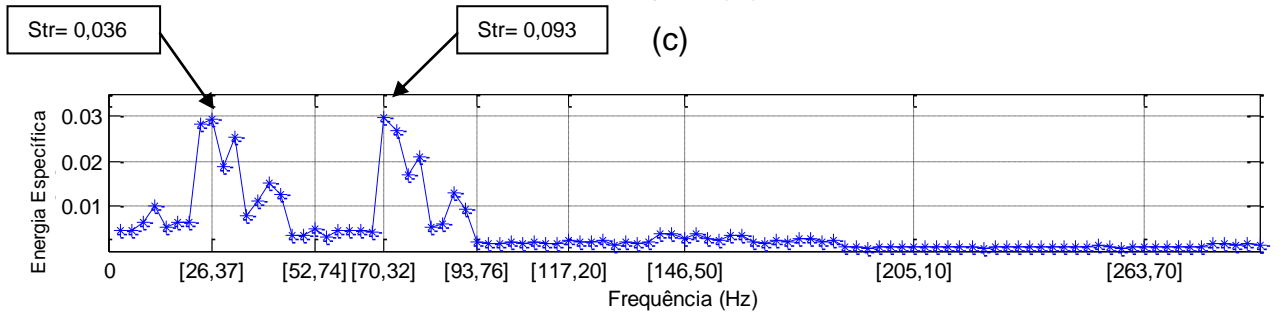
(a)



(b)



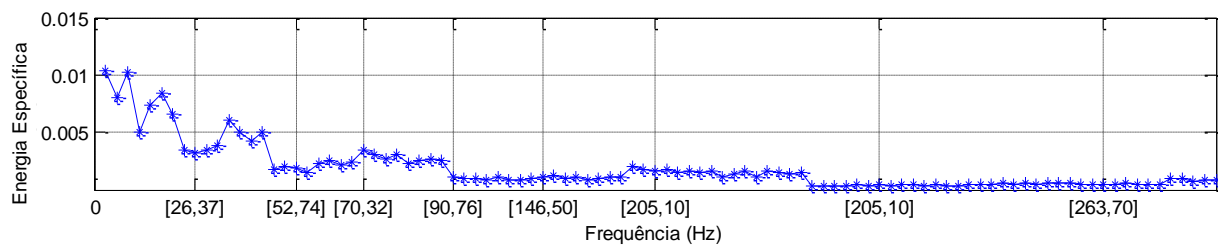
(c)



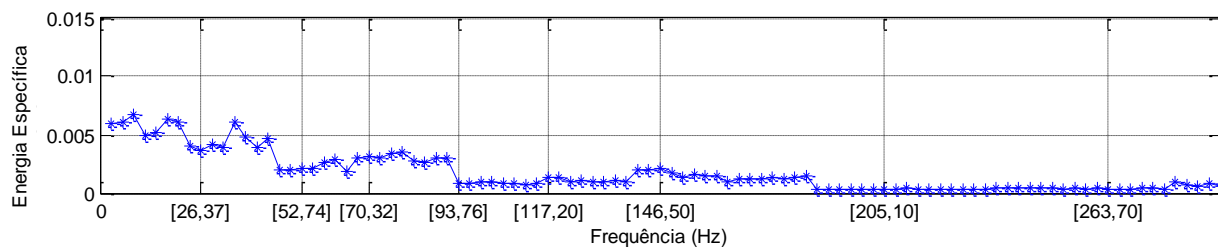
(d)

Figura 5.22 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D = 5$.

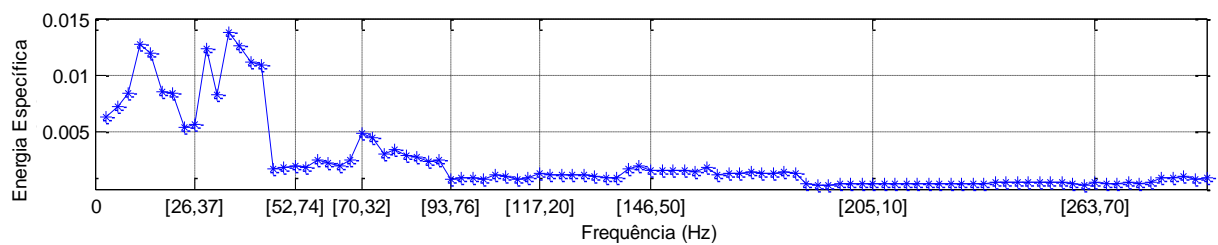
- a) Seção S5, $L=250$ mm, b) Seção S6, $L=500$ mm, c) Seção S7, $L=1000$ mm,
- d) Seção S8, $L=1500$ mm.



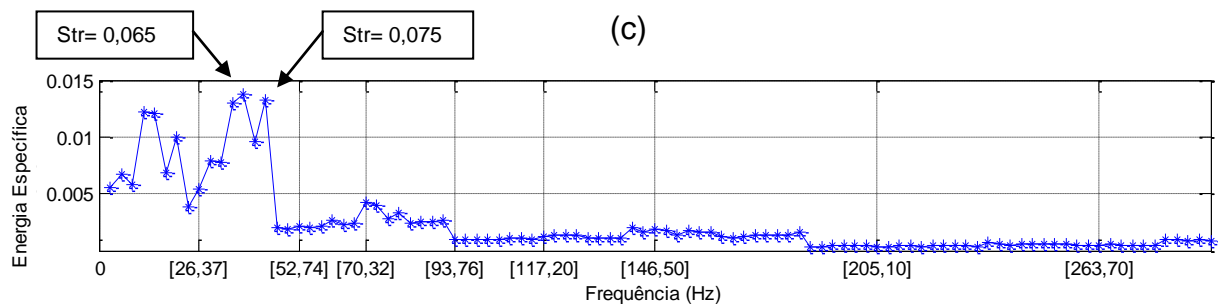
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.23 - Energia quadrática média para as seções com relação de $P/D = 3,33$.

- a) Seção S9, $L=250$ mm, b) Seção S10, $L=500$ mm, c) Seção S11, $L=1000$ mm,
- d) Seção S12, $L=1500$ mm.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo das flutuações de velocidade ao longo da linha de simetria de um canal contendo uma única fenda estreita, conectada a parede lateral de um canal principal. O objetivo deste trabalho é investigar a presença de estruturas coerentes consequentes do escoamento neste tipo de canal, com um pequeno comprimento de entrada, bem como determinar a influência dos parâmetros geométricos da seção de testes na detecção destas estruturas, ou até, em sua existência.

As seções estudadas mostraram o aparecimento de instabilidades durante o escoamento, com exceção nas seções mais curtas ($L = 250$ mm) que apresentaram frequências de pequena energia. Observa-se que o pico nos espectros só aparece para uma relação $L/\sqrt{P.D} \geq 56$, pode-se então concluir que abaixo desse valor não existe o aparecimento de estruturas de grande escala.

Mostrando que estas “estruturas de grande escala”, quase-periódicas, precisam de um certo comprimento para começarem a surgir no escoamento. Os resultados revelam que a largura da fenda e o comprimento do canal parecem produzir efeitos diferentes no comportamento dinâmico da velocidade. Principalmente para a seção com $D = 6$ mm, onde as estruturas se manifestaram para $L > 500$ mm. Este fato pode sugerir uma relação entre o comprimento da seção e a largura da fenda, L/D , por exemplo. Somente depois de atingir certa distância adimensional, L/D , as estruturas são suficientemente desenvolvidas permitindo serem medidas.

Na pesquisa foi aplicada a técnica de ondaletas ortogonais para quantificar o nível de intermitência dos sinais contendo energia no escoamento em canais com fenda estreita. A análise de ondaletas permitiu o estudo das variações na energia da turbulência dos sinais com o tempo, e a análise das características intermitentes de cada um desses sinais individualmente variando significativamente com o tempo, podendo ser observado o momento em que os eventos de alta energia relacionados à turbulência acontecem.

O método de análise de transformada de pacotes de ondaletas mostrou-se uma técnica interessante para o estudo onde pode-se localizar a que banda de frequência em que estão localizadas as estruturas de grande escala no sinal

estudado. Onde a maior parte dos eventos turbulentos se apresenta em uma banda de frequência que é de 23,44 a 46,88 Hz.

Quanto ao número de Strouhal encontrado neste trabalho, os resultados mostraram uma variação do Strouhal, sendo que valores muito pequenos foram encontrados para as seções de comprimento menor. Como observado principalmente nas seções S8 e S12. Em que os valores mais se aproximam ao valor encontrado por Meyer e Rehme, 1995.

Outro fato observado no estudo foi de que através da decomposição feita pela Transformada de Ondaletas, apresenta se mais de um número de Strouhal para o processo. Diferentemente do que acontece através da análise de Fourier, onde estabelece um único Strouhal médio. No entanto mais experimentos devem ser realizados para avaliar Strouhal em relação à variação de L maiores, pois com a análise dos resultados deste trabalho percebemos que estas estruturas continuam crescendo ao longo do escoamento, por se tratar de um escoamento em desenvolvimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alam, M. M. e Sakamoto, H. Investigation of Strouhal frequencies of two staggered bluff bodies and detection of multistable flow by wavelets, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 20, pp. 425-449, 2005.

Bardellos, C., R., Características Dinâmicas do escoamento turbulento em Bancos de Tubos inclinados. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

Bendat, J. S. e Piersol, A. G. *Random data: analysis and measurement procedures*, Wiley – Interscience, New York, 1971.

Biemüller, M., Meyer, L. and Rehme, K., Large eddy simulation and measurement of the structure of turbulence in two rectangular channels connected by the gap, *Engineering Turbulence Modeling and Experiments* 3, Editors: Rodi, W. and Bergeles, G., 249-258, 1996.

Bolzan, M. J. A. Um Estudo Sobre Características do Subdomínio Inercial da Turbulência Desenvolvida em Escoamento Acima e Dentro da Copa da Floresta Amazônica de Terra Firme e Acima do Pantanal Matogrossense. Tese (Doutorado)-INPE, 2004.

Bonnet, J. P. e Delville, J. Review of Coherent Structures in Turbulent Free Shear Flows and Their Possible Influence on Computational Methods, *Flow, Turbulence and Combustion*, v. 66, pp. 333-353, 2001.

Bueno, R.F. Aplicação da Transformada de Fourier e em Ondaleta às Séries Temporais de Diferenças de Altitude, Determinadas por Gps, Acoplado a Shaker na Base USP. *Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos*, Curitiba, v. 14, nº 4, p.557-570, 2008.

Camussi R., e Guj, G., “Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 348, pp. 177–199, 1997

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.

Chui, C. Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications. [S.l.]: Academic Press, San Diego, CA, 1992.

Daubechies, I. Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF Regional Conference Series on Applied Mathematics, Philadelphia, SIAM, 1992.

De Paula, A. V. Determinação de Parametros que Caracterizam o Fenomeno da biestabilidade de escoamentos turbulentos. Dr. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012.

Farge, M. e Schneider, K. Coherent Vortex Simulation (CVS), A Semi-Deterministic Turbulence Model Using Wavelets, *Flow, Turbulence and Combustion*, v. 66, pp. 393-426, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2001.

Farge, M. wavelet transforms and Their Applications to Turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v.24, pp. 395-457, Palo Alto, Annual Reviews Inc.1992.

Farge, M., Kevlahan, N., Perrier, V. e Goirand, E. Wavelets and Turbulence, *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, nº. 4, pp. 639-669, New York, IEEE, 1996.

Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics (Springer, 3ed) 2001.

Gilliam X., Dunyak J., Doggett A., e Smith D., Coherent structure detection using wavelet analysis in long time-series, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 88, no. 2-3, pp. 183–195, 2000.

Goulart, J. N. V. Noieto, L. G. Moller, S . Experimental Study of Mixing Layer in a Closed Compound Channel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 36, p. 411-420, 2013.

Goulart, J.N.V. Análise Experimental de Escoamentos Cisalhantes em Canais Compostos Fechados. Dr. Tese, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, Rs. Brasil, 2009.

Guellouz, M.S. and Tavoularis, S. The structure of the turbulent flow in a rectangular channel containing a single rod –Part 1: Reynolds-Average measurements, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, 23, 59-73, 2000.

Hajj, A., Tieleman, H. w. e Tian, L., Wind tunnel simulation of time variations of turbulence and effects on pressure on surfe-mounted prisms, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 88, pp. 197-212, Amsterdam, Elsevier Science Ltda, 2000.

Hajj, M. R. Intermittency of energy-containing scales in atmospheric surface layer, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 125, no. 7, pp. 797–803, 1999.

Hooper, J. D. Fully Developed Turbulent Flow Through a Rod Cluster, Ph.D.Thesis, Univ. New South Wales, 1980.

Hooper, J. D., e Rehme, K. Large-Scale Structural Effects in Developed Turbulent Flow Through Closed-Spaced Rod Arrays, *J. Fluid Mech.* v. 145, pp. 305-337, 1984.

Indrasiak, M. L., 2004. Caracterização de escoamento Turbulentos Transientes Usando a Transformada de Ondaletas. Tese de Doutorado, Porto Alegre. PROMEC/UFRGS, Brasil.

Krauss, T. & Meyer, L. Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle. *N. Eng. Des.* 180, 185–206, 1998.

Libby, P. On the prediction of intermitente turbulent flows. *Journal of Mechanics*, v. 68, p. 273-295, 1975.

Merzari, E., Ninokata, H., Baglietto, E., 2008. “Numerical simulation of flows in tight-lattice fuel bundles”. *Nucl. Eng. Des.* 238, 1703–1719.

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.

- Meyer, Y. *Ondelettes et Operateurs I*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- Meyer, Y. *Wavelets and Applications*. Proceedings of the International Conference, Marseille, France, 1989.
- Möller, S. V. e Silvestrini, J. H., 2004, “Turbulência”, Vol. 4, Cap. 1 –“Turbulência: Fundamentos”, ABCM, Rio de Janeiro, pp. 1-32.
- Möller, S. V. *On Phenomena of Turbulent Flow Through Rod Bundles*, Experimental Thermo and Fluid Science, 4, pp. 25-35, 1991.
- Möller, S. V., 2003. *Experimentação em Turbulência*. Turbulência, v. 2, Editores: A. Silveira Neto e S. S. Mansur, pp. 207-243, ABCM, Rio de Janeiro, RJ.
- Morettin. P. A. *Onda e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas – São Paulo Editora da Universidade de São Paulo*. 1999.
- Morlet, J.; Grossman, A.; Goupillaud, P. *Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis*. *Geoexploration*, v. 23, p. 85–105, 1984.
- Panofsky, H. A.; Dutton, J. A. *Atmospheric Turbulence, Models and Methods for Engineering Applications*. [S.I.]: John Wiley, New York, 1984.
- Olinto, C. R. *Estudo experimental das Características do escoamento turbulento nas primeiras fileiras de banco de tubos*. Dr. Tese, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, Rs. 2005.
- Parizzi, A. *Desenvolvimento do Escoamento Axial Turbulento nos Subcanais de Feixes de Barras*. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre. PROMEC/UFRGS, Brasil, 1998.
- Percival, D. B. e Walden, A. T., *Wavelet methods for time series analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- Prooijen, B. C., Battjes, J., Uijttewaal, W. S. J. *Momentum Exchange in straight uniform compound channel flow*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Volume 131, págs. 175-183, 2005.

Protázio, J. M. B. *Análise Wavelet Aplicada a Sinais Geofísicos*. 2002.

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. *Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Flow Channels*, 1973.

Salmond, J. A. and McKendry, I. G., *Turbulence in the Very Stable Nocturnal Boundary Layer: Implications for Air Pollution*, *Prog. Phys. Geog.*, in press, 2005.

Schlichting, H. *“Boundary-layer theory”*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.

Shiono, K., Knight, D. W. *“Turbulent Open-Channel Flows with Variable Depth across the Channel”*, *J. Fluid Mech.* 222, 617-646, 1991.

Soldini, L., Piattella, A., Brocchini, M., Mancinelli, A. e Bernetti, R. *Macrovortices-induced horizontal mixing in compound channels*, *Ocean Dynamics*, 54 , 333 – 339, 2004.

Sorbjan, Z. *Structure of the Atmospheric Boundary Layer*. [S.I.]: London: Prentice-Hall, 1989.

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.

Souza, S. I. S., Goulart, J. N. V. *Numerical Analysis of Developing Turbulent Flow in a Closed Compound Channel*. *Thermal Engineering*, 10,pp. 81-87, 2011.

Stocchino A. Brocchini M. *Horizontal mixing of quasi-uniform straight*. *J. Fluid Mech.*, v. 643, pp. 425–435, 2009.

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

Tenneks, H. e Lumley, J. L. *A First Course in Turbulence*, Cambridge MA: MIT Press.1972.

Torrence, C.; Compo, G. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998.

Welch, P. D., The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-15, pp. 70-75, New York, 1967.

White, F. *Viscous Fluid Flow*. 2a. ed. [S.I.]: DCW Industries, 2000.

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.

Xavier, C.M., Möller, S.V. E Petry, A.P., 2011. Large Eddy Simulation Of Turbulent Flows In Compound Channels With A Finite Element Code, The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14), Toronto, Canadá. 2011.

Xuan W., Bo Y., and Yi W., “Wavelet Analysis on Turbulent Structure in Drag-Reducing Channel Flow Based on Direct Numerical Simulation,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2013, Article ID 514325, 10 pages, 2013.

Yan B.H. et. al., Numerical simulation of the coherent structure and turbulent mixing in tight lattice. *Progress in Nuclear Energy*, v. 54, pp. 81-95, 2012.

APÊNDICE A - Análise de Incertezas

Este apêndice apresenta as características dos equipamentos utilizados na pesquisa desta dissertação, abordando a faixa de variação dos valores medidos, valores típicos dos resultados, bem como a resolução apresentada na leitura dos instrumentos e o erro percentual entre os valores medidos e calculados no processo de calibração dos sensores.

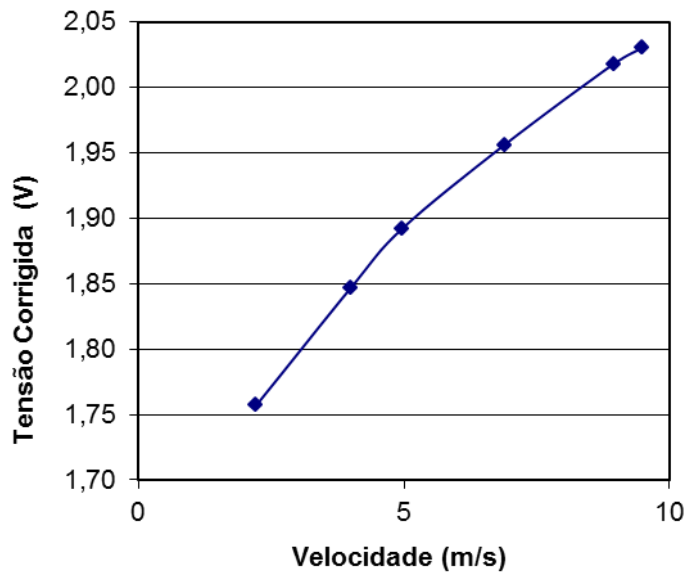
Procedimento de calibração da sonda de fio quente

Na calibração de sondas retas, determinou-se uma relação entre a tensão e velocidade. A bancada a qual permite a realização da calibração é a mesma descrita por Vicari, 1996. A sonda reta utilizada nesta pesquisa é uma sonda 55P11.

A tabela A1 mostra o registro de uma calibração típica para obtenção da velocidade axial da sonda de fio quente, e a Figura A1 ilustra a curva de velocidade versus tensão envolvida no processo de calibração desta variável.

Tabela A1 – Registro de uma calibração típica do sensor de velocidade

$E_o = 1,409$		$n_x = 0,458240810$			
$E_o(\text{Vel.zero})=1,409$		$B_x = 0,761907189$			
E_{corr}	Vel	$\ln(E^2 - E_o^2)$	$\ln(V_r)$	Vel	$Erro (\%)$
(Volts)	real (m/s)			calc(m/s)	$100((v_r - V_{cal})/v_r)$
1,757	2,219	0,0969	0,797	2,237	-0,793
1,847	4,002	0,3549	1,387	3,928	1,862
1,892	4,964	0,4664	1,602	5,010	-0,916
1,956	6,888	0,6101	1,930	6,854	0,496
2,018	8,951	0,7357	2,192	9,016	-0,731
2,03	9,486	0,7587	2,250	9,480	0,054



A 1- Relação típica entre velocidade medida e tensão corrigida resultante do processo de calibração da sonda de fio quente.

Análise de Incerteza das Medições de Velocidade

O erro em uma medição é dado pela diferença entre o valor real e o medido. Neste trabalho serão analisadas as incertezas de medição, que são os valores possíveis dos erros, pois os valores medidos não são previamente conhecidos. É de fundamental importância nos estudos experimentais à estimativa dos efeitos das incertezas das medições nos resultados finais, o que possibilita avaliar a provável fonte de erros.

De acordo com Moffat, 1988, a incerteza de um resultado pode ser calculada combinando-se as incertezas das variáveis envolvidas, e dada por:

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

em que $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é o resultado em análise e δx_i é a incerteza da variável x_i . O coeficiente de sensibilidade do resultado R com respeito à medição de x_i é dado pela derivada parcial de R em relação a x_i .

Incertezas Associadas à Tubos de Pitot e Sondas de Fio Quente

A equação que relaciona a variação de pressão entre dois pontos, localizados em uma mesma seção transversal, e a velocidade imposta pelo gradiente é dada por:

$$U_{\text{Pitot}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (\text{A.2})$$

Onde

Δp = variação de pressão entre dois pontos;

ρ = massa específica do fluido.

A incerteza do cálculo das velocidades obtidas por tubos de Pitot é dada por

$$\delta U = \frac{U}{\rho} \left[\left(\frac{\rho^2}{U} \delta \Delta p \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \delta \rho \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

As incertezas isoladas da variação de pressão, $\delta \Delta p$, e da massa específica, $\delta \rho$, reportam se as incertezas de leitura do medidor de pressão utilizado.

A solução da equação (A.3), para todos os valores medidos leva a incertezas que situam se entre 1,2 e 7%.

Aplicando-se a equação (A.4) à equação (A.1), pode-se calcular a incerteza na determinação do número de Reynolds.

$$\delta R_e = R_e \left[\left(\frac{\delta U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\delta D_h}{D_h} \right)^2 + \left(\frac{\delta \nu}{\nu} \right)^2 + \right]^{1/2} \quad (\text{A.4})$$

Sonda de Fio Reto

Para a sonda de fio reto, a relação entre a tensão e a velocidade é dada por:

$$U = \left(\frac{E_r^2 - E_0^2}{B_r} \right)^{1/n_x} \quad (\text{A5})$$

Utilizando se a equação (A.1), obtém se o grau de incerteza para a sonda reta, dado por:

$$\delta U_r = \frac{U_r}{nx} \left[(\ln U_r \delta nx)^2 + \left(\frac{1}{B_r} \delta B_r \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot E_0}{E_r^2 - E_0^2} \delta E_0 \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot E_0}{E_r^2 - E_0^2} \delta E_r \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A.6)$$

Determinação das funções de Densidade Auto-Espectral

Frequência de aquisição dos dados	3,0 kHz
Numero de pontos.	131072
Tempo de aquisição (ts)	43,69 s
Largura de Banda- freq.. de aq./pontos por bloco(Be).....	2,93 Hz
Erro médio estatístico do espectro	8,83%

$$erro = \left(\sqrt{\frac{1}{(B_e)_{Hz} \cdot t_s}} \right) \times 100 \quad (A.7)$$

Determinação do erro referente ao número de Strouhal

Sendo o número de Strouhal definido por:

$$Str = \frac{f \sqrt{PD}}{U_c} \quad (A.8)$$

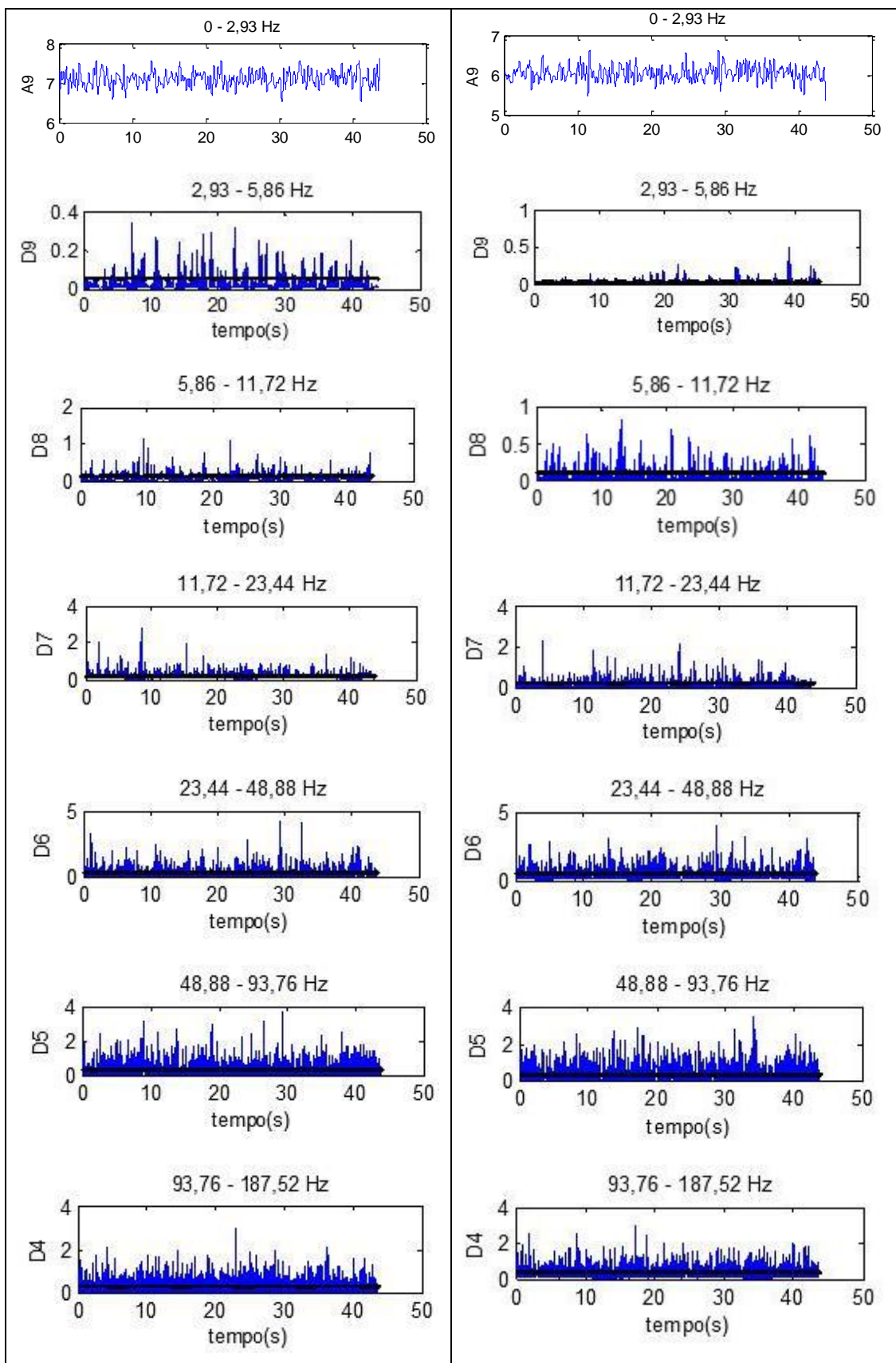
Onde f, P, D e U_c são respectivamente a frequência fundamental do espectro, a largura do canal, a largura da fenda e a velocidade de convecção. A incerteza na determinação dos valores de Strouhal, pela utilização da equação (A1), é dada por:

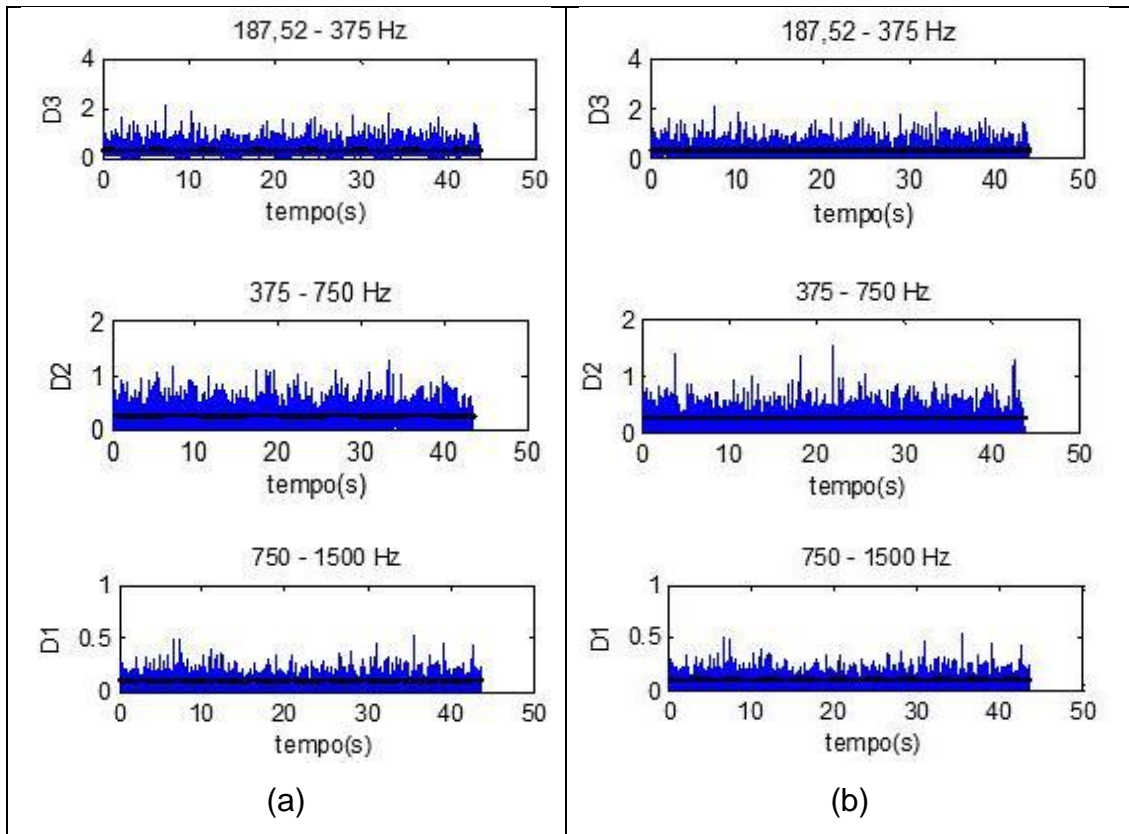
$$\delta Str = Str \left[\left(\frac{\delta f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\delta U_c}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A.9)$$

A solução da equação (A.9), passa, primeiramente pela solução da equação (A.3), pois a velocidade de convecção é obtida através de um tubo de Pitot. Quanto à incerteza na medição da frequência, esta pode ser calculada pela largura de banda, B_e , dos auto espectros de flutuação de velocidade, para todos os auto espectros mostrados $B_e = 2,92$ Hz.

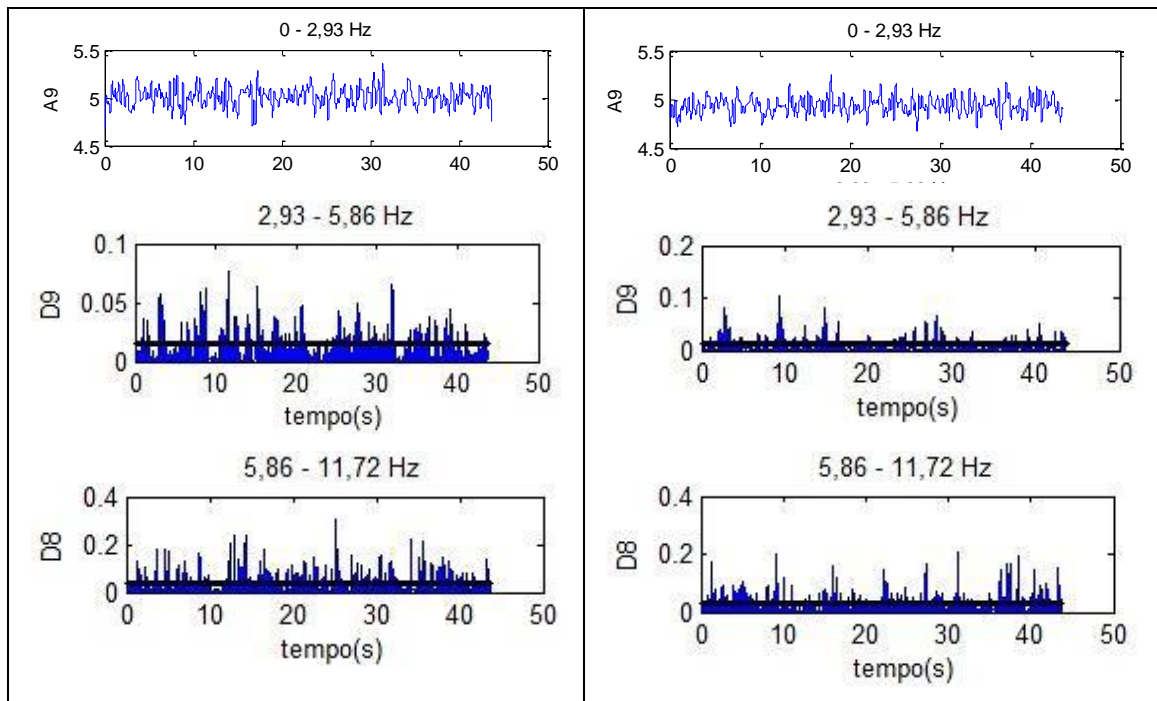
Portanto a solução da equação (A.7) leva a incertezas no cálculo do número de Strouhal que vão de 3,2 á 8%.

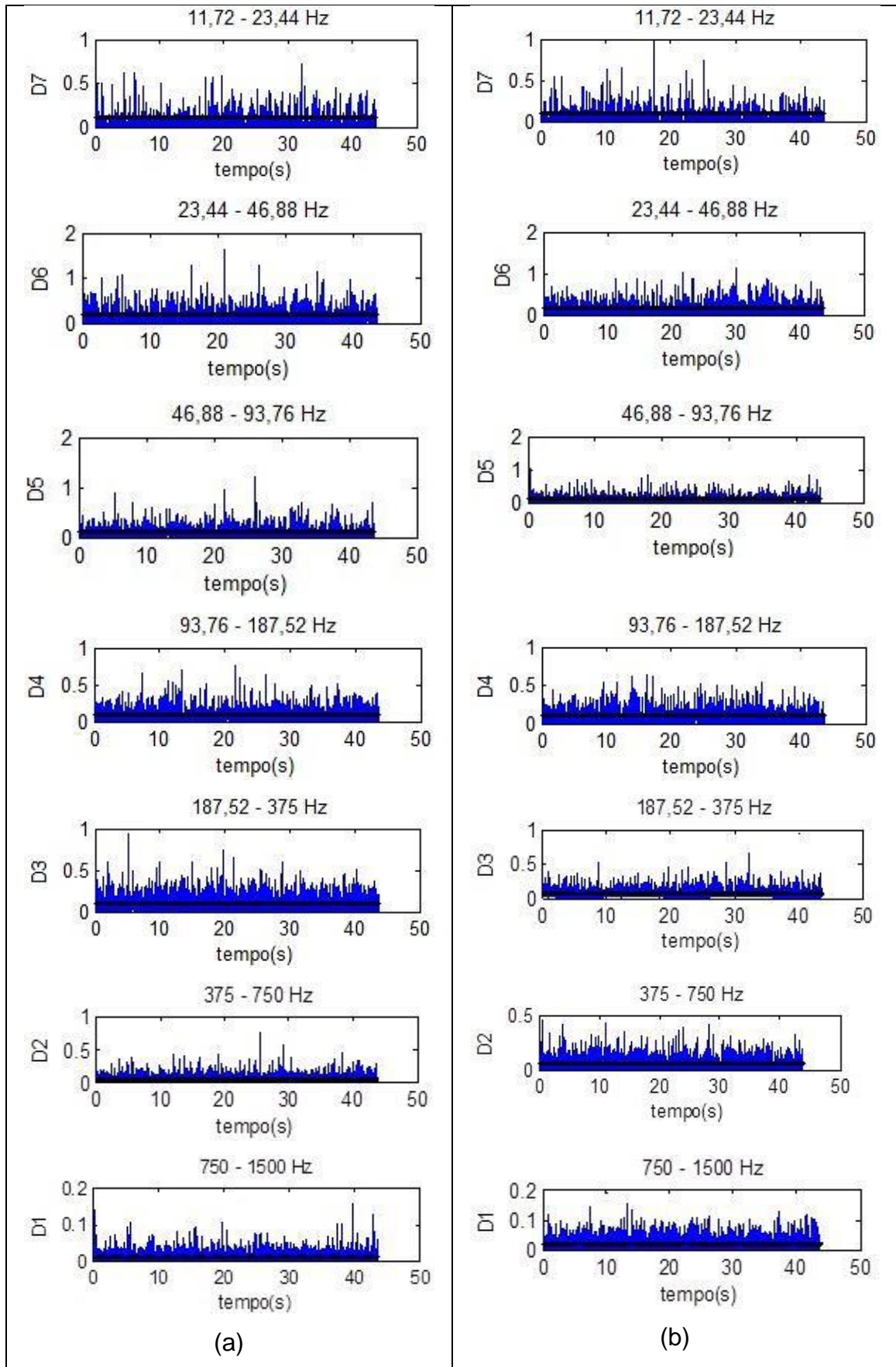
APÊNDICE B – Espectros de Ondaletas

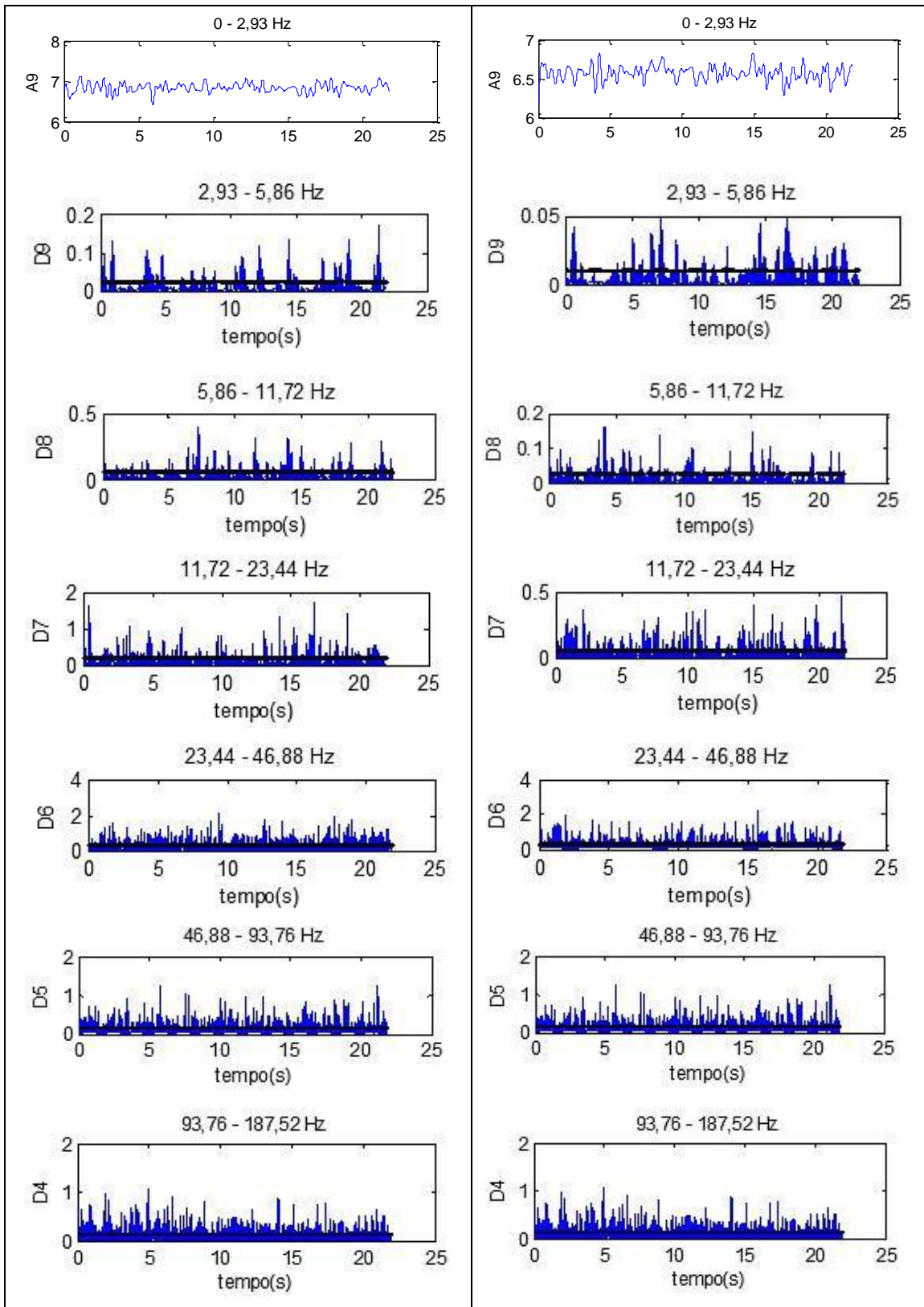


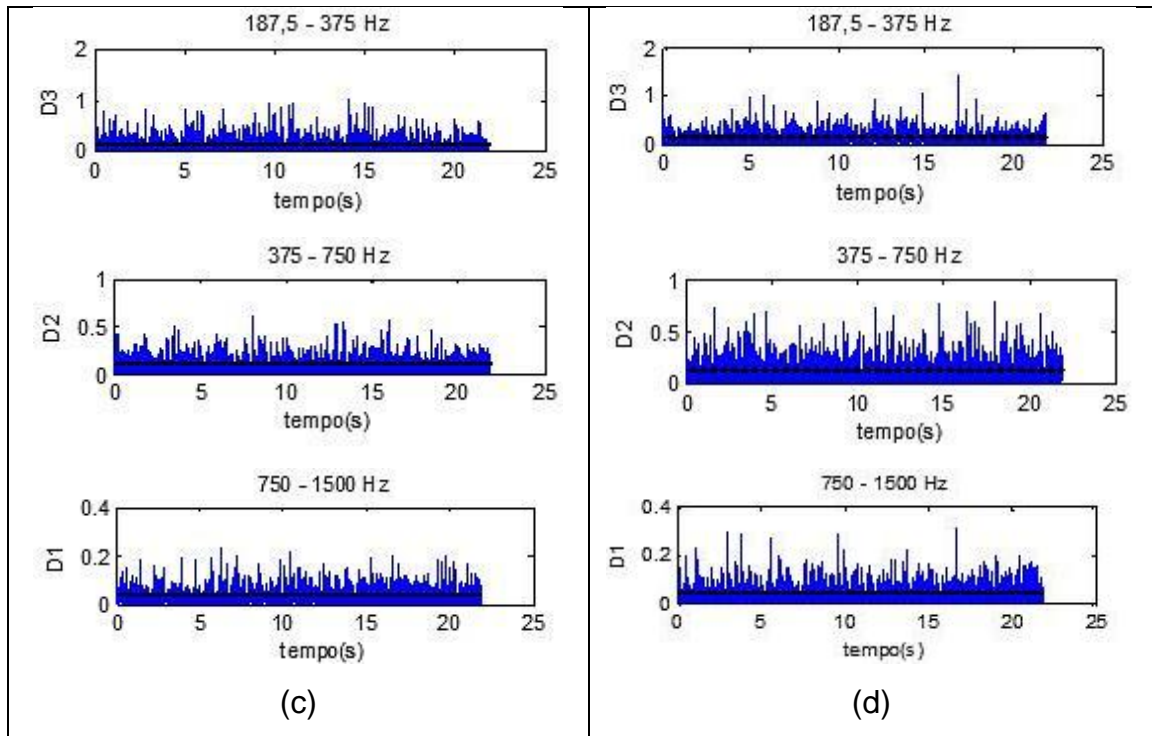


B 1 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D = 11$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm.

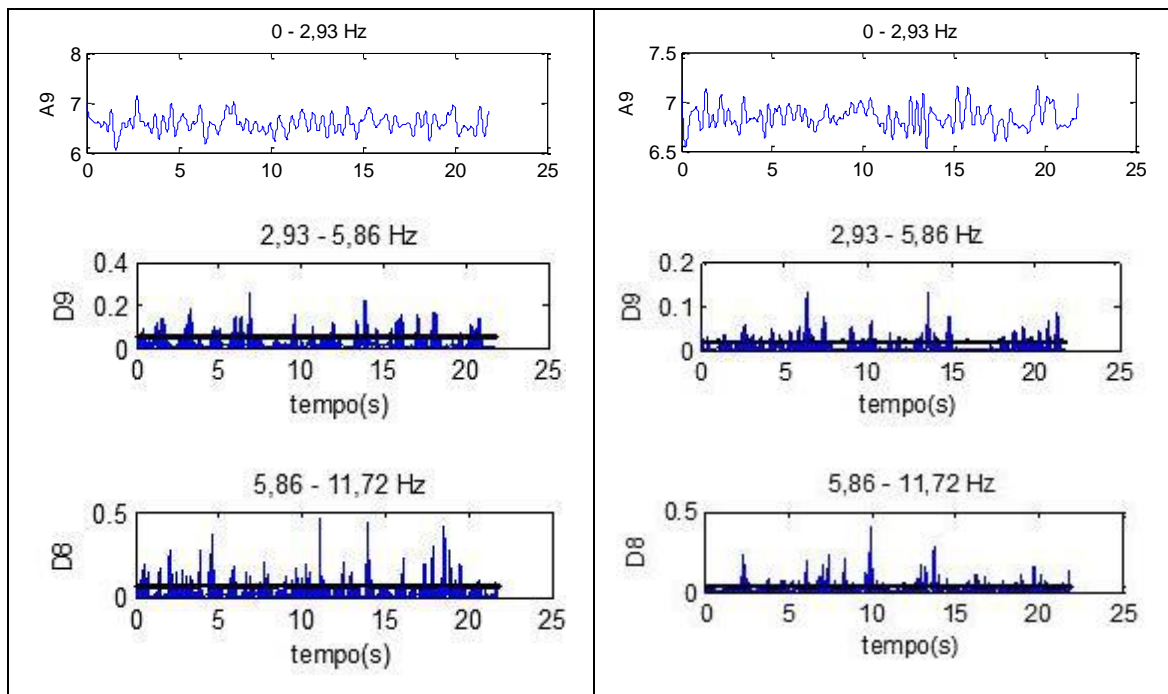


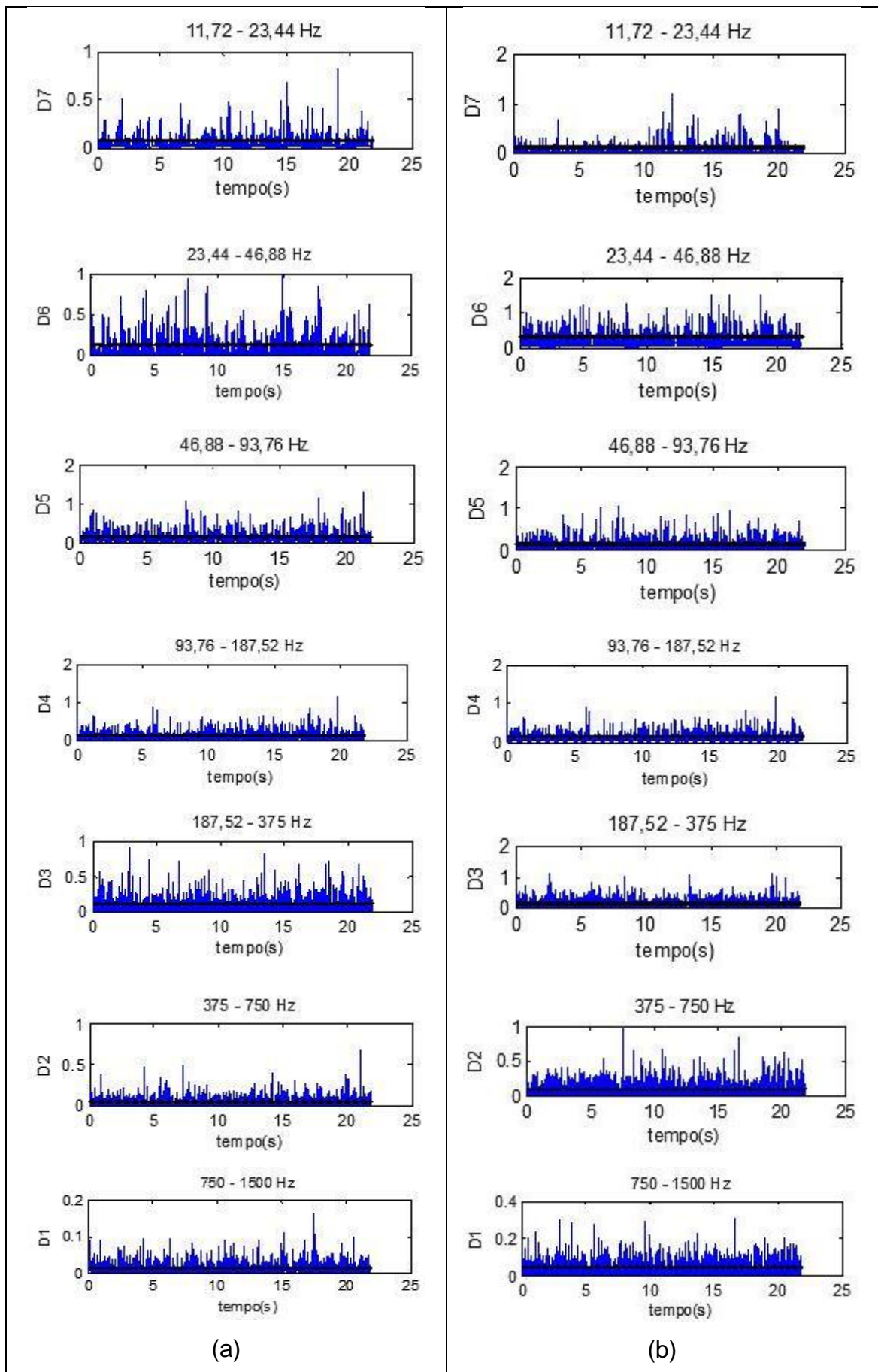


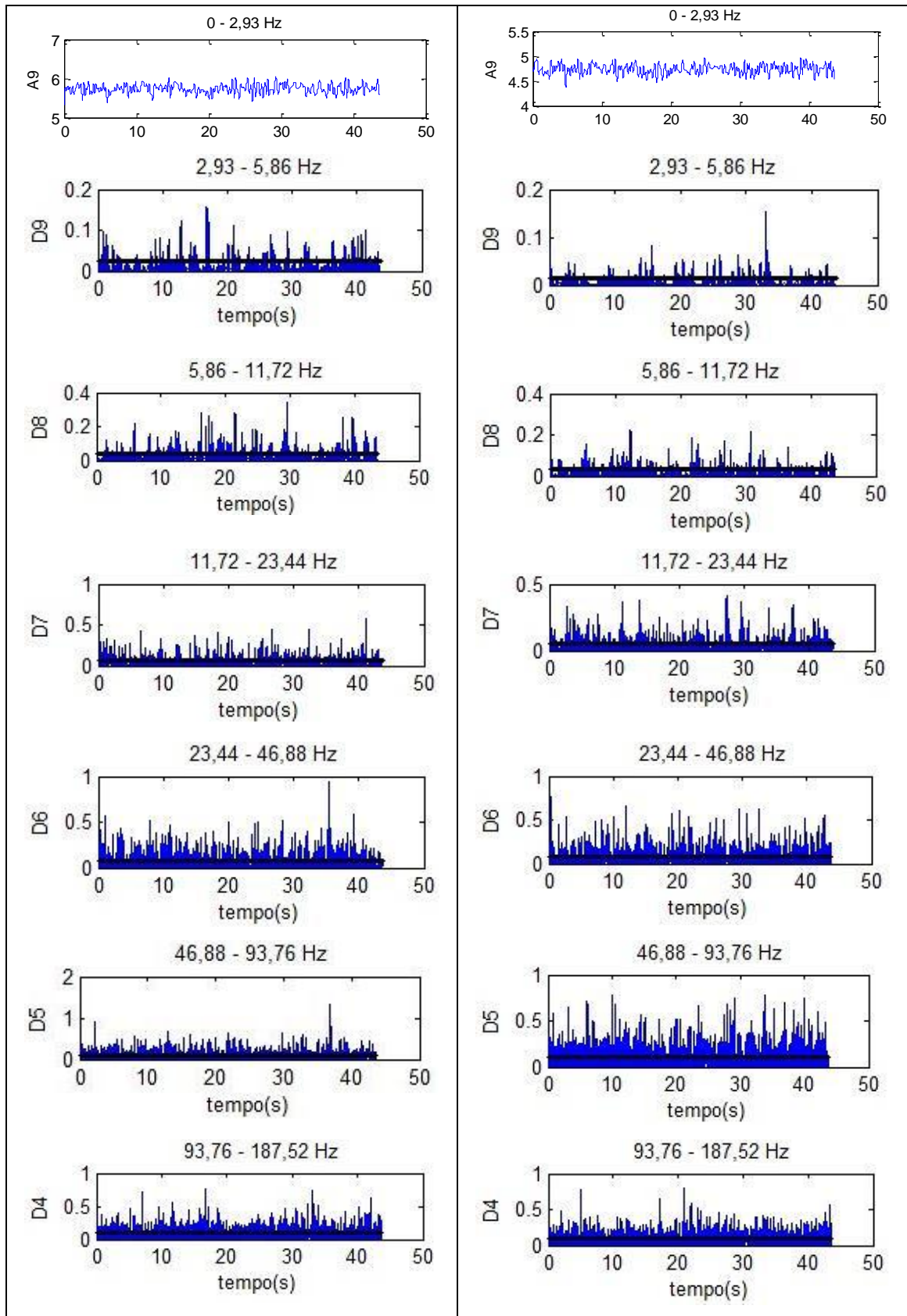


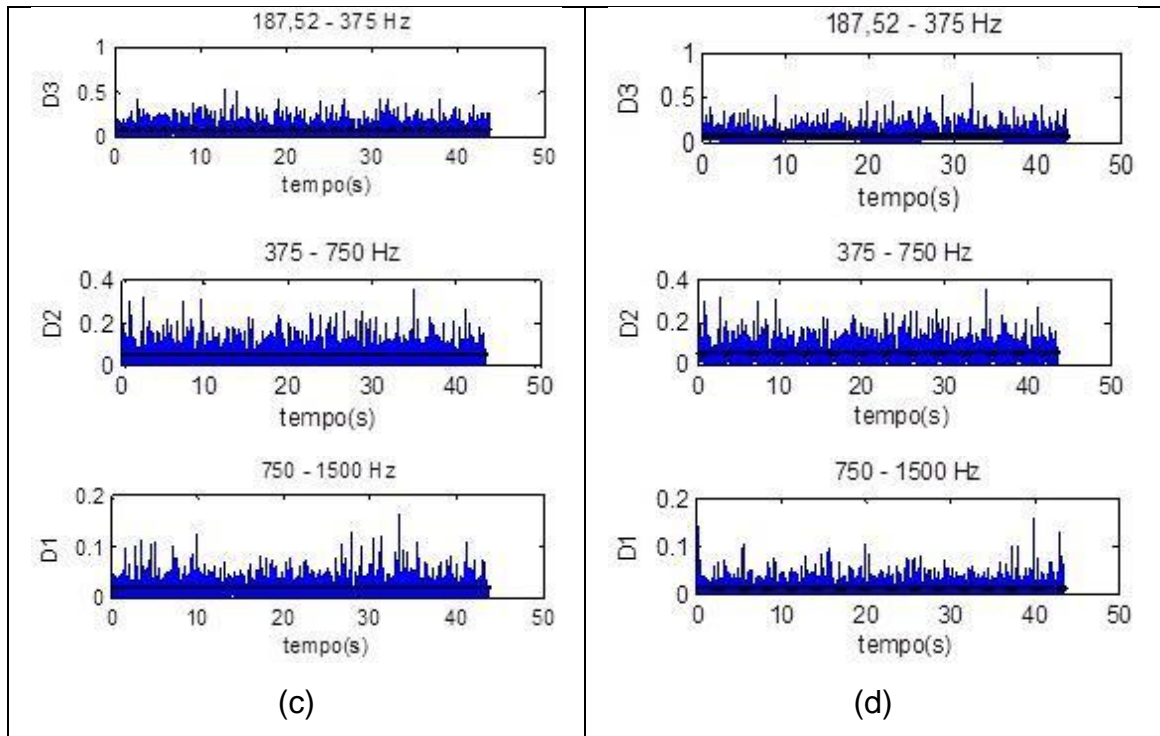


B 2 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D=5$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.

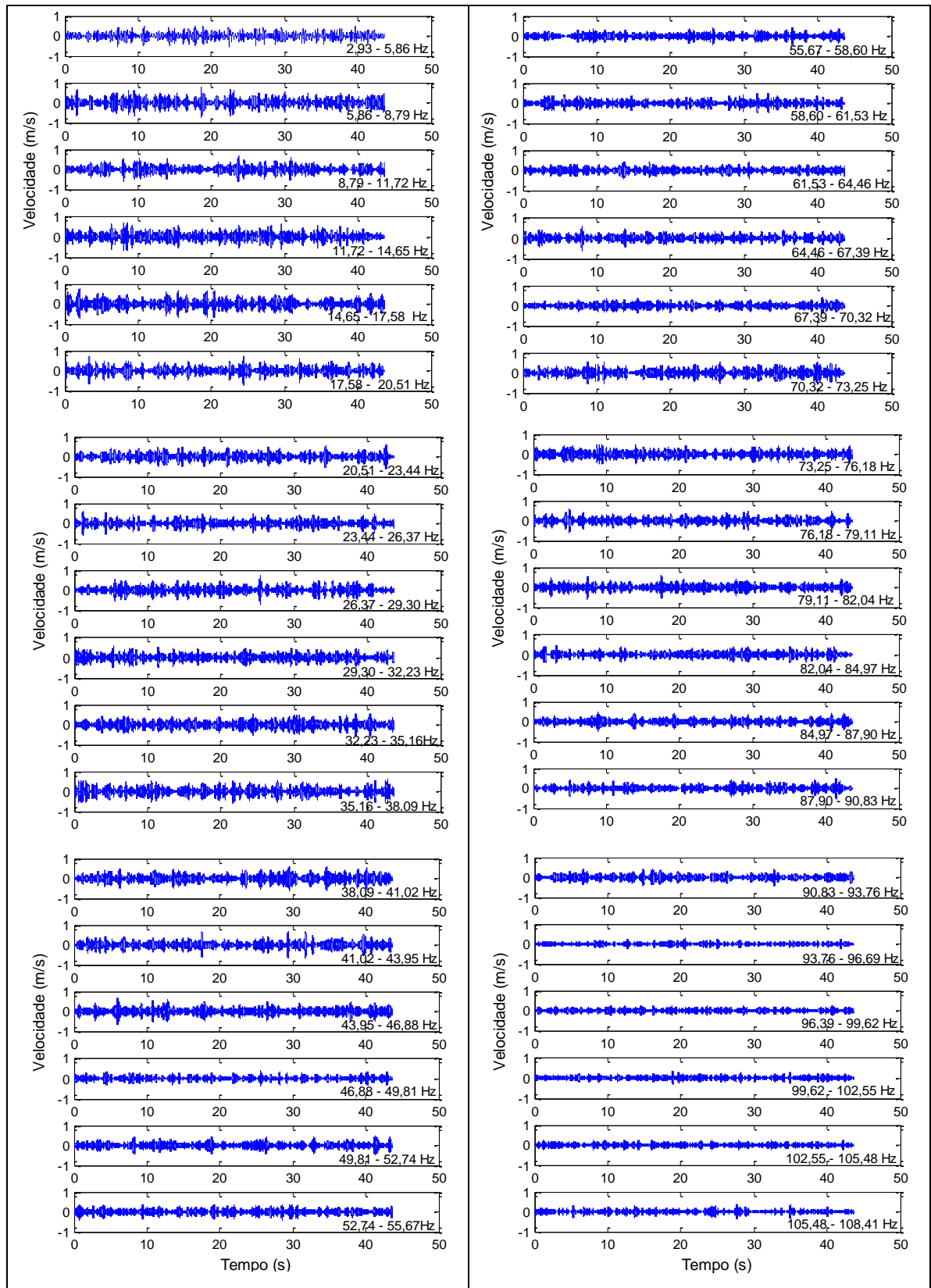




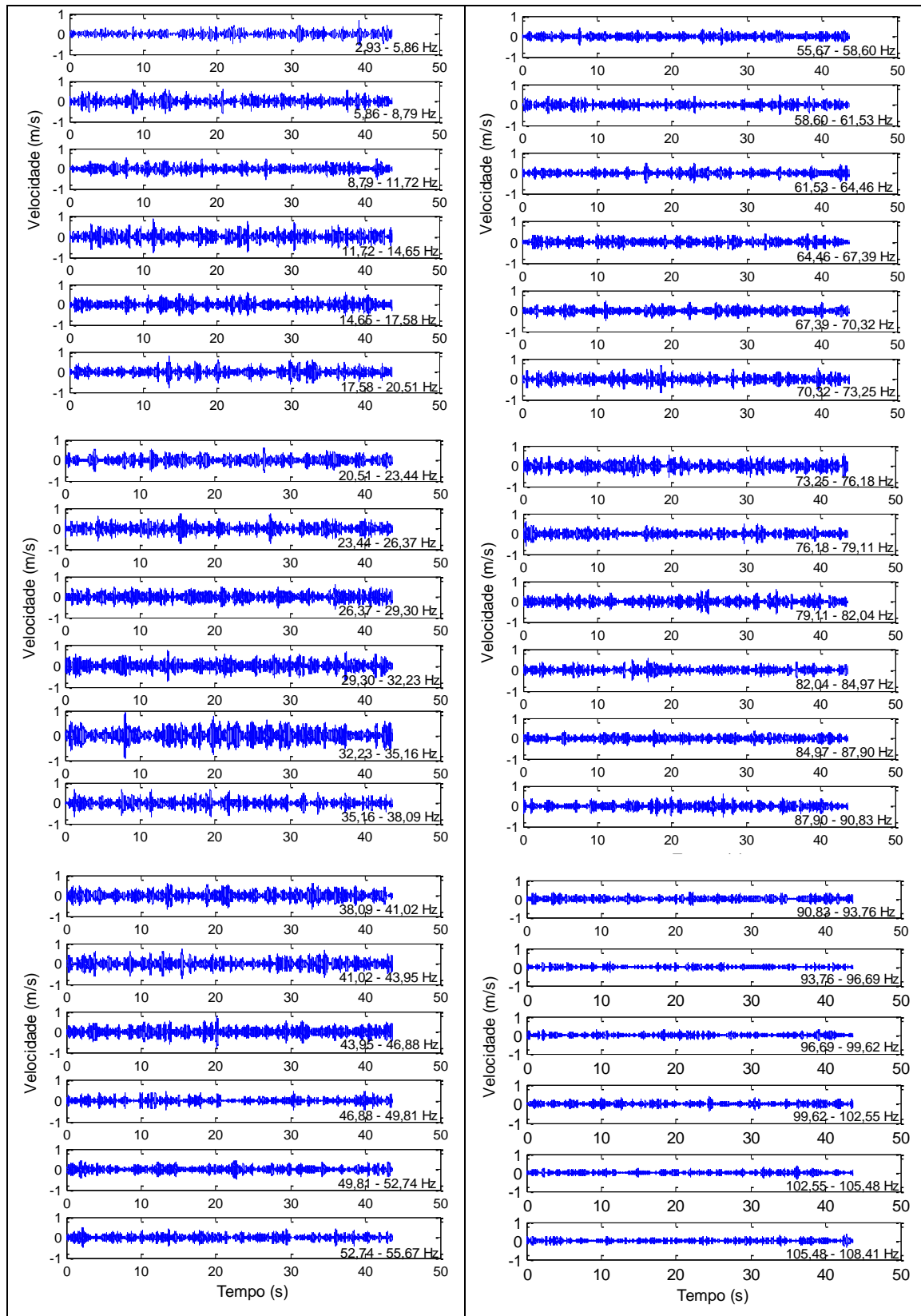




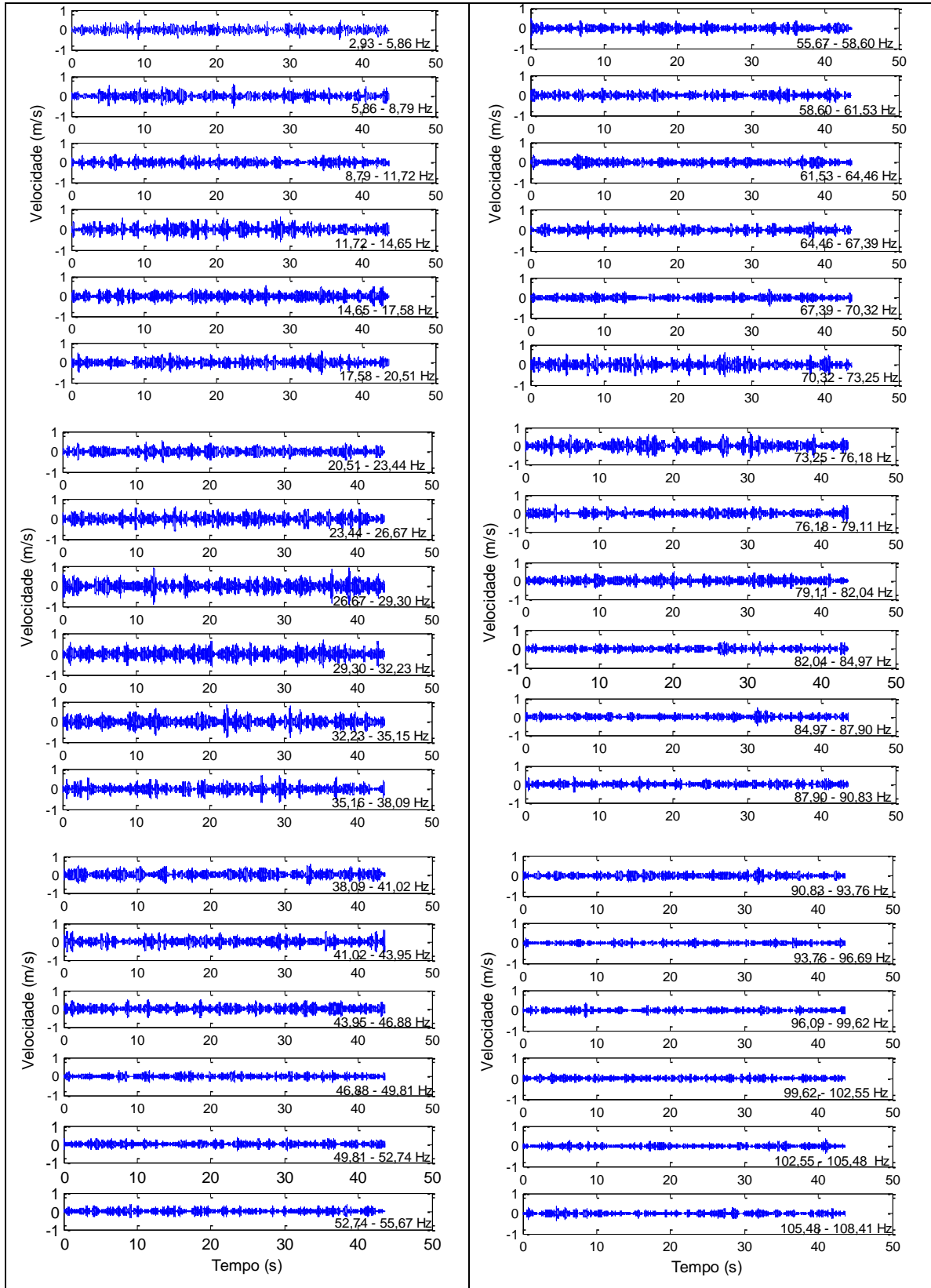
B 3 - reconstrução da aproximação e dos detalhes dos sinais com relação $P/D = 3,33$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.



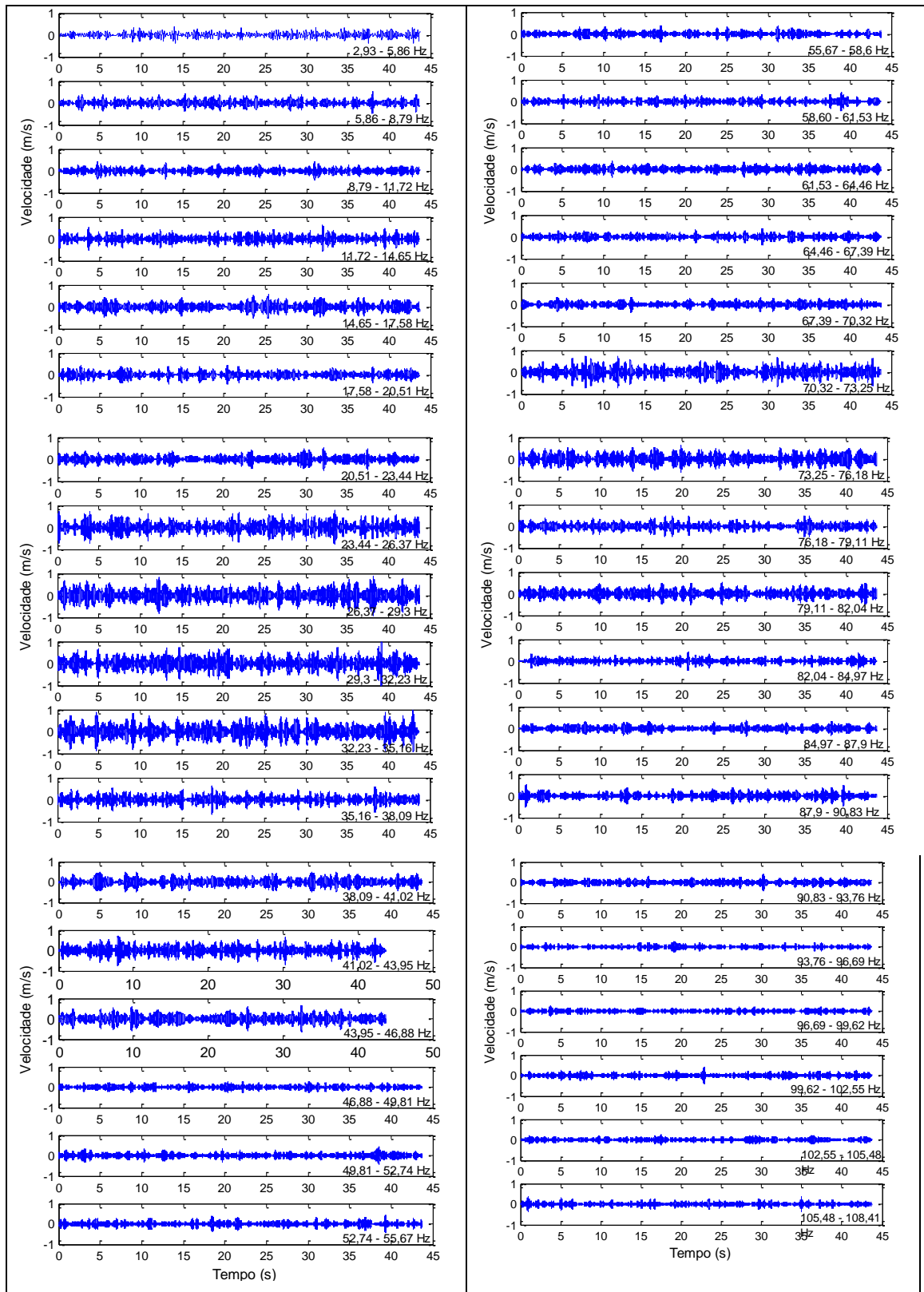
(a)



(b)

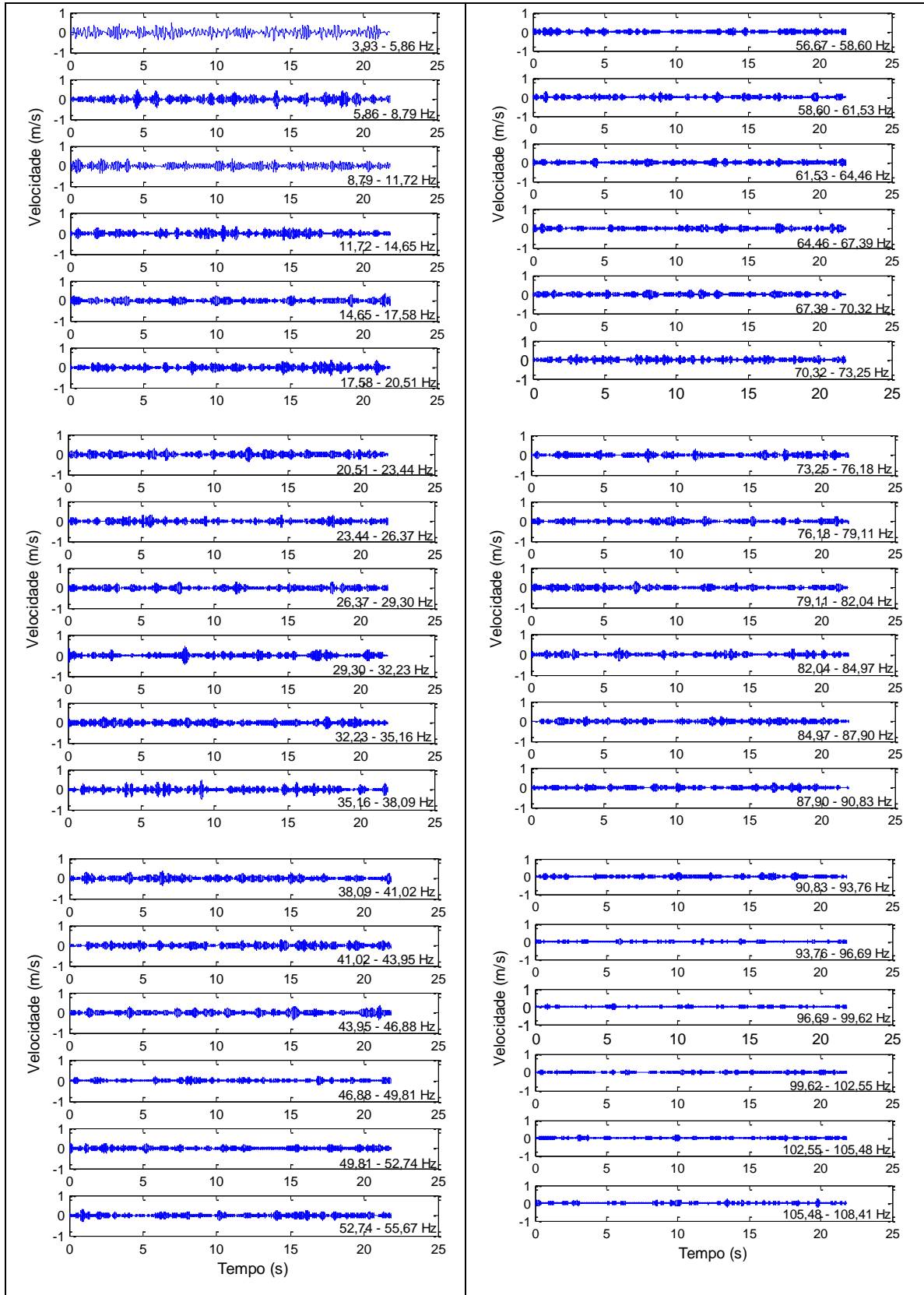


(c)

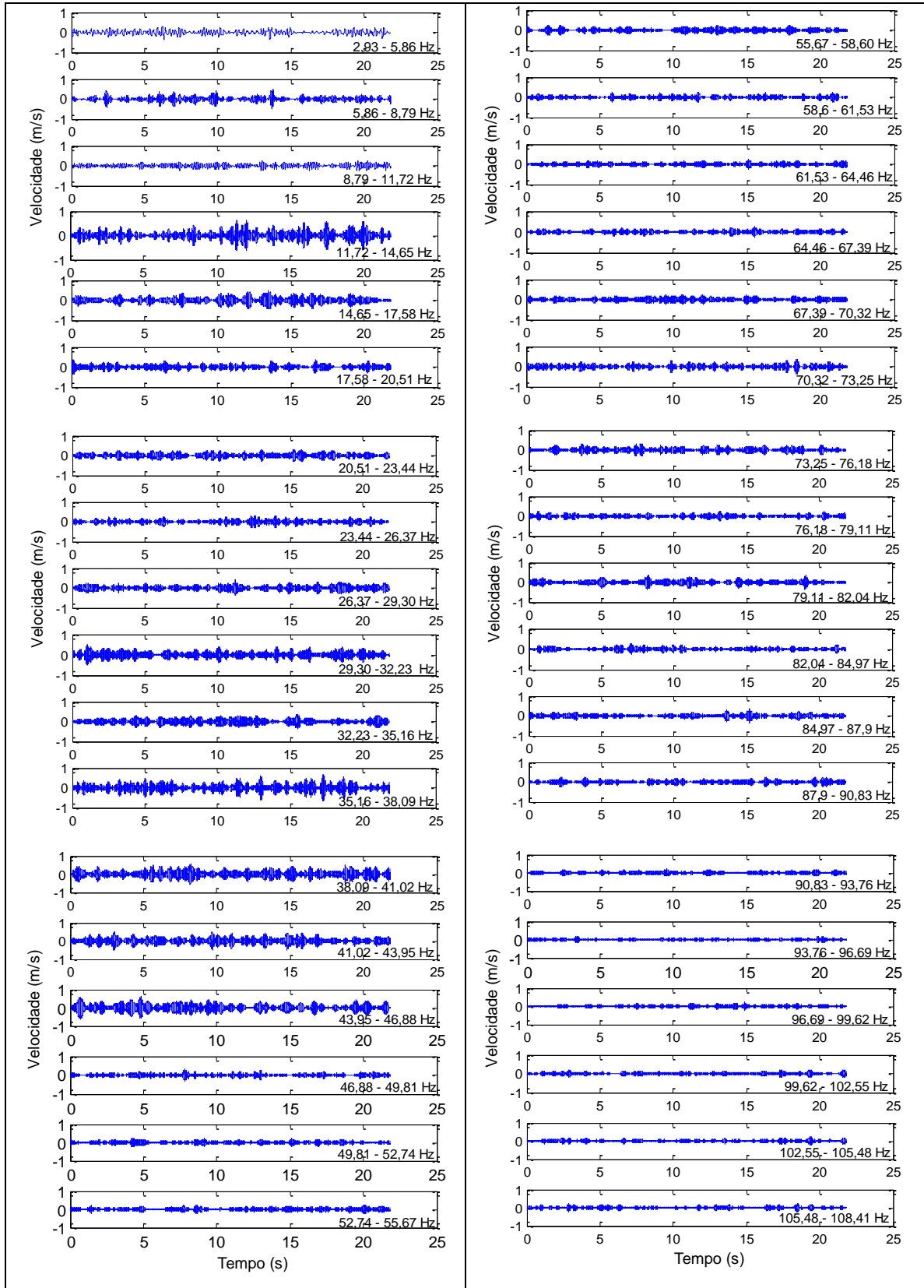


(d)

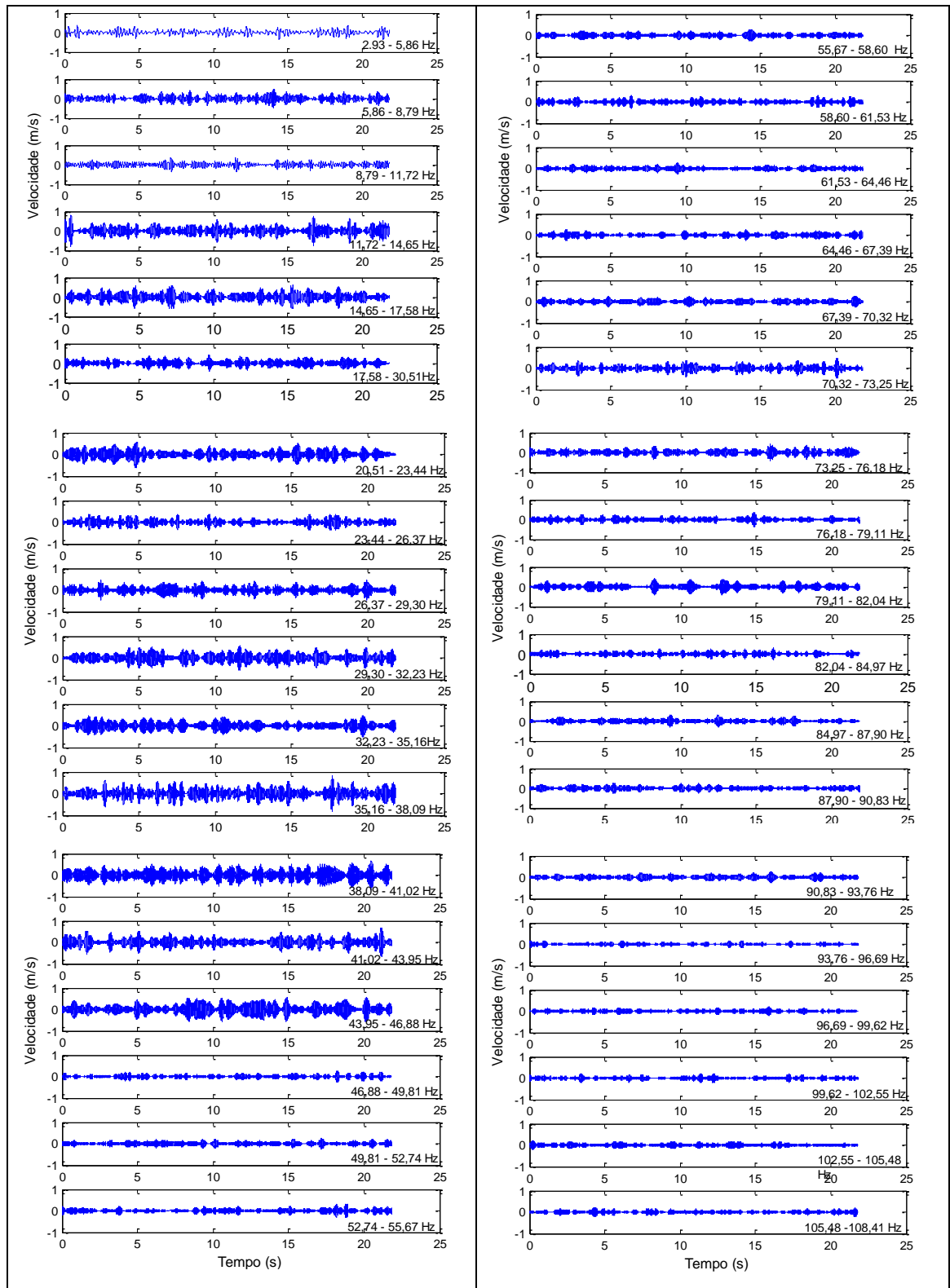
B 4 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D=11$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm, (d) $L=1500$ mm.



(a)

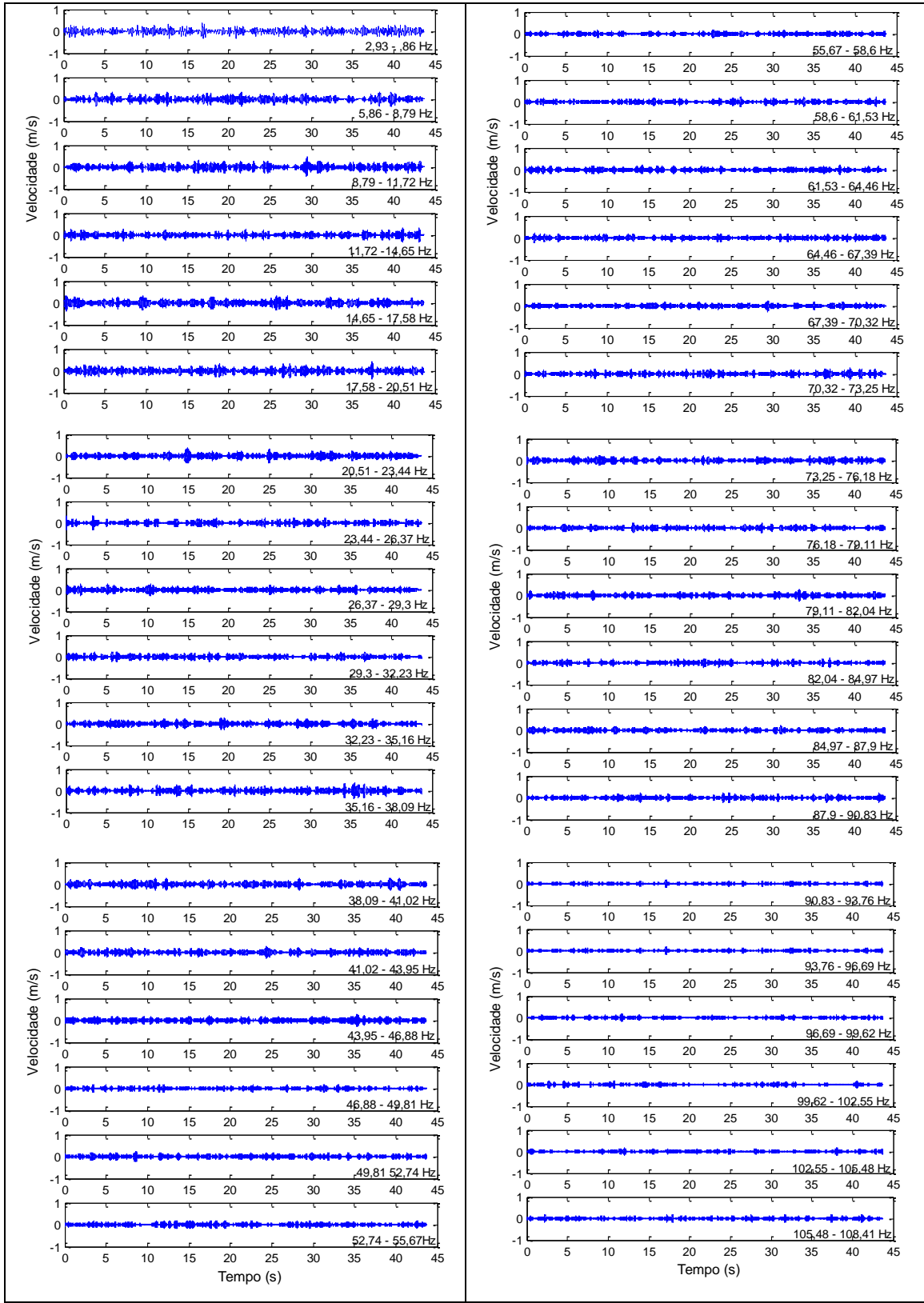


(b)

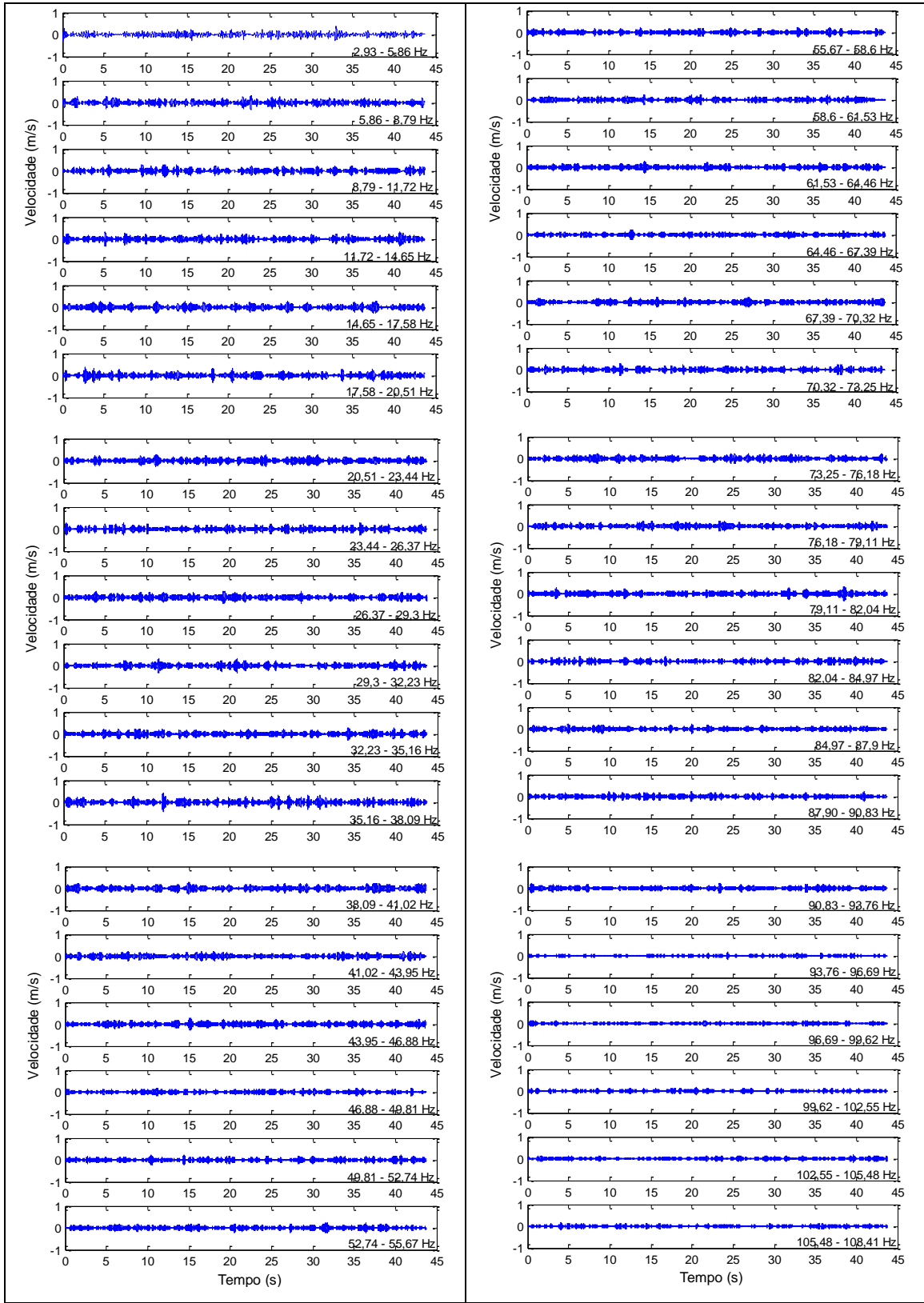


(c)

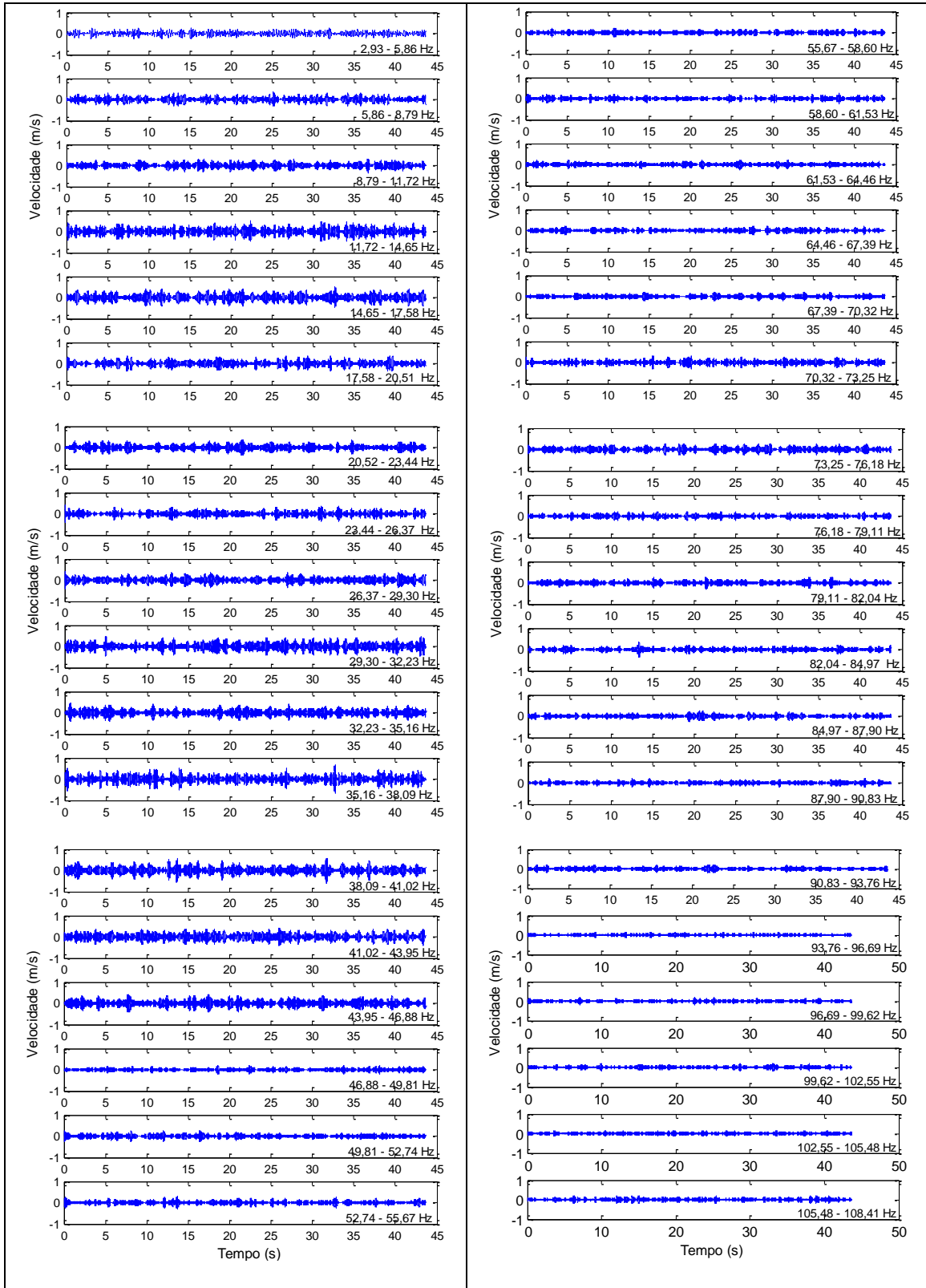
B 5 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D=5$. (a) $L=250$ mm, (b) $L=500$ mm, (c) $L=1000$ mm.



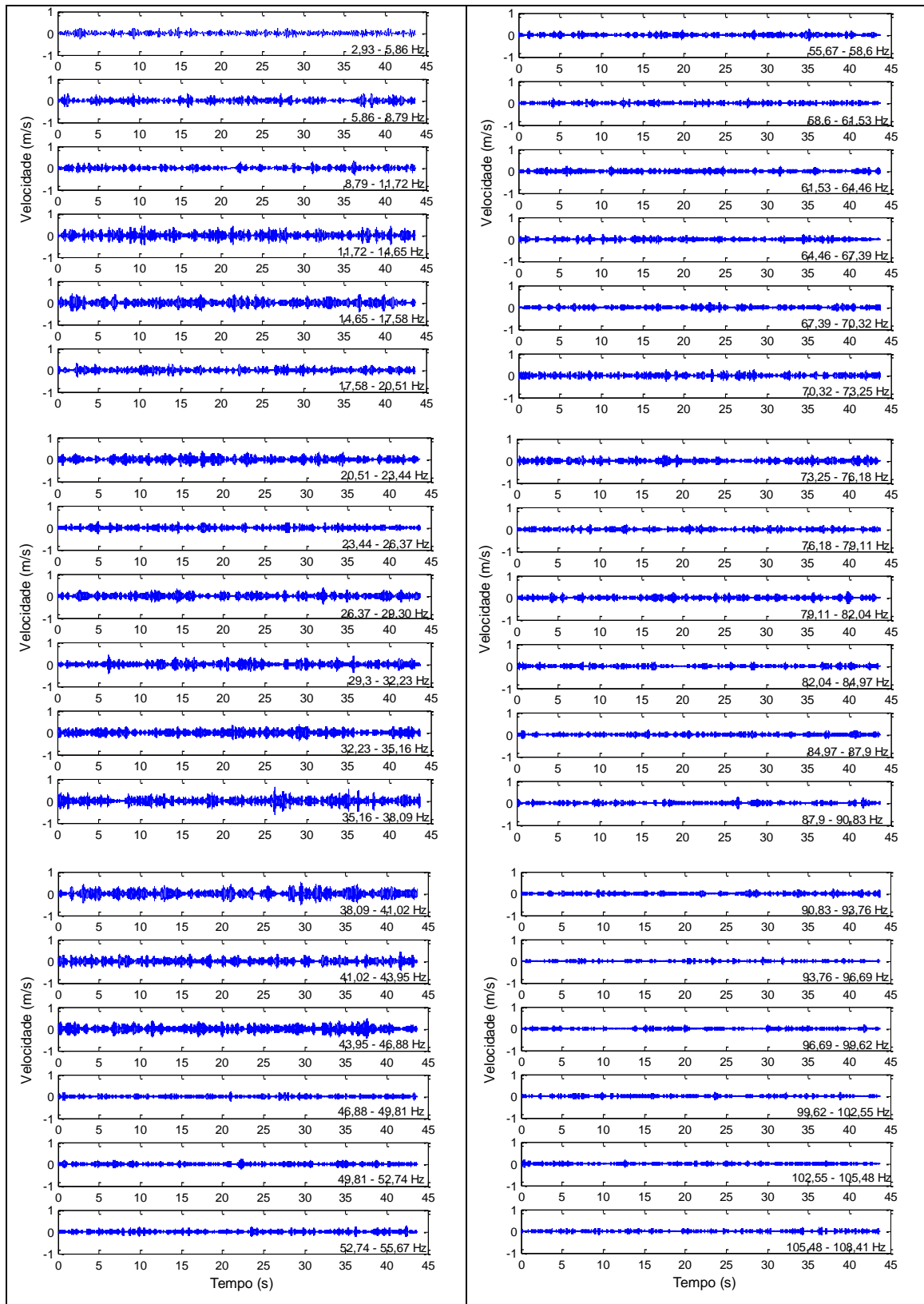
(a)



(b)



(c)



(d)

B 6 - Análise dos sinais por meio da transformada de pacotes de ondaletas com relação de $P/D = 3,33$. (a) $L = 250$ mm, (b) $L = 500$ mm, (c) $L = 1000$ mm, (d) $L = 1500$ mm.