

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE ESPAÇAMENTO E DA  
INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA NO ESCOAMENTO BIESTÁVEL EM DOIS  
CILINDROS PARALELOS

por

Ana Paula Ost

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2015

ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE ESPAÇAMENTO E DA  
INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA NO ESCOAMENTO BIESTÁVEL EM DOIS  
CILINDROS PARALELOS

por

Ana Paula Ost  
Bacharela em Engenharia Mecânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Aprovada por:

Prof. Dr. Acir Mércio Loredou-Souza, .....PPGEC / UFRGS

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriane Prisco Petry, ..... PROMEC / UFRGS

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Luiza Sperb Indrusiak, .....PPGEM/UNISINOS

Prof. Dr. Luiz Alberto O. Rocha  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2015

*Quando eu encontrar Deus, vou fazer-lhe duas perguntas:  
‘Porque a Relatividade?’  
e ‘Porque a turbulência?’  
Acredito que ele terá uma resposta para a primeira.*

*Werner Heisenberg*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que estiveram comigo nesta caminhada, a minha família e amigos, e em especial ao meu orientador professor Dr. Sérgio V. Möller, por seus sábios conselhos. Agradeço também aos meus colegas de laboratório, Roberta e Marcos, pelo apoio e pela ajuda prestada durante o processo de aprendizado e ao professor Dr. Alexandre pelo auxílio durante os procedimentos experimentais. Um obrigado especial também à Luiz Felipe, por ouvir-me discutir incansavelmente o assunto e pelas palavras motivadoras nos momentos de dúvida. Obrigado a Capes e a Cnpq pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental acerca da influência da razão de espaçamento e da intensidade de turbulência no escoamento biestável. É estudado o escoamento sobre dois cilindros dispostos lado a lado, para o canal aerodinâmico com intensidade de turbulência inferior a 1%, para o canal aerodinâmico com grade promotora de turbulência com intensidade de turbulência de 8 a 7%, e para uma seção do canal aerodinâmico sem paredes laterais. A técnica experimental aplicada consiste na medição das flutuações de velocidade no canal aerodinâmico utilizando a técnica da anemometria de fio quente. As medições são realizadas com duas sondas, uma fixa e outra móvel que foi posicionada em seis pontos diferentes do escoamento. Os dados medidos são tratados através de ferramentas estatísticas, análise espectral e transformadas de ondaletas. Os resultados confirmam a existência do fenômeno da biestabilidade e mostram como o fenômeno sofre alterações quando exposto às condições de maior intensidade de turbulência e redução da razão de bloqueio pela retirada das paredes laterais em uma seção do canal. Para a condição de maior intensidade de turbulência, os resultados mostram que as trocas de modo se intensificam, e em alguns dos pontos de medição os sinais referentes à sonda móvel não apresentam características de biestabilidade. Para o caso sem paredes laterais, os sinais apresentam características de biestabilidade até o momento em que as paredes são removidas.

Palavras-chave: Biestabilidade; intensidade de turbulência; razão de espaçamento; estudo experimental.

## **ABSTRACT**

This work presents an experimental study, about the influence of the pitch to diameter ratio and the turbulence intensity on a bistable flow. The flow through two cylinders side-by-side is studied in an aerodynamic channel with turbulence intensity lower than 1%, in an aerodynamic channel with a turbulence grid, that increased the turbulence intensity to about 8 to 7%, and a section of the aerodynamic channel without lateral walls. The experimental technique consists in the measurements of the fluctuating velocities in the aerodynamic channel, using hot wire anemometry. The measurements are performed with two probes, one static, and one movable, positioned in six different points of the flow. The acquired data are analysed through statistical, spectral and wavelet tools. The results confirmed the occurrence of the bistable phenomenon and shows how it behaves when exposed to different conditions of turbulence intensity, and reduction of the blockage ratio aspect due to removal of the lateral walls of a channel section. The results for the higher turbulence intensity condition shows that the switches are intensified, some data resulting of the measurements of the second probe, do not show bistable characteristics. In the no-walls section case, the signals showed bistable features, until the moment the walls were removed.

**Keywords:** Bistability, turbulence intensity, pitch to diameter ratio, experimental study.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	Biestabilidade .....	4
2.2	Turbulência de grade .....	7
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>11</b>
3.1	Análise no domínio do tempo e da frequência .....	11
3.2	Metodologia Experimental .....	14
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>21</b>
4.1	Resultados para o canal aerodinâmico sem grade (Intensidade turbulenta $\approx 1\%$ )... 21	
4.1.1	Razão de espaçamento $p/d = 1,26$ .....	21
4.1.2	Razão de espaçamento $p/d = 1,16$ .....	31
4.1.3	Razão de espaçamento $p/d = 1,6$ .....	36
4.2	Canal aerodinâmico com grade promotora de turbulência. ....	41
4.2.1	Razão de espaçamento $p/d = 1,26$ .....	42
4.2.2	Razão de espaçamento $p/d = 1,16$ .....	50
4.2.3	Razão de espaçamento $p/d = 1,6$ .....	58
4.3	Medições em seção do canal aerodinâmico sem paredes laterais.....	63
4.3.1	Razão de espaçamento $p/d = 1,16$ .....	63
4.3.2	Razão de espaçamento $p/d = 1,26$ .....	66
4.3.3	Razão de espaçamento $p/d = 1,6$ .....	69
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
5.1	Discussões.....	71
5.2	Conclusões.....	74
5.3	Sugestões para trabalhos futuros .....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE A – Análise de incertezas.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – Procedimento de calibração de sondas de fio quente em canal aerodinâmico .....</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do fenômeno da biestabilidade para dois cilindros lado a lado (a) Modo 1 (b) Modo 2 e seus sinais característicos (c). Adaptado de De Paula, 2013. ....	5
Figura 3.1 – Ilustração do canal aerodinâmico para intensidade de turbulência $Tu \approx 1\%$ . ....	14
Figura 3.2 – Ilustração do canal aerodinâmico e posicionamento dos cilindros na seção sem paredes laterais. ....	15
Figura 3.3 – Representação da geometria da grade promotora de turbulência.....	16
Figura 3.4 – Curva do comportamento da intensidade de turbulência da componente axial da velocidade ( $Tu$ ) no canal aerodinâmico em função da distância a jusante da grade. ....	16
Figura 3.5– Ilustração esquemática do canal aerodinâmico e posicionamento da grade promotora de turbulência.....	17
Figura 3.6 – Variação da intensidade de turbulência da componente axial da velocidade ( $Tu$ ) ao longo da largura do canal aerodinâmico (L), onde (—♦—) com grade e (—●—) sem grade. ....	17
Figura 3.7 – Variação da velocidade média da componente axial ao longo da largura do canal aerodinâmico (L) para as condições (—♦—) com grade e (—●—) sem grade. ....	18
Figura 3.8 – Esquemática das posições de medição utilizadas no canal com intensidade de turbulência inferior a 1% e no canal aerodinâmico com grade. ....	19
Figura 4.1 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas a $x = 10$ mm do centro dos cilindros na posição A. ....	22
Figura 4.2 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm e $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2. ....	23
Figura 4.3 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.2 através de DWT, tipo Db20. (— V1) (— V2). ....	23
Figura 4.4 – Espectrogramas de energia dos sinais de velocidade instantânea da Figura 4.2. (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2.....	24
Figura 4.5 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição B. ....	25
Figura 4.6 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição C. ....	25
Figura 4.7 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição D.....	26

Figura 4.8 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V3. (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4)	27
Figura 4.9 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V5. (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6)	27
Figura 4.10 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V7. (b) Sonda 2-V8 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V7) (— V8)	27
Figura 4.11 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição E	28
Figura 4.12 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição F	28
Figura 4.13 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V9, (b) Sonda 2-V10 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V9) (— V10).	29
Figura 4.14 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V11, (b) Sonda 2-V12 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V11) (— V12).	29
Figura 4.15 – Esquema do comportamento das esteiras em relação ao posicionamento das sondas (sonda 1-V9 e sonda 2-V10), na posição E.	30
Figura 4.16 – Função densidade espectral de potência para os sinais de velocidade (a) Sonda 2-V10 e (b) Sonda 2-V12. Razão de espaçamento $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz.	31
Figura 4.17 - Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm e $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2.	33
Figura 4.18 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.17 através de DWT tipo Db20. (— V1) (— V2).	33
Figura 4.19 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.17. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.	34
Figura 4.20 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V3, (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V3) (— V4).	35
Figura 4.21 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1$ kHz, $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V5, (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V5) (— V6).	35

Figura 4.22 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm e $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2 .....	36
Figura 4.23 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.22 através de DWT tipo Db20 (— V1) (— V2). .....	37
Figura 4.24 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.22. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2 .....	38
Figura 4.25 – Sinais de velocidade instantânea da Figura 4.22 para o intervalo de tempo de 0,6 a 1,6 segundos. (—) V1 (—) V2. ....	39
Figura 4.26 – Espectrograma de energia dos sinais de velocidade da Figura 4.25, para o intervalo de tempo de 0,6 a 1,6 segundos. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2. ....	39
Figura 4.27 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1000$ Hz, e $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V3. (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V3) (— V4). .....	40
Figura 4.28 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para $f_s = 1000$ Hz, e $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V5. (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V5) (— V6). .....	41
Figura 4.29 – Sinal de Velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade, na posição A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2. ....	43
Figura 4.30 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.29 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2). ....	43
Figura 4.31 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.29. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2 .....	44
Figura 4.32 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 1,25 a 2 segundos da Figura 4.29. (—) V1 (—) V2. ....	45
Figura 4.33 – Espectrograma de energia dos sinais de velocidade da Figura 4.32, para o intervalo de tempo de 1,25 a 2 segundos. (a) Sonda 1-V1 (b) Sonda 2-V2. ....	45
Figura 4.34 - Sinais de velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz a $x = 150$ mm na posição B. (a) Sonda 1-V3 (b) Sonda 2-V4. ....	46
Figura 4.35 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.34 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4). ....	46
Figura 4.36 – Sinais de velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade na posição C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6. ....	47
Figura 4.37 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.36 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6). ....	47

Figura 4.38 – Sinais de velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade na posição D. (a) Sonda 1-V7 e (b) Sonda 2-V8.....	48
Figura 4.39 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.38 através de DWT, tipo Db20 (— V7) (— V8). .....	48
Figura 4.40 – Sinais de velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade na posição E. (a) Sonda 1-V9 e (b) Sonda 2-V10. ....	49
Figura 4.41 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.40 através de DWT, tipo Db20 (— V9) (— V10). ....	49
Figura 4.42 – Sinal de Velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade na posição F. (a) Sonda 1-V11 e (b) Sonda 2-V12. ....	50
Figura 4.43 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.42 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V11) (— V12). ....	50
Figura 4.44 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,16$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.....	52
Figura 4.45 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.44 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2). ....	52
Figura 4.46 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.44. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2 .....	53
Figura 4.47 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos da Figura 4.42.. (—)V1 (—)V2. ....	54
Figura 4.48 – Espectrograma dos sinais de velocidade da Figura 4.45, para o intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos. (a) Sonda 1-V1 (b) Sonda 2-V2 .....	54
Figura 4.49 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,16$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto B. (a) Sonda 1-V3 e (b) Sonda 2-V4.....	55
Figura 4.50 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.49 através de DWT, tipo Db20 (— V3) (— V4). ....	56
Figura 4.51 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 16 a 19 segundos da Figura 4.49. (—)V3 (—)V4. ....	56
Figura 4.52 – Espectrograma dos sinais de velocidade da Figura 4.51, para o intervalo de tempo de 16 a 19 segundos. (a) sonda 1-V3 (b) sonda 2-V4.....	56
Figura 4.53 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,16$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6.....	57
Figura 4.54 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.53 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6). ....	58

Figura 4.55 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,6$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.....	59
Figura 4.56 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.55 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2).....	59
Figura 4.57 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.55. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.....	60
Figura 4.58 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,6$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto B. (a) Sonda 1-V3 e (b) Sonda 2-V4.....	61
Figura 4.59 – Aproximação dos sinais de velocidade instantânea da Figura 4.58 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4).....	61
Figura 4.60 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,6$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 150$ mm da grade no Ponto C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6.....	62
Figura 4.61 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.60 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6).....	62
Figura 4.62 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e posicionamento da sonda a $x = 10$ mm do centro do cilindro da esquerda. ....	63
Figura 4.63 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,16$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em $t = 30$ segundos.....	64
Figura 4.64 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.62 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	65
Figura 4.65 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para $p/d = 1,16$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes. ....	65
Figura 4.66 – Aproximação do sinal de velocidade transiente da Figura 4.64 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	66
Figura 4.67 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em $t = 30$ segundos.....	67
Figura 4.68 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.66 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	67
Figura 4.69 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para $p/d = 1,26$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes. ....	68
Figura 4.70 – Aproximação do sinal de velocidade transiente da Figura 4.68 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	68

Figura 4.71 – Sinal de velocidade para $p/d = 1,6$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em $t = 30$ segundos. ....	69
Figura 4.72 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.70 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	70
Figura 4.73 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para $p/d = 1,6$ , $f_s = 1000$ Hz, $x = 10$ mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes. ....	70
Figura 4.74 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.72 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). ....	71
Figura B. 1 – Relação Típica entre tensão e velocidade resultante da calibração. ....	83
Figura B. 2 – Variação do erro da calibração com a velocidade. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Nomeclatura dos sinais de velocidade obtidos pelas sondas 1 e 2 e suas respectivas posições.....	19
Tabela 4.1 – Momentos estatísticos do sinais de velocidade V10 e V12, para $f_s = 1$ kHz e p/d 1,6. ....	31
Tabela 4.2 – Momentos estatísticos para o sinal de velocidade instantânea V6, para $f_s = 1$ kHz e p/d 1,6, no ponto de medição B .....	41
Tabela 4.3 – Momentos estatísticos para os sinais de velocidade instantânea V4 e V6, para $f_s = 1$ kHz e p/d 1,6. ....	63
Tabela 5.1 – Comparativo entre os sinais para as diferentes intensidades de turbulência para o sinal V1 no ponto de medição A. ....	73
Tabela A. 1 – Resolução dos principais instrumentos utilizados. ....	81
Tabela B. 1 – Registro típico de uma calibração do sensor de velocidade.....	82

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CTA	<i>Constant Temperature Anemometry</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> ou Transformada Discreta de Ondaletas
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PVC	Policloreto de Polivinila
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Coeficiente de escala
$b$	Coeficiente de posição
$d$	Diâmetro, m
$d_g$	Dimensão representativa da grade, ou diâmetro do fio da grade, m
$F_\psi$	Pseudofrequência da <i>ondaleta</i> , Hz
$f$	Frequência desprendimento de vórtices, Hz
$f_a$	Frequência correspondente à escala $a$ , Hz
$f_s$	Frequência de aquisição dos dados, Hz
$i$	Taxa de decaimento da intensidade de turbulência
$L$	Largura do canal aerodinâmico, m
$M$	Largura da malha da grade, m
$N$	Número de pontos da série de temporal
$p$	Passo ou distância entre centros dos cilindros, m
$Re$	Número de Reynolds $\left[ \frac{UL}{\nu} \right]$
$T_u, T_v$ e $T_w$	Intensidade de turbulência das componentes de velocidade, $u$ , $v$ e $w$ , %
$T_r$	Período, s
$T$	Tempo, s
$U$	Velocidade de corrente livre, m/s
$u_{rms}, v_{rms}$ e $w_{rms}$	Raiz dos valores quadráticos médios das componentes $u$ , $v$ e $w$ , m/s
$x$	Distância a jusante da grade, m
$x_o$	Ponto de fixação da grade, m
$\beta$	Porosidade da grade
$\mu$	Média ou primeiro momento, m/s
$\nu$	Viscosidade cinemática, [m <sup>2</sup> /s]
$\sigma_u^2$	Variância ou valor quadrático médio, [u]
$\phi$	Função escala
$\psi$	Função ondaleta

# 1 INTRODUÇÃO

Fenômenos em escoamentos em torno de cilindros apresentam diversas aplicações em engenharia, tais como chaminés, cilindros verticais, núcleos de reatores nucleares, linhas de transmissão de energia elétrica, tubulações de transporte como oleodutos e gasodutos e no interior de trocadores de calor tipo casco e tubos.

Vibrações induzidas por escoamentos, devido a sua grande ocorrência, são um sério problema, principalmente quando associadas a sistemas de resfriamento ou trocadores de calor na indústria de processos e em instalações nucleares. Essas vibrações causam a diminuição da capacidade de resfriamento levando a fadiga e danos nos tubos [Kim e Alam, 2015].

Zdravkovich e Stonebanks, 1990, destacam que uma característica principal de vibrações induzidas em bancos de tubos é a resposta randômica da dinâmica dos tubos. Vibrações induzidas por escoamentos e as interações fluido-estrutura não são dependentes do arranjo ou da configuração dos cilindros, sendo tópicos de pesquisa há pelo menos 40 anos.

Païdoussis et al., 2010, relatam vários estudos a respeito de instabilidades induzidas pela esteira em pares de cilindros ou pequenos grupos de cilindros. Também relatam estudos sobre vibrações induzidas por vórtices em feixes de tubos submetidos a escoamento cruzado. Foram obtidos vários comportamentos diferentes, que dependem da razão de espaçamento entre os cilindros dos feixes de tubos.

Selvakumar e Kumaraswamidhas, 2015, estudaram vibrações induzidas em um cilindro elástico cercado por vários cilindros idênticos submetidos a escoamento turbulento cruzado. A ênfase do estudo era o efeito do número de cilindros adjacentes e a frequência natural de vibração do cilindro de teste. Foi observado que cilindros posicionados a montante do cilindro elástico sofrem maior influência na amplitude de resposta que cilindros a jusante.

O escoamento permanente perpendicular a um cilindro é um exemplo clássico nos livros que envolvem escoamentos de fluidos, [Schlichting, 1968], sendo um marco inicial no estudo de vibrações induzidas por escoamentos [Blevins, 1990]. Dois cilindros posicionados lado a lado são considerados a representação clássica de múltiplas estruturas, e o conhecimento do escoamento ao redor destes é esclarecedor para o entendimento de escoamentos em torno de mais estruturas.

Quando dois tubos são colocados lado a lado a certa distância um do outro e submetidos a um escoamento transversal, ocorre o fenômeno conhecido como biestável (*bistable*), o qual forma uma esteira estreita a jusante de um dos tubos e uma esteira larga a jusante do outro tubo. Este fenômeno gera duas frequências de desprendimento de vórtices, associadas cada qual a uma esteira, sendo a esteira estreita associada à maior frequência e a esteira larga à menor frequência de desprendimento. O escoamento biestável é caracterizado pela mudança no padrão de escoamento da fenda, de um lado para o outro, em períodos irregulares de tempo. O escoamento que passa pela fenda sofre um desvio na direção da esteira mais estreita. O fenômeno biestável ocorre quando o padrão de escoamento desviado muda intermitentemente, em outras palavras, quando o jato proveniente da fenda se direciona ora na direção de um dos tubos, ora na direção do outro tubo. De acordo com estudos anteriores este padrão de troca é independente do número de Reynolds, e não está associado com desalinhamentos entre os cilindros ou influências externas [De Paula, 2008].

Mahon e Meskell, 2012, concluíram que o fenômeno biestável não teria uma influência substancial no início da instabilidade fluido-elástica em cilindros, mas reduziria a amplitude média de vibração do regime pós-estável.

Telas e grades têm sido utilizadas em escoamentos a fim de melhorar a qualidade do mesmo, mas também consistem em um método simples e conveniente de geração de turbulência, se o número de Reynolds baseado no comprimento característico (diâmetro das barras) da grade, for grande o suficiente [Kurian e Fransson, 2009]. Na turbulência de grade, que é obtida através da colocação da grade a montante, na direção normal do escoamento, as esteiras de vórtices após as grades interagem, e degeneram em turbulência. O mesmo efeito poderia ser obtido se uma grade fosse arrastada por um fluido inicialmente em repouso, devido à invariância das leis de movimento de Galileu.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho possui dois principais objetivos, sendo o primeiro deles, analisar o comportamento do fenômeno biestável, em dois cilindros lado a lado com diferentes razões de espaçamento  $p/d$ , quando submetido a um aumento da intensidade de turbulência gerada por uma grade promotora de turbulência, posicionada a montante dos tubos, através de um estudo experimental.

O segundo objetivo é, também através de um estudo experimental, analisar qual a influência da presença, ou ausência, de paredes laterais no canal aerodinâmico, no comportamento do escoamento biestável através de dois tubos paralelos em diferentes razões de espaçamento  $p/d$ . A retirada das paredes laterais tem o intuito de reduzir os efeitos de bloqueio causados no escoamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Biestabilidade

Escoamentos de velocidade constante através de cilindros de mesmo diâmetro, posicionados lado a lado, segundo Sumner et al., 1999, podem apresentar uma esteira com diferentes modos, dependendo das distâncias entre os centros dos cilindros, chamada de passo ( $p$ ). Comportamentos diferentes são encontrados para diferentes razões entre passo e diâmetro ( $p/d$ ).

Para  $p/d = 1$ , ou seja, os cilindros em contato, os mesmos se comportam como um único corpo e, devido ao aumento da distância da camada cisalhante em ambos os lados, o desprendimento de vórtices é menor do que o apresentado por um único cilindro.

Para razões  $p/d$  pequenas ( $1,0 < p/d < 1,2$ ), os cilindros ainda se comportam como um único corpo, porém, devido ao fluido de grande quantidade de movimento que entra pela fenda entre os tubos, ocorre um aumento na força de sustentação e uma redução na força de arrasto em ambos os cilindros e uma frequência de desprendimento de vórtices muito próxima à observada em  $p/d = 1$ . Uma única esteira de vórtices é observada pela combinação das esteiras dos dois cilindros, o desprendimento de vórtices ocorre apenas na camada externa e três comportamentos foram observados: uma região de esteira assimétrica, com escoamento de fenda desviado e uma possível formação de esteira de vórtices a jusante; uma região de esteira simétrica com uma única esteira de vórtices e o escoamento da fenda orientado paralelamente ao eixo do escoamento; e um terceiro padrão de escoamento, sem escoamento de fenda significativo.

Para grandes razões de espaçamento ( $p/d > 2,2$ ), o escoamento desviado desaparece e os cilindros se comportam de maneira independente, como corpos isolados. Ainda assim existe uma interação ou sincronização entre as esteiras, como a ocorrência predominante de vórtices em anti-fase.

Em razões de espaçamento intermediárias ( $1,2 < p/d < 2,0$ ), o escoamento é caracterizado pela formação de uma esteira larga atrás de um cilindro e uma esteira estreita atrás do outro cilindro. Este fenômeno é responsável pela geração de duas frequências dominantes de desprendimento de vórtices, a esteira estreita associada à alta frequência e a esteira larga relacionada à baixa frequência. O escoamento da fenda é desviado em direção ao

cilindro que possui a esteira estreita. O escoamento biestável é caracterizado pela troca de direção do escoamento da fenda, de maneira irregular de um lado para o outro, em intervalos irregulares de tempo. Um esquema representativo das trocas de modo no fenômeno da biestabilidade encontra-se na Figura 2.1.

Este tipo de fenômeno foi observado pela primeira vez por Bearman e Wadcock, 1973, que verificaram que se tratava de uma propriedade do escoamento. Kim e Durbin, 1988, concluíram que as transições ocorrem de maneira randômica, sem um período natural e que o tempo médio entre uma transição e outra é na ordem de  $10^3$  vezes maior que o período de desprendimento de vórtices. Os autores constataram que não há correlação entre o comportamento biestável e o desprendimento de vórtices, devido à independência do número de Strouhal em relação ao número de Reynolds.

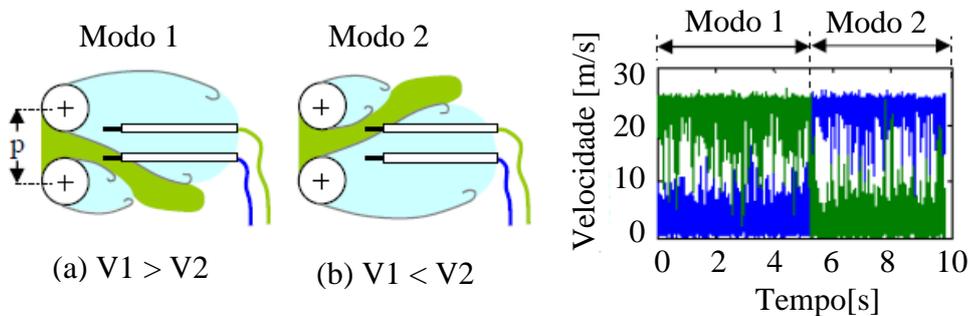


Figura 2.1 – Representação esquemática do fenômeno da biestabilidade para dois cilindros lado a lado (a) Modo 1 (b) Modo 2 e seus sinais característicos (c). Adaptado de De Paula, 2013.

Guillaume e LaRue, 1999, classificaram o regime biestável de acordo com seu comportamento:

- Quasi – estável, as trocas no escoamento não variam no tempo. Uma perturbação de grande amplitude pode causar a troca nos valores médios, mas os novos valores permanecem até que outra grande perturbação seja aplicada sobre o escoamento.
- Troca espontânea, os valores médios se alternam ao longo do tempo entre valores altos e baixos, mesmo quando não há nenhuma grande perturbação aplicada ao campo de escoamento.
- Troca forçada, é um comportamento observado, no qual esteiras inicialmente estáveis apresentam troca, após uma única grande perturbação ser aplicada ao escoamento. Após a

aplicação inicial desta grande perturbação e da ocorrência da primeira troca, não é observável nenhuma diferença entre trocas espontânea e forçada.

Peschard e Le Gal, 1996, não observaram o comportamento biestável em seus experimentos em túnel d'água com baixo número de Reynolds, sugerindo que o comportamento pode ser causado por perturbações turbulentas na entrada do escoamento.

Sumner et al., 1999 estudaram os campos de escoamentos para dois e três cilindros colocados lado a lado para razões de  $p/d$  entre 1 e 6 e para números de Reynolds variando entre 500 e 3000. Não foi encontrada a presença do fenômeno da biestabilidade e o escoamento permaneceu defletido consistentemente na direção do mesmo cilindro. Dentro da região de escoamento de fenda dois picos de frequência foram detectados. Eles atribuíram este comportamento sem biestabilidade às características do aparato experimental.

Alam et al., 2003 realizaram estudos experimentais para o escoamento ao redor de cilindros paralelos, identificando a ocorrência de um jato desviado que emana entre os dois cilindros e se direciona para um lado e para o outro de maneira súbita e em períodos de tempo irregulares. Os estudos foram realizados para Reynolds de  $5,5 \times 10^4$ .

Em estudos realizados por Olinto, 2005, foi identificada a presença do escoamento biestável em canal aerodinâmico para dois tubos lado a lado. Para medições realizadas próximas aos tubos, (até  $x/d = 0,93$ , onde “x” é a distância das sondas até a linha de centro dos tubos a montante), a biestabilidade é claramente identificável. Para distâncias maiores dos tubos ( $x/d = 2,18$ ), o fenômeno biestável não foi identificado.

De Paula, 2008 realizou um estudo experimental acerca do fenômeno da biestabilidade em bancos de tubos de arranjo triangular para as razões de espaçamento de 1,26 e 1,6 em canal aerodinâmico, utilizando anemometria de fio quente e duas sondas perpendiculares ao escoamento principal. O fenômeno foi identificado em dois cilindros lado a lado, três cilindros (um a montante e dois a jusante) e em duas fileiras de cilindros em arranjo triangular. Também foram realizadas visualizações de escoamento em canal hidráulico com o emprego de injeção de corantes.

De Paula, 2013 apresentou um estudo sobre os principais parâmetros que caracterizam o fenômeno da biestabilidade para dois tubos dispostos lado a lado em escoamento turbulento. Seus resultados mostram a existência de dois patamares distintos de velocidade média nas séries temporais, correspondentes aos dois modos do escoamento, cada qual com um número de Strouhal e funções densidade de probabilidade distintas.

Keogh e Meskell, 2015 estudaram o fenômeno biestável em um banco de tubos de 8 fileiras em arranjo triangular, com  $p/d = 1,375$  e número de Reynolds na faixa de  $0,63$  a  $1,27 \times 10^4$ . Foi encontrado que mudanças na direção da velocidade, devias ao processo biestável são altamente correlacionadas com as flutuações de pressão na parede do canal, um resultado de escoamento biestável ocorre simultaneamente ao longo de uma fileira de tubos e opera em um complexo arranjo tridimensional que muda juntamente com o modo do campo de escoamento. Esta mudança pode causar uma carga complexa de fluido ao longo do comprimento do cilindro em um banco de tubos.

Fatores geométricos associados a canais aerodinâmicos ou tuneis de vento podem apresentar influências sobre o número de Strouhal, tal como razão de bloqueio, dada por  $d/L$ , onde  $d$  é o diâmetro do cilindro e  $L$  é a largura do canal. A razão de bloqueio é a razão entre o comprimento característico do corpo em análise e o comprimento associado à seção de teste [Maskell, 1963].

Silveira, 2011, realizou estudo experimental sobre o efeito da razão de bloqueio em um canal aerodinâmico no fenômeno da biestabilidade em escoamento turbulento cruzado em torno de dois cilindros dispostos lado a lado. A faixa de Reynolds estudada varia de  $3,72 \times 10^4$  e  $7,61 \times 10^4$ , as razões de espaçamento foram  $p/d = 1,26$  e  $p/d = 1,6$  sendo que os diâmetros dos cilindros variam de  $4,5$  a  $60$  mm, ocasionando em razões de bloqueio,  $d/L$ , de  $4,66$  a  $62,18$  %, onde  $L$  é a largura da seção de testes ( $193$  mm).

Escoamentos em torno de um cilindro em canais limitados por paredes, conforme Žukauskas, 1972, apresentam um efeito de bloqueio considerável. O aumento da razão de bloqueio implica no aumento da velocidade ao redor do tubo fora da camada limite, influenciando a distribuição de pressão e velocidade.

## **2.2 Turbulência de grade**

Pode se dizer que um escoamento turbulento é um escoamento desordenado no tempo e no espaço, cuja propriedade requerida é que a habilidade de mistura das quantidades transportadas deve ser muito mais rápida do que se houvessem somente processos de difusão molecular envolvidos [Lesieur, 2008].

Devido às dificuldades de uma definição precisa para a turbulência, Tennekes e Lumley, 1972, citam algumas características presentes em um escoamento turbulento:

- 1) Irregularidade: torna a análise determinística impossível, necessitando-se de métodos estatísticos;
- 2) Difusividade: causa maior mistura do fluido, aumento da transferência de calor e massa e retardo da separação da camada-limite;
- 3) Altos números de Reynolds: a turbulência se origina de instabilidades de escoamentos laminares quando o número de Reynolds vai aumentando;
- 4) Vorticidade tridimensional: a turbulência é rotacional e tridimensional, com grandes níveis de flutuações tridimensionais da vorticidade;
- 5) Dissipação: escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e a viscosidade transforma o movimento de pequenas escalas em calor;
- 6) Meio contínuo: a turbulência é um fenômeno contínuo e sua menor escala ainda é maior que a escala molecular;
- 7) Escoamentos turbulentos são escoamentos: a turbulência é uma característica do escoamento, não do fluido.

A descoberta das estruturas coerentes tem complementado o estudo da turbulência. Lesieur, 2008, define uma estrutura coerente como uma região do espaço que, em um dado tempo, possui um certo grau de organização em relação a uma quantidade qualquer do escoamento em questão. Estruturas coerentes estão relacionadas com o tempo de produção de energia. Assim, uma parte da energia é produzida pelas estruturas coerentes e outra por estruturas não coerentes [Möller e Silvestrini, 2004].

Telas e grades têm sido utilizadas em escoamentos a fim de melhorar a sua qualidade, mas também consistem em um método simples e conveniente de geração de turbulência se o número de Reynolds baseado no comprimento característico (diâmetro das barras) da grade for grande o suficiente [Kurian e Fransson, 2009]. Na turbulência de grade, que é obtida através da colocação da grade a montante, na direção normal do escoamento, as esteiras de vórtices após as grades interagem e degeneram em turbulência. O mesmo efeito poderia ser obtido se uma grade fosse arrastada por um fluido inicialmente em repouso [Lesieur, 2008].

Roach, 1987, separa os efeitos causados pela grade no campo do escoamento em duas partes:

- 1) Efeito de manipulação: consiste no processo onde o espectro da turbulência se altera, reduzindo ou aumentando a escala dos vórtices a montante, de acordo com as dimensões relativas da grade.

2) Efeito de esteira: consiste em um processo que contribui com a energia turbulenta a jusante do escoamento. Esta energia é relativa às altas frequências e, como resultado, tende a reduzir as escalas dos vórtices a montante.

Ambos os efeitos interagem de maneira a produzir um escoamento a jusante que se caracteriza por ser razoavelmente homogêneo e isotrópico [Roach, 1987].

Ao ser introduzida uma grade no escoamento, há uma distância imediatamente a jusante da grade, onde o escoamento apresenta-se fortemente não homogêneo, eventualmente, os vórtices desta região convertem-se para um escoamento turbulento homogêneo. Roach, 1987, realizou alguns experimentos onde verificou que a esteira a jusante da grade pode ser considerada homogênea a aproximadamente dez vezes a escala de comprimento da malha da grade.

Muitos métodos para determinação das características do escoamento a jusante da grade foram apresentados, para Roach, 1987 o método apresentado por Frenkiel, 1948 é o que apresenta a melhor concordância com os resultados experimentais para altos números de Reynolds assim as componentes da intensidade turbulenta podem ser dadas por:

$$Tu = \frac{u_{rms}}{\mu_u} \quad (2.1)$$

$$Tv = \frac{v_{rms}}{\mu_v} \quad (2.2)$$

$$Tw = \frac{w_{rms}}{\mu_w} \quad (2.3)$$

onde  $u_{rms}$ ,  $v_{rms}$  e  $w_{rms}$ , são as raízes dos valores quadráticos médios (*root mean square*) das componentes de velocidade do escoamento e  $\mu_u$ ,  $\mu_v$  e  $\mu_w$  são os valores médios das componentes de velocidade do escoamento. Se a turbulência for realmente isotrópica todas as três componentes serão iguais, fato este que dificilmente é verificado em experimentos práticos.

O mais interessante do método de Frenkiel é que não é necessário estimar a queda de pressão causada pela grade a fim de avaliar a energia turbulenta a jusante desta.

Lavoie et al., 2005 verificou em seus estudos que, entre outras coisas, diferentes geometrias de grades produzem variações no expoente de decaimento da energia cinética e afetam a estrutura da turbulência. Suas visualizações mostraram que grades fabricadas com barras de seção circular tendem a produzir estruturas mais periódicas do que uma grade similar fabricada com barras quadradas.

O decaimento da intensidade da turbulência gerada por grades apresenta a um comportamento tipicamente exponencial. A escala de comprimento mais apropriada para o decaimento é a largura da malha da grade,  $M$ . O decaimento pode ser descrito por Batchelor e Townsend, 1948, conforme Equação 2.4.

$$Tu^2 = \left( \frac{u_{rms}}{\mu_u} \right)^2 = A \left( \frac{x - x_0}{M} \right)^i \quad (2.4)$$

onde  $x_0$  é uma origem fictícia para a grade, que geralmente é muito próxima ao ponto onde a grade está fixada,  $x$  é a distância a jusante da grade, o expoente  $i$  nos dá a taxa de decaimento e a constante  $A$  nos dá o nível específico para cada grade e número de Reynolds.

O parâmetro mais importante com relação à geometria da grade é a sua porosidade, dada por  $\beta$ , definida como a razão entre a área livre e a área total. Para uma grade de barras paralelas, pode ser definida como:

$$\beta = \left( 1 - \frac{d_g}{M} \right)^2 \quad (2.5)$$

onde  $d_g$  é o diâmetro das barras que compõem a grade promotora de turbulência.

### 3 METODOLOGIA

O estudo experimental acerca do fenômeno da biestabilidade apresentado neste trabalho é baseado na obtenção das velocidades médias e de suas flutuações utilizando-se a técnica de anemometria de fio quente em canal aerodinâmico. Estes dados são adquiridos como séries temporais e cada série terá um comprimento e será adquirida com uma frequência de amostragem, conforme necessidade de maior ênfase em uma determinada característica do fenômeno estudado.

A análise dos dados obtidos é feita com o auxílio de ferramentas matemáticas que permitem a análise do domínio do tempo e da frequência (ferramentas estatísticas), e a análise conjunta nestes dois domínios (tempo-frequência), através de transformadas de ondaletas.

Para análise matemática foi utilizado o aplicativo computacional Matlab®, versão R2012b e seus pacotes de ferramentas para análise de sinais, tratamento estatístico e ondaletas.

#### 3.1 Análise no domínio do tempo e da frequência

A análise no domínio do tempo consiste em calcular os quatro momentos da função densidade de probabilidade, que são: a) valor médio; b) desvio padrão; c) *skewness* (assimetria) e d) *kurtosis* (planicidade). Também é utilizada a função de autocorrelação, que determina como as flutuações de uma grandeza se relacionam ao longo do tempo e da posição.

Na análise do domínio frequência, ou análise espectral, é utilizada a transformada de Fourier através da função densidade espectral de potência (PSD – *power spectral density*). Para sinais ergódicos e estacionários, onde frequência e amplitude não variam com o tempo e o resultado é independente da amostra, a transformada de Fourier se mostra bastante adequada, porém não se adequa de maneira satisfatória a processos transientes em diferentes escalas, por estes estão sendo avaliados sobre o intervalo completo de tempo, como foi destacado por Indrusiak, 2004.

Quando a hipótese de estacionariedade não pode ser mantida, em função da existência de fenômenos transientes em diferentes escalas, a análise de Fourier apresenta-se inadequada, pois as informações temporais não são visíveis neste espaço. Isto se deve ao fato de os

coeficientes de Fourier referirem-se a todo o domínio temporal do sinal, uma vez que os componentes da base são senos e cossenos, ou seja, com suporte infinito. Uma alternativa é a utilização das transformadas de ondaletas, que permitem o estudo de fenômenos turbulentos onde não se aplique a hipótese de estacionariedade, através da geração de espectrogramas de energia nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente.

As bases da transformada de ondaleta são localizadas tanto no domínio tempo, quanto no domínio frequência. Esta propriedade de dupla localização faz com que haja um equilíbrio nas resoluções de cada um dos domínios, sendo que o ganho de resolução temporal é compensado com uma perda de resolução em frequência e vice-versa, este comportamento é explicado pelo princípio da incerteza de Heisenberg [Daubechies, 1992].

Uma ondaleta, como o próprio nome sugere, é uma pequena onda que cresce e decai em um período de tempo limitado. As bases de ondaletas são compostas por funções transientes, sendo, portanto bases transientes, e por isso mais adequadas à análise de funções que também o sejam [Indrusiak, 2004].

Uma função  $\psi(t)$  deve satisfazer duas propriedades básicas para ser uma função ondaleta:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1 \quad (3.1)$$

e

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.2)$$

A base é gerada por meio de dilatações e translações de uma única ondaleta:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a > 0 \quad (3.3)$$

em que  $a$  é a escala e  $b$  é a posição da ondaleta. Uma função escala,  $\phi(t)$ , é associada a cada ondaleta, e satisfaz a propriedade:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (3.4)$$

Esta função escala também gera uma base, por meio de dilatações e translações:

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a > 0 \quad (3.5)$$

O objetivo da função escala é obter coeficientes que representem a média ponderada do sinal nas escalas consideradas, enquanto que a função ondaleta, obtém as oscilações, também ponderadas, em torno desta média, nas mesmas escalas, conforme Indrusiak, 2004.

Geralmente os resultados obtidos dependem fortemente da escolha da ondaleta mais adequada, uma vez que existe uma grande gama de ondaletas. Em ambas as transformadas, contínua e discreta, apresentadas neste trabalho, foi utilizada somente a ondaleta Daubechies 20 (Db20), em função dos fenômenos estudados e das características procuradas. Em trabalhos anteriores, como Indrusiak et al., 2005, Olinto et al., 2009 bem como em De Paula, 2013, foram empregadas ondaleta Morlet para a transformada contínua e a ondaleta Daubechies 20 (Db20) para a transformada discreta.

A representação da transformada de ondaleta em geral nos permite uma análise do sinal simultaneamente no tempo e na escala. Para fins de praticidade, é conveniente expressar os resultados em termos de frequência. Esta transformação dos coeficientes de escala em valores de frequência, pode ser feita por meio de uma aproximação periódica por transformada de Fourier. A frequência do módulo máximo da transformada de Fourier, chamada pseudofrequência  $F_\psi$  da ondaleta é dada por:

$$f_a = F_\psi \frac{f_s}{a} \quad (3.6)$$

onde  $f_s$  é a frequência de aquisição da amostragem. Alguns valores típicos de  $F_\psi$  são:  $F_\psi = 0,8125$  (Morlet),  $F_\psi = 0,6902$  (Meyer) e  $F_\psi = 0,6667$  (Db20).

### 3.2 Metodologia Experimental

Para um estudo quantitativo das características do escoamento ao passar pelos tubos, as medições de velocidade média e de flutuações de velocidade do ar, são realizadas com o emprego de um canal aerodinâmico.

O canal, de circuito aberto, possui uma seção de testes retangular com dimensões internas de 193 mm de largura por 146 mm de altura, confeccionado em placas de acrílico transparente. O ar é impelido por um ventilador centrífugo de 0,75 kW e passa por um difusor, em seguida, por dispositivos homogeneizadores de fluxo do tipo grade, colmeia e tela, até atingir a seção de testes. A montante desta seção, a 180 mm de distância, estão fixados, um tubo de Pitot, e um sensor de temperatura. O tubo de Pitot, com o auxílio de um manômetro eletrônico permite a medição da velocidade de referência do escoamento não perturbado. O comprimento total, após os dispositivos uniformizadores de fluxo é de 1,02 m.

A jusante da seção de testes, externo ao canal aerodinâmico, é montado um sistema de posicionamento tridimensional, que permite o alinhamento milimétrico do suporte da sonda. Os experimentos são realizados em ambiente climatizado em temperatura constante de 22°C.

A seção de testes do canal utilizada para a realização das duas primeiras etapas de medições apresenta um perfil de velocidades uniforme e uma intensidade de turbulência máxima inferior a 1%, sendo este valor medido sem obstáculos no interior do canal. A primeira etapa de medição foi realizada com os tubos posicionados conforme esquema representado na Figura 3.1:

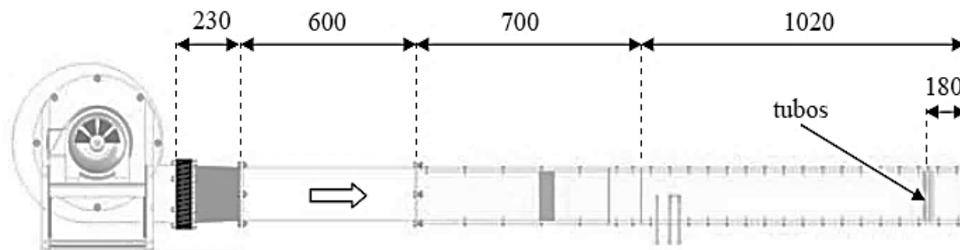


Figura 3.1 – Ilustração do canal aerodinâmico para intensidade de turbulência  $Tu \approx 1\%$ .

Na segunda etapa de medição realizada nesta seção do canal, utilizou-se um prolongamento do canal aerodinâmico de 300 mm de extensão. As condições de intensidade de turbulência não foram alteradas, mantendo-se inferiores a 1%. Nesta seção do canal, as

paredes laterais foram adaptadas à um dispositivo que possibilita sua fixação e a remoção lenta e simultânea, de ambos os lados, durante a realização do experimento. Os tubos foram posicionados no centro desta seção, conforme ilustrado na Figura 3.2.

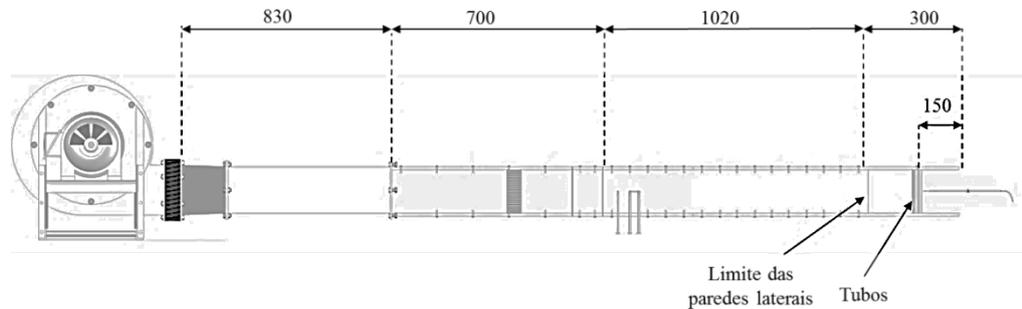


Figura 3.2 – Ilustração do canal aerodinâmico e posicionamento dos cilindros na seção sem paredes laterais.

Para ocasionar o aumento da intensidade da turbulência na seção de testes, utilizou-se uma grade composta por oito barras paralelas horizontais de 6 mm de diâmetro, igualmente espaçadas entre si, uma representação da grade encontra-se na Figura 3.3. Esta grade gerou uma variação da intensidade de turbulência, cujo decaimento é apresentado no gráfico da Figura 3.4. A intensidade de turbulência foi calculada de acordo com a definição dada nas Equações 2.1, 2.2 e 2.3.

Para obtenção dos dados experimentais nesta condição, os tubos foram posicionados na região onde a intensidade de turbulência atinge valores entre 7 e 6%, ou seja a 150 mm de distância da grade promotora de turbulência. Esta seção possui 300 mm de comprimento, podendo ser acoplada ou retirada do canal aerodinâmico conforme a necessidade. A Figura 3.5 ilustra as dimensões do canal aerodinâmico utilizado nestas medições.

O canal aerodinâmico apresentava características de turbulência homogênea e isotrópica, um mapeamento do comportamento da intensidade turbulenta ao longo da largura do canal foi feito após a colocação da grade e é mostrado na Figura 3.6. As medições foram realizadas a 150 mm da grade, por se tratar do ponto de fixação dos tubos. Apesar da maior intensidade turbulenta em função da presença da grade, a distribuição da curva de intensidade de turbulência ao longo da largura do canal, apresenta um perfil semelhante a condição anterior, a qual não apresentava o dispositivo promotor e cuja intensidade era inferior a 1%.



Figura 3.3 – Representação da geometria da grade promotora de turbulência.

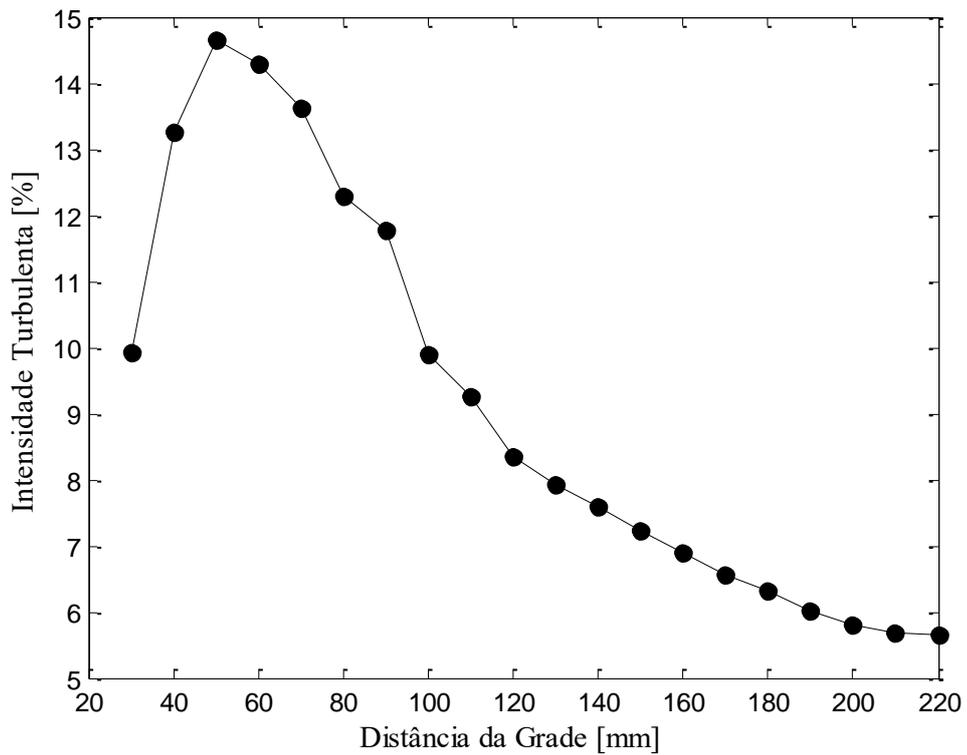


Figura 3.4 – Curva do comportamento da intensidade de turbulência da componente axial da velocidade ( $Tu$ ) no canal aerodinâmico em função da distância a jusante da grade.

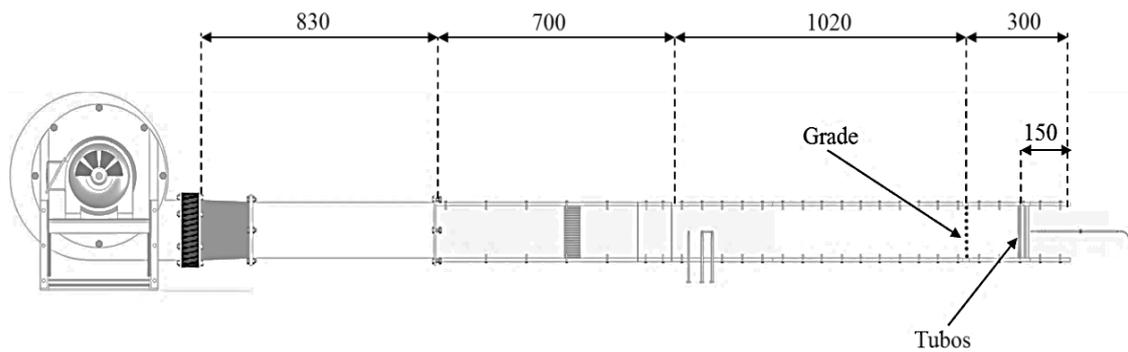


Figura 3.5– Ilustração esquemática do canal aerodinâmico e posicionamento da grade promotora de turbulência.

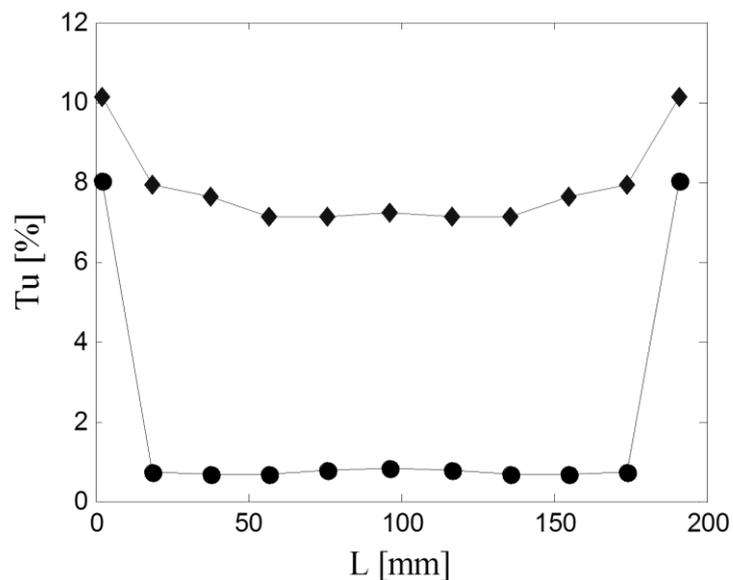


Figura 3.6 – Variação da intensidade de turbulência da componente axial da velocidade ( $Tu$ ) ao longo da largura do canal aerodinâmico ( $L$ ), onde (—♦—) com grade e (—●—) sem grade.

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 centrífugo. Para o canal livre, a velocidade do ar pode variar de 0 a 15 m/s. A variação da velocidade média em função da adição da grade promotora de turbulência, ao longo da largura do canal está mostrada na Figura 3.7 juntamente com a variação da velocidade média para a condição de intensidade de turbulência inferior a 1%. A variação da velocidade média encontrada no canal com intensidade de turbulência inferior a 1% está de acordo com resultados preliminares obtidos após a substituição da colmeia original pela que equipa o

canal atualmente. Esta condição não é obtida após a colocação da grade, devido ao processo difusivo causado pelo aumento da intensidade de turbulência. Os dados foram obtidos a 150 mm de distância da grade.

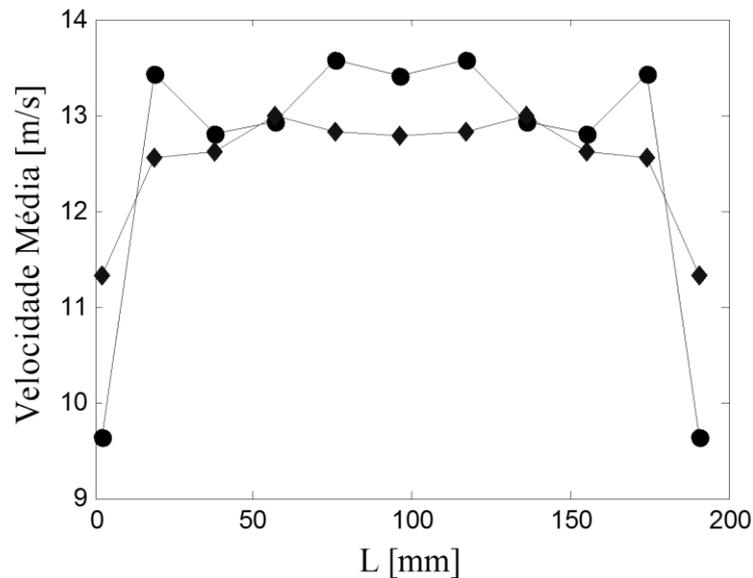


Figura 3.7 – Variação da velocidade média da componente axial ao longo da largura do canal aerodinâmico (L) para as condições (—◆—) com grade e (—●—) sem grade.

Os tubos utilizados nos experimentos são construídos em PVC rígido com diâmetro externo de 25,1 mm, comprimento de 146 mm e rigidamente fixados à placa superior de acrílico do canal, estando ambas as suas extremidades fechadas.

As flutuações de velocidade do escoamento são medidas através da técnica de anemometria de fio quente a temperatura constante (CTA, *Constant Temperature Anemometry*), com um equipamento DANTEC *StreamLine* 90N10. Duas sondas simples de fios reto, modelo DANTEC 55P11, foram utilizadas nos experimentos referentes a intensidade de turbulência. Apenas uma sonda simples de fio reto foi utilizada para os experimentos realizados na seção sem paredes laterais.

Primeiramente as medições foram realizadas em 06 pontos do escoamento, sendo que a sonda denominada sonda 1 manteve-se fixa, enquanto que a sonda denominada sonda 2, foi deslocada nas referidas posições. Um esquema dos pontos de medição encontra-se na Figura 3.8 e a nomenclatura utilizada para os sinais encontra-se na Tabela 3.1. Após análise inicial

destes resultados, foram mantidos apenas três destes pontos para o restante dos experimentos. Para as medições sem paredes laterais, a sonda foi posicionada a 10 mm de um dos tubos, de modo a captar o jato proveniente da fenda e a troca dos modos na esteira. Os experimentos são realizados com o fio da sonda posicionado na horizontal.

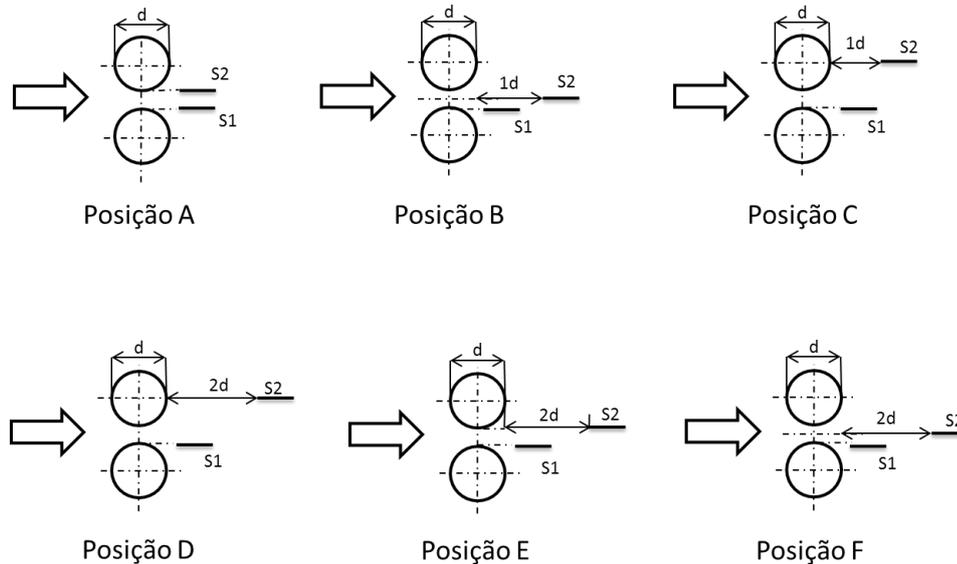


Figura 3.8 – Esquematização das posições de medição utilizadas no canal com intensidade de turbulência inferior a 1% e no canal aerodinâmico com grade.

Tabela 3.1 – Nomeclatura dos sinais de velocidade obtidos pelas sondas 1 e 2 e suas respectivas posições.

Posição	A		B		C		D		E		F	
Sonda	S1	S2	S1	S2								
Velocidade	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12

As séries de dados de velocidade são adquiridas com a utilização de uma placa conversora analógico/digital (A/D), modelo NATIONAL INSTRUMENTS 9215, com interface USB e 4 canais simultâneos de entrada analógica, com resolução de 16 bits ( $2^{16} = 65536$  níveis) e operando na faixa de tensão de  $\pm 10$  V controlada por um computador.

O software utilizado para ajuste e configuração de parâmetros das sondas e para aquisição dos dados é o *StreamWare*, versão 3.4, próprio da DANTEC. A análise de incertezas das variáveis envolvidas encontra-se no Apêndice A. A calibração da sonda de fio

quente é realizada no interior do canal aerodinâmico, com o emprego de um dispositivo para redução gradual da seção transversal do canal. Informações mais detalhadas acerca da calibração das sondas encontram-se no Apêndice B.

As razões de espaçamento estudadas são  $p/d = 1,16$ ,  $p/d = 1,26$  e  $p/d = 1,6$  onde “p” é o passo ou a distância entre os centros dos cilindros e “d” o diâmetro. A incerteza para a montagem dos tubos foi estimada em 0,5 mm. As séries temporais são obtidas com uma frequência de aquisição ( $f_s$ ) de 1 kHz, com tempo de duração dos registros ( $T_r$ ) de 131,072 segundos, o que fornece um número total de pontos de dados (N) de 131072. É utilizado um filtro passa baixa que atende ao critério de Nyquist, evitando o fenômeno de dobramento ou *aliasing*. A frequência de corte é de 300 Hz. Os tempos de aquisição estão relacionados à frequência de aquisição através do número de elementos da amostra, que são escolhidos em função das características procuradas. Os tamanhos de amostras permitidos pelo sistema de aquisição da DANTEC são apresentados em séries diádicas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados de medição de velocidade para dois tubos lado a lado em canal aerodinâmico com e sem a presença de grade promotora de turbulência. Também são apresentados os resultados para os estudos realizados com os tubos posicionados em seção do canal aerodinâmico sem paredes laterais, onde a influência da ausência de paredes laterais é estudada no fenômeno da biestabilidade. As razões de espaçamento estudadas são  $p/d = 1,16$ ,  $p/d = 1,26$  e  $p/d = 1,6$ .

Os números de Reynolds dos experimentos variam de  $1,386 \times 10^4$  a  $1,648 \times 10^4$  baseados na velocidade média do escoamento não perturbado e no diâmetro dos tubos. As frequências para aquisição das séries de velocidade dependem da disponibilidade dos filtros para frequência de corte, atendendo ao critério de Nyquist a fim de evitar o dobramento das altas frequências no espectro. A frequência de aquisição também deve permitir a identificação das características do escoamento. Os tempos de aquisição dos dados dependem do número de elementos da amostra.

### 4.1 Resultados para o canal aerodinâmico sem grade (Intensidade turbulenta $\approx 1\%$ )

O fenômeno da biestabilidade pode ser verificado em arranjos de dois tubos dispostos lado a lado e submetidos a escoamento turbulento cruzado, para uma razão de espaçamento entre  $1,2 < p/d < 2,2$ . A biestabilidade se manifesta através do desvio da porção de fluido que emerge da fenda entre os dois tubos [Alam et al., 2003].

O estudo realizado no canal aerodinâmico, com intensidade de turbulência inferior a 1%, tem o intuito de servir como referência para o comparativo dos resultados na condição em que ocorre o aumento da intensidade de turbulência, pela presença da grade promotora de turbulência, e também no caso em que não há presença de paredes laterais, ou seja, quando ocorre a redução dos efeitos de bloqueio.

#### 4.1.1 Razão de espaçamento $p/d = 1,26$

As medições para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$  foram realizadas nas seis posições referidas no Capítulo 3, Figura 3.8. Para possibilitar a captação do fenômeno de troca de modos pelas duas sondas de maneira simultânea, as mesmas foram posicionadas lado

a lado na linha tangente dos tubos, a 10 mm de distância da linha de centro dos cilindros. A Figura 4.1 ilustra detalhadamente o posicionamento das sondas na posição A.

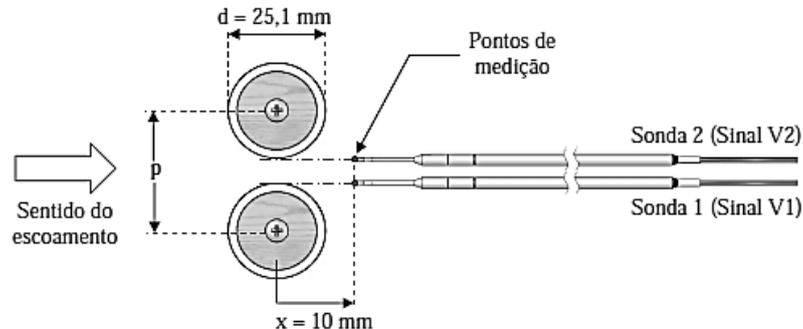


Figura 4.1 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas a  $x = 10$  mm do centro dos cilindros na posição A.

A Figura 4.2 mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para os dois cilindros dispostos lado a lado, na razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ , frequência de aquisição de 1000 Hz e  $2^{17}$  (131072) pontos. O número de Reynolds do experimento é de  $1,386 \times 10^4$  e a velocidade de referência é de 10,14 m/s. Como esperado em função do posicionamento das sondas, lado a lado e à mesma distância dos cilindros, os sinais apresentam uma simetria, ou seja, quando a sonda 1 encontra-se na esteira larga, a sonda 2 encontra-se na fenda e vice-versa.

É possível observar diversas trocas de modo durante o tempo de aquisição dos dados, sendo visíveis dois patamares de velocidade: um a 5 m/s e outro a 18 m/s. Da aproximação do sinal através da transformada discreta de ondaleta (Figura 4.3), do tipo Db20 e nível 9, observa-se que durante os 131 segundos de aquisição dos dados, é possível identificar a ocorrência de 39 trocas de modo no escoamento. Em função da frequência de aquisição, essa aproximação do sinal, resulta em um sinal com frequências de até 0,976 Hz, sendo eliminadas as flutuações de frequência mais altas do que este valor.

Os espectrogramas de energia (Figura 4.4), gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 4.2 mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente, em intervalos de frequência de 1,0 Hz na faixa de 5 a 60 Hz. A Figura 4.4(a) referente a velocidade V1, mostra valores mais elevados de energia distribuídos ao longo do tempo, os

picos de energia, referentes aos momentos em que ocorrem as trocas biestáveis no escoamento, se concentram principalmente na faixa entre 5 e 20 Hz. A Figura 4.4(b) mostra o espectrograma referente ao sinal de velocidade V2. Vemos que a distribuição de energia encontra-se nas mesmas faixas de frequência, de 5 a 20 Hz, porém apresenta valores de energia mais baixos quando a sonda se encontra dentro da esteira larga, devido as baixas velocidades. Os picos de energia se encontram nos momentos em que as trocas ocorrem.

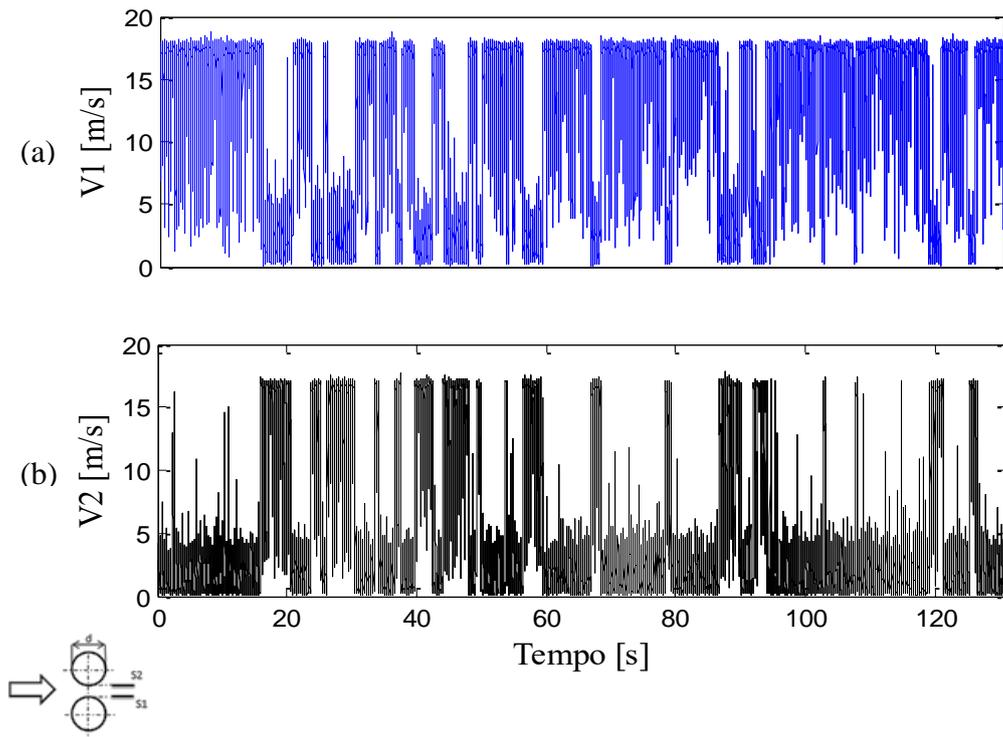


Figura 4.2 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm e  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2.

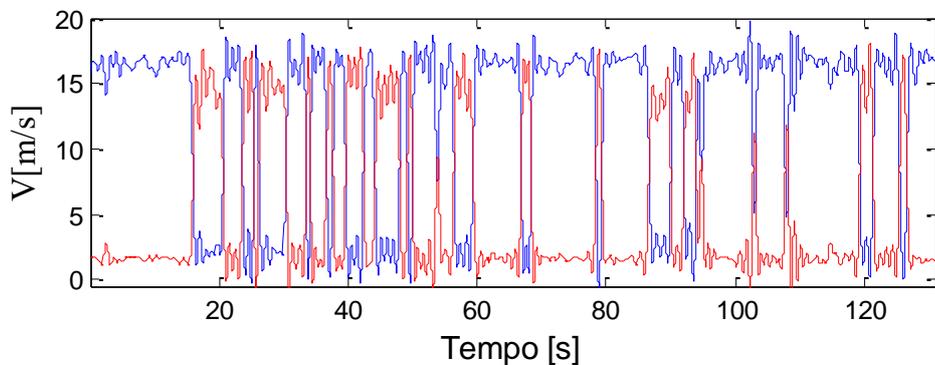


Figura 4.3 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.2 através de DWT, tipo Db20. (— V1) (— V2).

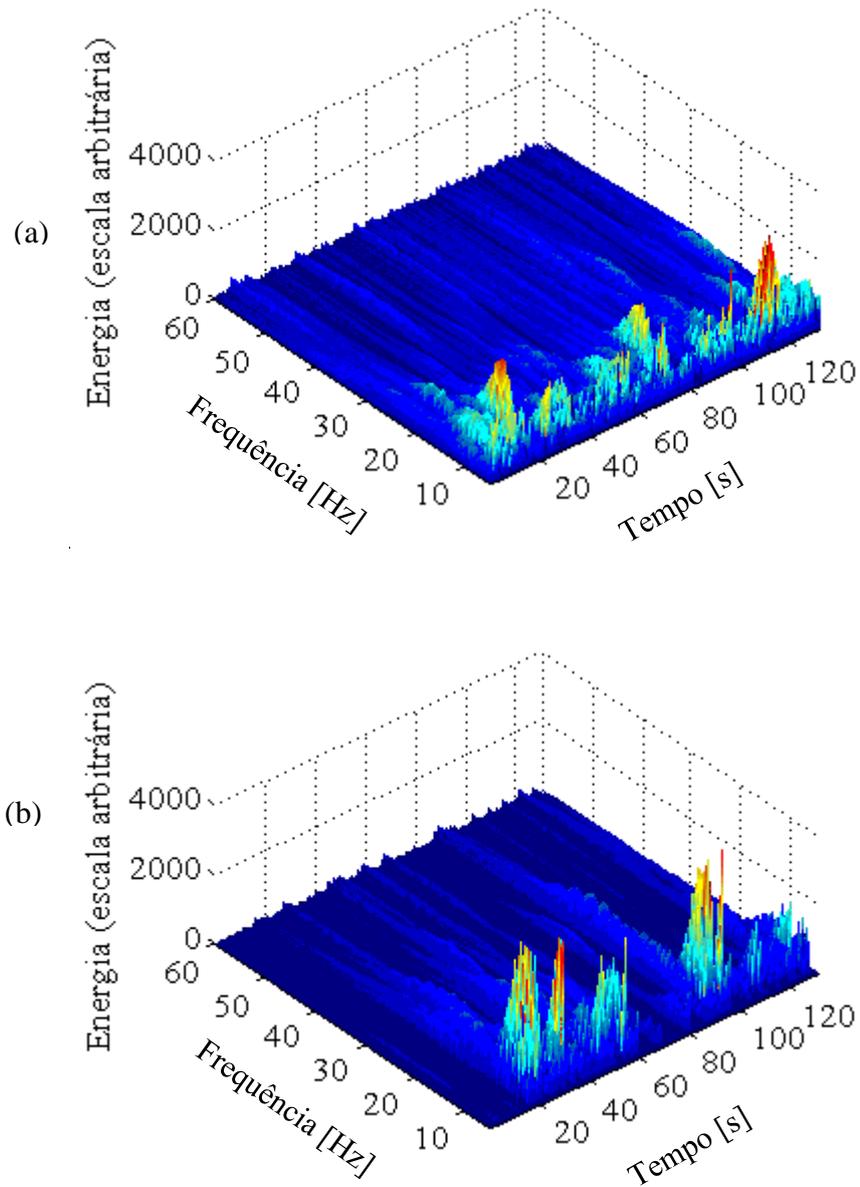


Figura 4.4 – Espectrogramas de energia dos sinais de velocidade instantânea da Figura 4.2.  
 (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2

Na segunda posição de medição, a sonda 2 foi posicionada no centro da fenda entre os dois cilindros, a uma distância de 1(um) diâmetro do cilindro, ou 37,65 mm com relação a linha de centro dos cilindros, enquanto que a sonda 1 permaneceu no mesmo ponto de medição do experimento anterior. O esquema de posicionamento das sondas encontra-se detalhado na Figura 4.5.

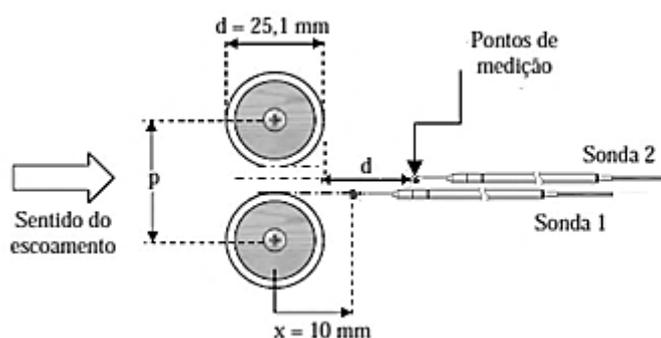


Figura 4.5 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição B.

Para a terceira posição de medição, a sonda 2 foi colocada na região posterior ao segundo cilindro, alinhada a linha de centro. A distância em relação à face do cilindro é de um diâmetro, ou a 37,65 mm, com relação à linha de centro dos cilindros. A sonda 1 permanece na mesma posição, tangente ao cilindro e a 10 mm de distância do centro. O esquema do posicionamento das sondas pode ser visto na Figura 4.6.

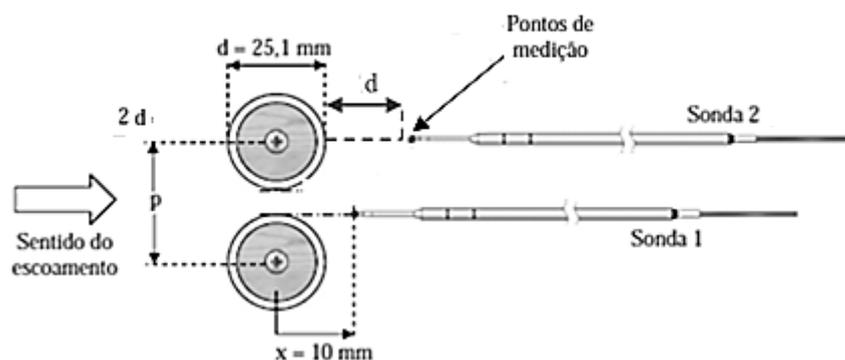


Figura 4.6 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição C.

Uma medição semelhante ocorreu com a sonda 2 posicionada da mesma forma que no experimento anterior (Figura 4.6), porém à distância de dois diâmetros da face do cilindro, ou 62,7 mm em relação a linha de centro dos tubos, a sonda 1 não teve sua posição alterada. A posição das sondas pode ser visualizado na Figura 4.7.

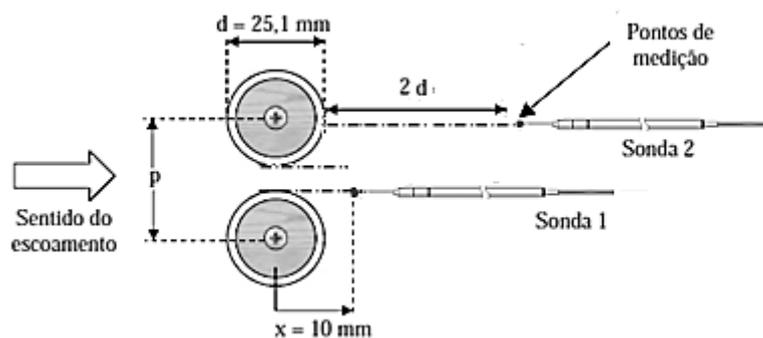


Figura 4.7 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição D

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os sinais das medições de velocidade instantâneas nos posicionamentos B, C e D, para frequência de aquisição de 1000 Hz e  $2^{17}$  (131072) pontos. O número de Reynolds manteve-se em  $1,386 \times 10^4$  e a velocidade de referência 10,14 m/s. Pode ser observado, pelas características do sinais obtidos pela sonda 2 nos três pontos de medição (V4, V6 e V8, conforme Tabela 3.1), que não fica claro se estes apresentam trocas de modo. Em função do posicionamento da sonda 1 permanecer o mesmo do caso anterior, as trocas de modo biestáveis do escoamento ainda estão presentes nos sinais de velocidade obtidos por esta (V3, V5 e V7).

Ao realizarmos a aproximação dos sinais, através da transformada discreta de ondaletas tipo Db20 e nível 9, observa-se que é possível identificar que ocorrem trocas de modo nos sinais de velocidade obtidos pela sonda 2 (V4, V6 e V8), nos mesmos instantes em que ocorrem as trocas de modo biestáveis nos sinais de velocidade obtidos pela sonda 1 (V3, V5 e V7).

Como a aproximação do sinal pela transformada de ondaletas remove as flutuações das altas frequências, mantendo somente as frequências entre 0 e 0,976 Hz, ocorre a formação de dois patamares de velocidade nos sinais aproximados. Assim apesar dos sinais originais, apresentarem valores semelhantes de velocidade para as flutuações, na aproximação por ondaleta, os sinais aproximado das velocidades obtidas pela sonda 2 (V4, V6 e V8) apresentam valores inferiores aos valores máximos dos sinais aproximados das velocidades obtidas pela sonda 1 (V3, V5 e V7).

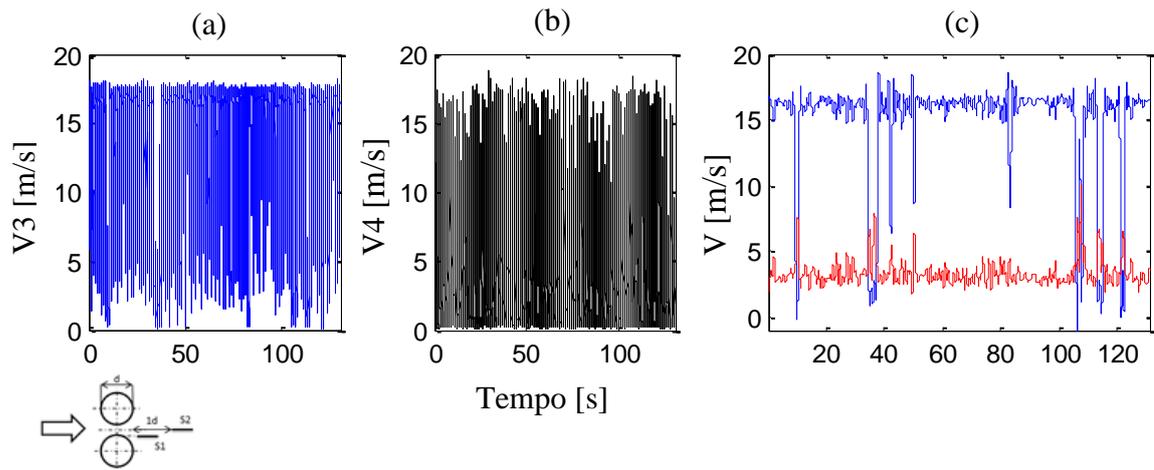


Figura 4.8 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V3. (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4)

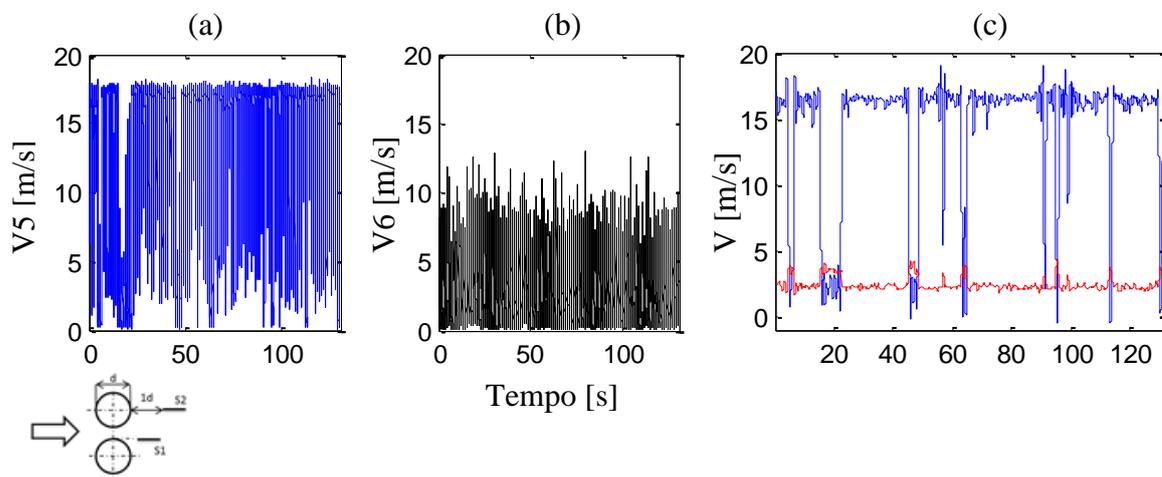


Figura 4.9 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V5. (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6)

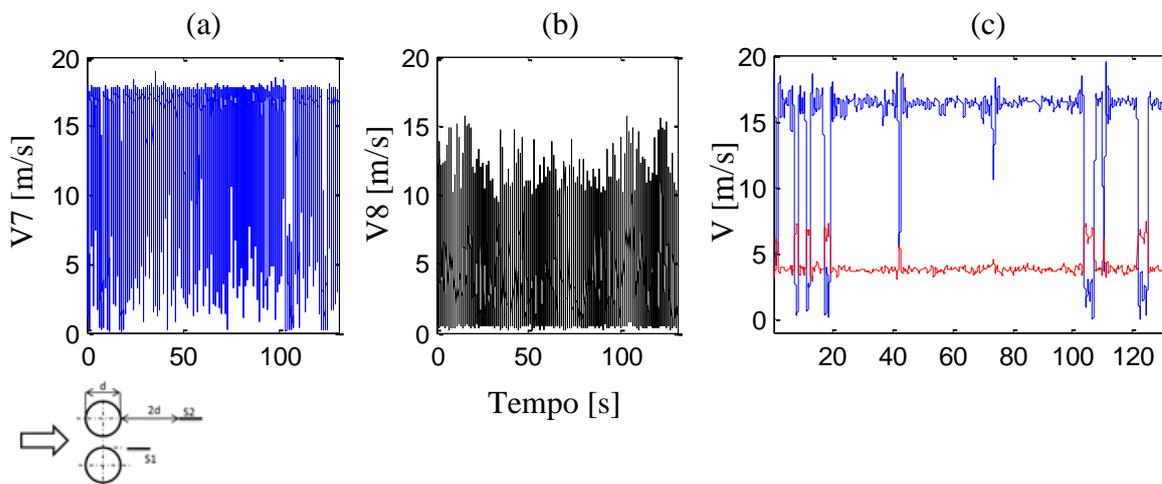


Figura 4.10 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V7. (b) Sonda 2-V8 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V7) (— V8)

A quinta posição de medição teve como referência a linha tangente dos tubos, da mesma forma que na posição A, porém a uma distância de dois diâmetros do cilindro ou 62,7 mm da linha de centro dos tubos. Da mesma forma que nas medições anteriores, a sonda 1 não teve seu posicionamento alterado. O esquema em detalhes do posicionamento pode ser visualizado na Figura 4.11.

A sexta posição a ser analisada teve a sonda 2 posicionada novamente no centro da fenda entre os dois cilindros, porém com a distância aumentada para dois diâmetros em relação à tangente do cilindro ou 62,7 mm em relação à linha de centro dos tubos. O posicionamento das sondas é ilustrado na Figura 4.12.

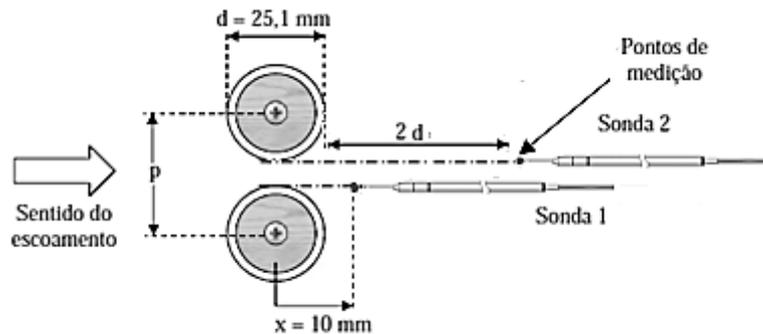


Figura 4.11 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição E

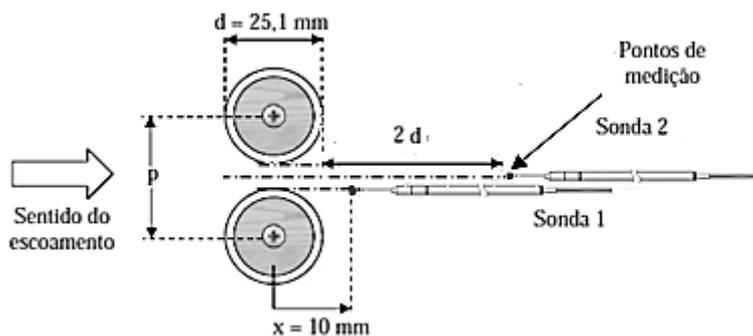


Figura 4.12 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e o posicionamento das sondas para a posição F

Nas Figuras 4.13 e 4.14 vemos os resultados para as medições de velocidade instantâneas realizadas nos posicionamentos E e F, a frequência de aquisição, o número de

Reynolds e o número de pontos adquiridos são os mesmos dos experimentos anteriores. Para estes pontos de medição, encontram-se sinais distintos de velocidade para a sonda 1 e para as velocidades adquiridas para a sonda 2. Pela aproximação dos sinais (Figura 4.13c e 4.14c) com a utilização da transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, novamente são eliminadas as flutuações das frequências maiores que 0,976 Hz, e é possível constatar que não são identificadas, nos sinais de velocidade obtidos pela sonda 2 (V6 e V7), as trocas de modo biestável presentes nos sinais de velocidade da sonda 1 (V9 e V11). Tal comportamento pode ser melhor compreendido quando analisada a distribuição das esteiras ao longo dos cilindros em relação ao posicionamento da sonda 2.

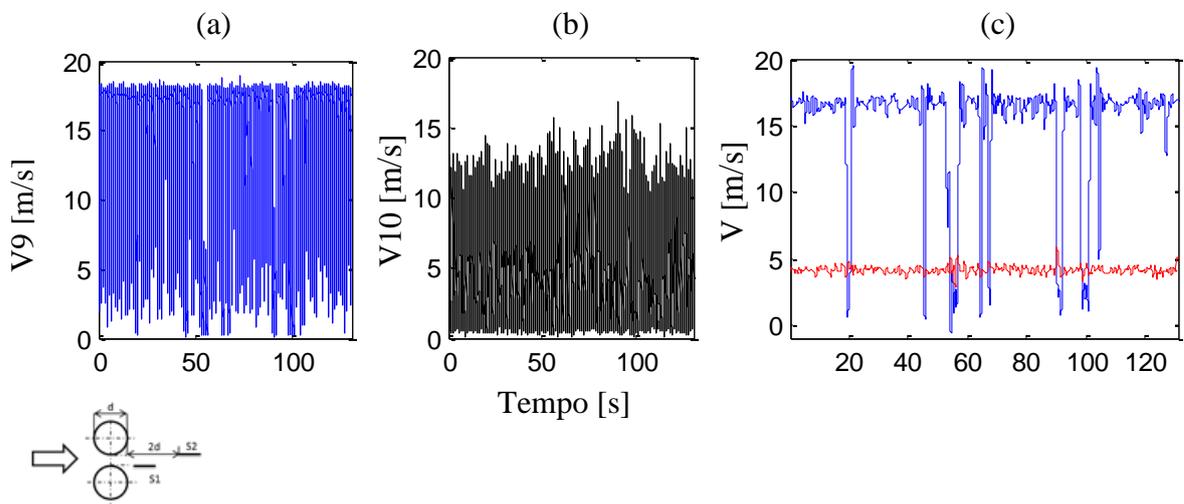


Figura 4.13 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V9, (b) Sonda 2-V10 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V9) (— V10).

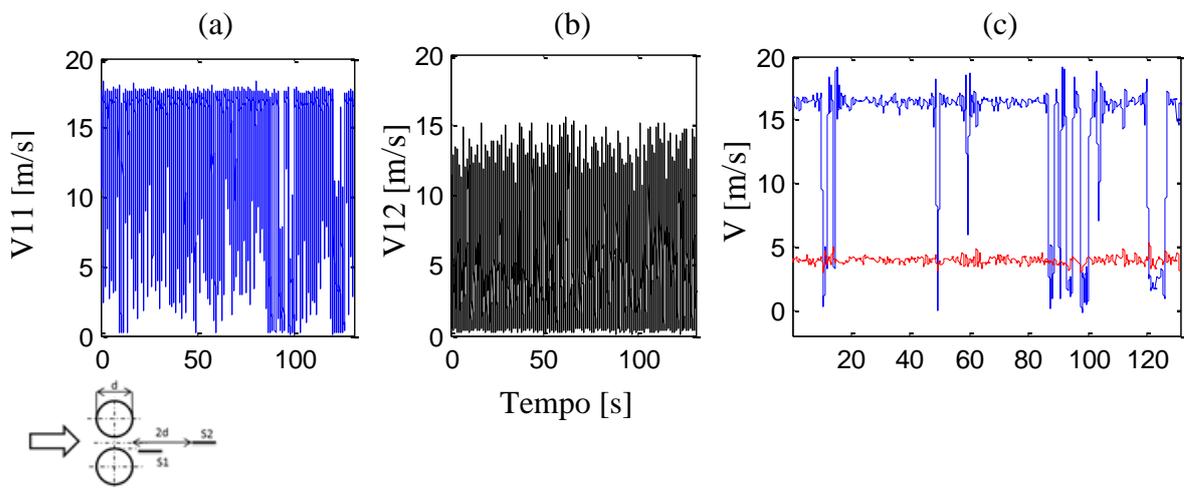


Figura 4.14 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,26$ . (a) Sonda 1-V11, (b) Sonda 2-V12 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V11) (— V12).

Nos dois casos em questão a sonda 2 encontra-se posicionada a uma distância de dois diâmetros dos cilindros, assim traçando-se um esquema do posicionamento das esteiras (Figura 4.15), pode-se ver que a sonda 2 encontra-se sempre dentro do mesmo tipo de esteira (esteira larga), ainda que a troca ocorra. Como os valores de velocidade para um mesmo tipo de esteira não variam de maneira significativa, ou, em outras palavras, a esteira larga sempre possui valores semelhantes de velocidade, bem como a esteira estreita, independente da direção na qual a fenda está defletida.

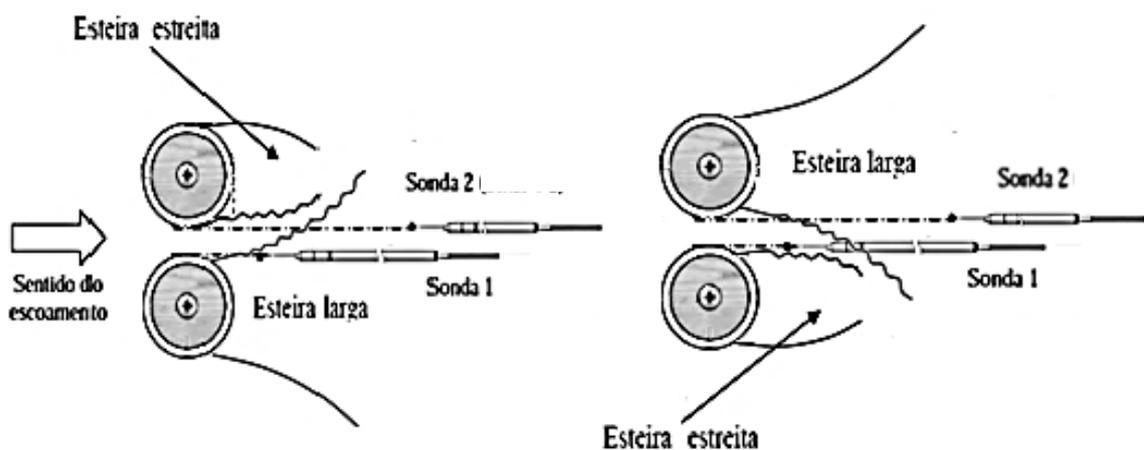


Figura 4.15 – Esquema do comportamento das esteiras em relação ao posicionamento das sondas (sonda 1-V9 e sonda 2-V10), na posição E.

Os sinais de velocidade instantânea obtidos pela sonda 2 nas posições E e F (V10 e V12) apresentam características de sinais estacionários, possibilitando assim uma análise estatística dos mesmos. A Tabela 4.1 mostra as características estatísticas dos dois sinais de velocidade V10 e V12 para as posições de medição E e F respectivamente.

Nos espectros de potência do sinal V10 para a posição E (Figura 4.16a) verifica-se a presença de um pico na frequência de 54 Hz que corresponde a um número de Strouhal de 0,13, baseado na velocidade de referência do escoamento livre, e um segundo pico em 102 Hz, cujo Strouhal é 0,25. Este segundo pico refere-se ao primeiro harmônico. Observa-se que, para o espectro de potência referente ao sinal de velocidade V12 para a posição F, é possível encontrar os mesmos picos de frequência.

Tabela 4.1 – Momentos estatísticos do sinais de velocidade V10 e V12, para  $f_s = 1$  kHz e  $p/d = 1,6$ .

	S2-V10 (Posição E)	S2-V12 (Posição F)
Velocidade Média [m/s]	4,11	3,92
Desvio Padrão [m/s]	2,04	2,08
Assimetria	0,92	1,05
Planicidade	4,27	4,57

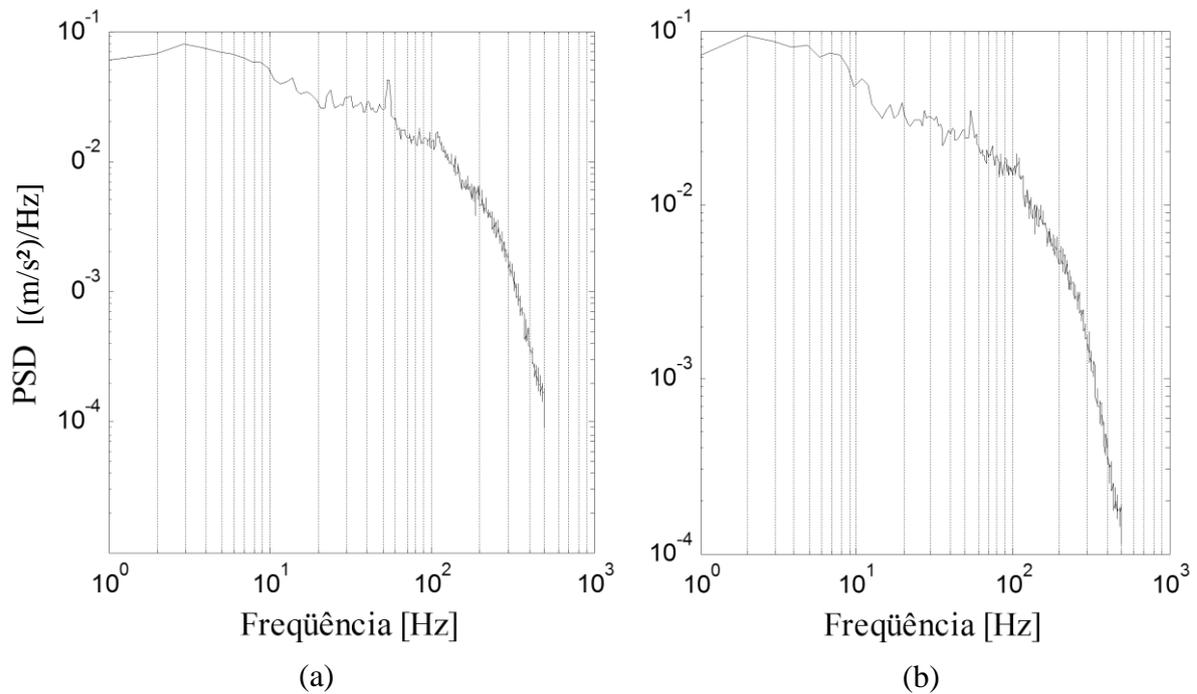


Figura 4.16 – Função densidade espectral de potência para os sinais de velocidade (a) Sonda 2-V10 e (b) Sonda 2-V12. Razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz.

#### 4.1.2 Razão de espaçamento $p/d = 1,16$

As medições para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$  foram realizadas apenas nos locais que apresentaram resultados mais relevantes, assim as medições foram realizadas nas posições A, B e C, já ilustradas nas Figuras 4.1, 4.5 e 4.6.

A Figura 4.17, mostra os resultados encontrados para as medições de velocidades instantâneas para razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , frequência de aquisição de 1000 Hz e  $2^{17}$  (131072) pontos de aquisição. O número de Reynolds do experimento é  $1,384 \times 10^4$ . As sondas encontram-se na posição de medição A conforme o esquema da Figura 4.1.

Como esperado os sinais apresentam a mesma simetria já encontrada para os sinais na razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ , devido ao posicionamento das sondas lado a lado e a mesma distância do centro dos cilindros. Quando é realizada a aproximação pela transformada discreta de ondaletas (Figura 4.18), nível 9 e ondaleta tipo Db20, fica claro que, quando V1 encontra-se na esteira larga, V2 encontra-se na fenda, e vice-versa. São identificadas 16 trocas de modo no escoamento durante o período de aquisição de dados.

Na Figura 4.19, é visto o espectrograma de energia dos sinais de velocidade instantâneas da razão de espaçamento  $p/d = 1,16$  adquiridos na posição A, através da transformada contínua de ondaletas, tipo Db20.

A Figura 4.19a apresenta o espectrograma referente ao sinal V1, pode-se observar que a energia se concentra principalmente nos instantes de tempo correspondentes às trocas de modo do escoamento, e nas faixas de frequência de 5 a 40 Hz, o restante do espectrograma apresenta níveis muito baixos de energia que correspondem as baixas velocidades do sinal quando a sonda se encontra na esteira larga.

Já a Figura 4.19b mostra o espectrograma referente ao sinal V2, nota-se que a energia apresenta uma distribuição mais homogênea ao longo do tempo e das faixas de frequência. Por outro lado, não é possível identificar grandes picos de energia nos momentos em que ocorrem as trocas de modo no escoamento. A maior concentração de energia entretanto, encontra-se na faixa de frequências de 10 Hz.

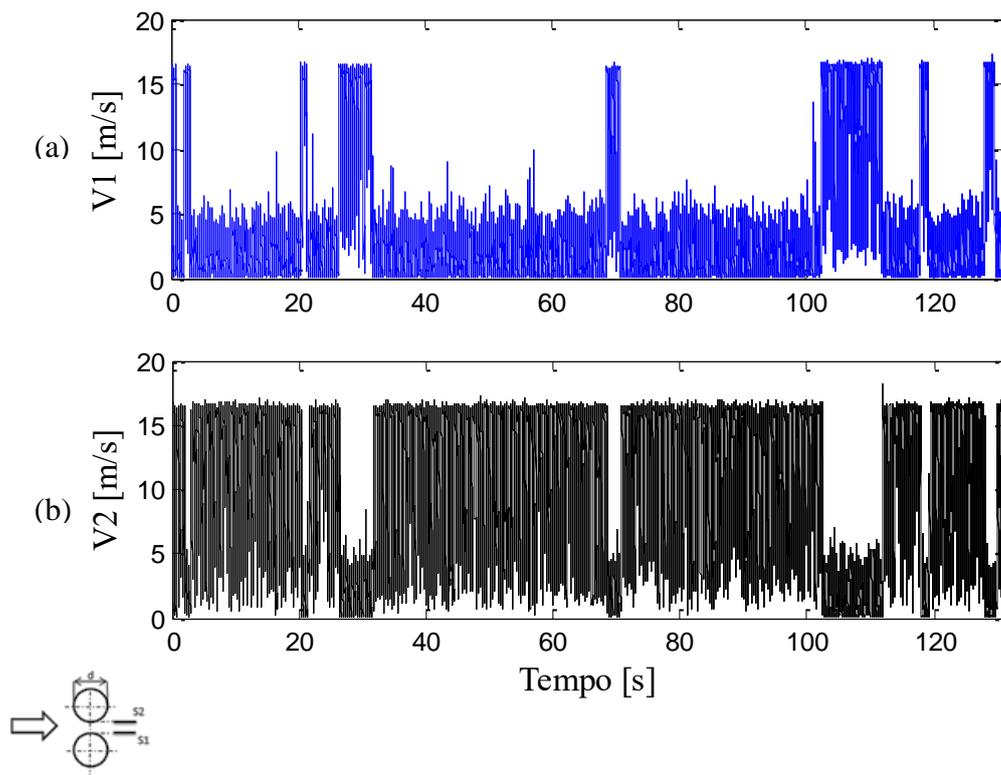


Figura 4.17 - Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm e  $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2.

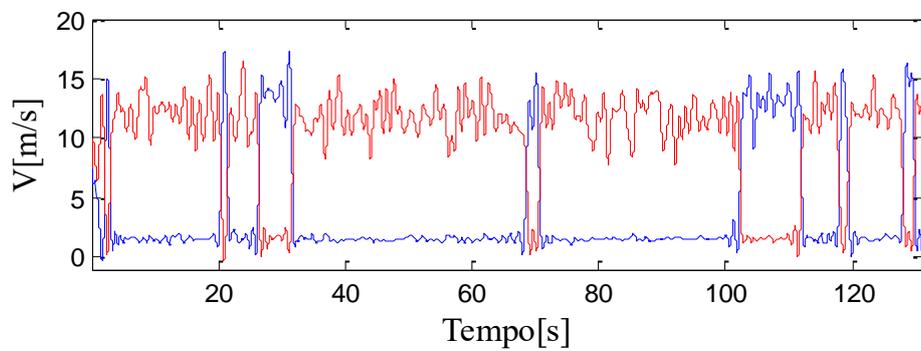


Figura 4.18 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.17 através de DWT tipo Db20. (— V1) (— V2).

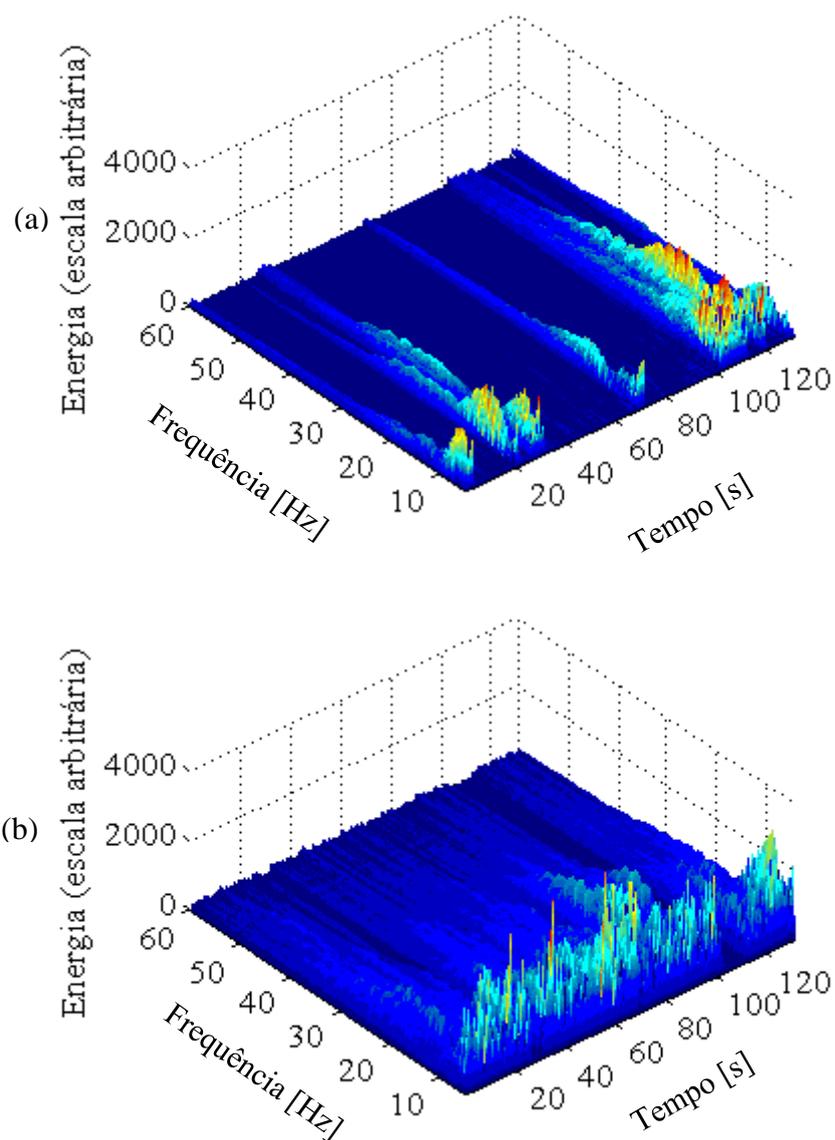


Figura 4.19 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.17. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.

Para as posições de medição B e C, para razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , mesmo número de Reynolds e número de pontos do experimento anterior, é verificado um comportamento semelhante àquele apresentado nos mesmos pontos, para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ .

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os sinais de velocidade instantânea encontrados para estas posições de medição. Através da aproximação dos sinais pela transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, observa-se que os sinais de velocidade obtidos pela sonda 2 (V4

e V6), para  $p/d = 1,16$  acompanham as trocas de modo biestáveis captadas pelos sinais de velocidade obtidos pela sonda 1 (V3 e V5). A remoção das flutuações de velocidade, das frequências superiores a 0,976 Hz, pela transformada discreta de ondaletas, faz com que os sinais aproximados das velocidades V4 e V6, não atinjam os valores de máximos presentes nos sinais aproximados das velocidades V3 e V5.

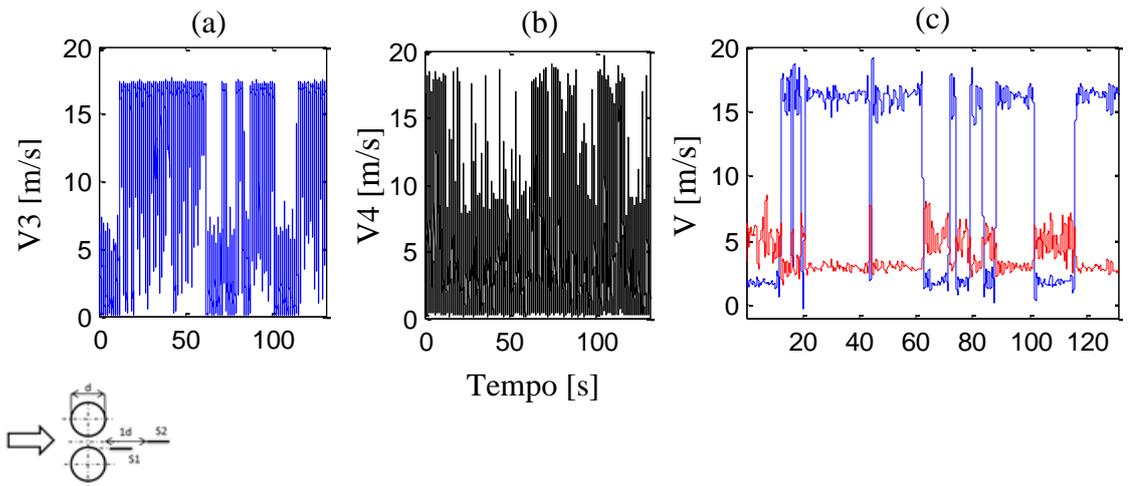


Figura 4.20 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V3, (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V3) (— V4).

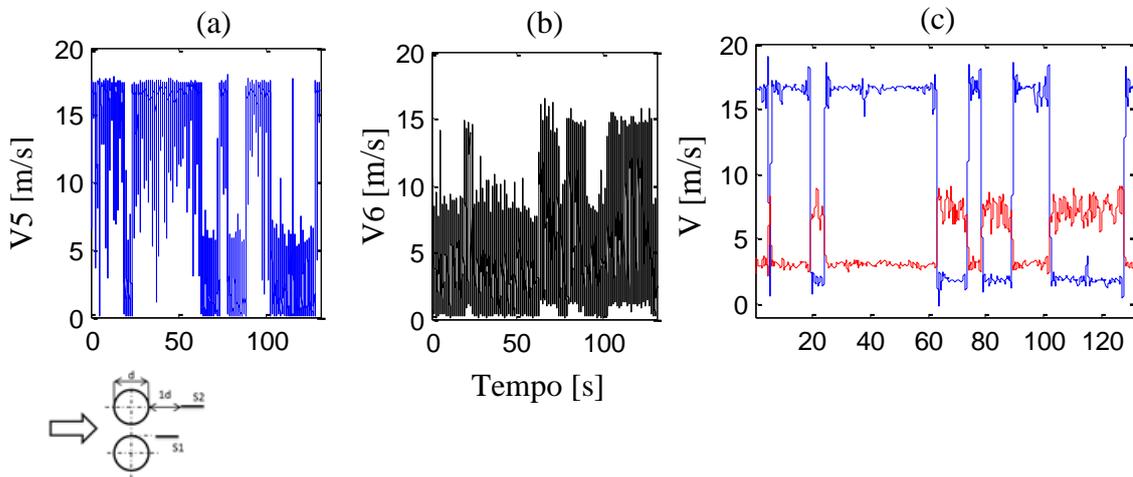


Figura 4.21 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1$  kHz,  $p/d = 1,16$ . (a) Sonda 1-V5, (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V5) (— V6).

### 4.1.3 Razão de espaçamento $p/d = 1,6$

Um estudo similar foi realizado para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , com medições de velocidades instantâneas e flutuações nas posições A, B e C, já referidas anteriormente nas Figuras 4.1, 4.5 e 4.6,.

A Figura 4.22 mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para a posição de medição A, para os cilindros dispostos lado a lado, com razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , frequência de aquisição de 1000 Hz e  $2^{17}$  (131072) pontos. O número de Reynolds do experimento é de  $1,384 \times 10^4$  e a velocidade de referência é de 10,14 m/s.

São observadas sucessivas trocas de modo no escoamento, as quais não se dão de maneira tão definida quanto nas razões de espaçamento  $p/d = 1,16$  e  $1,26$  pois os sinais adquiridos não chegam a estabelecer um patamar de velocidade por um período de tempo longo o suficiente. Pela aproximação dos sinais através da transformada discreta de ondaletas (Figura 4.23), tipo Db20 e nível 9, verifica-se que ocorrem em torno de 116 trocas de modo durante o tempo de aquisição dos dados.

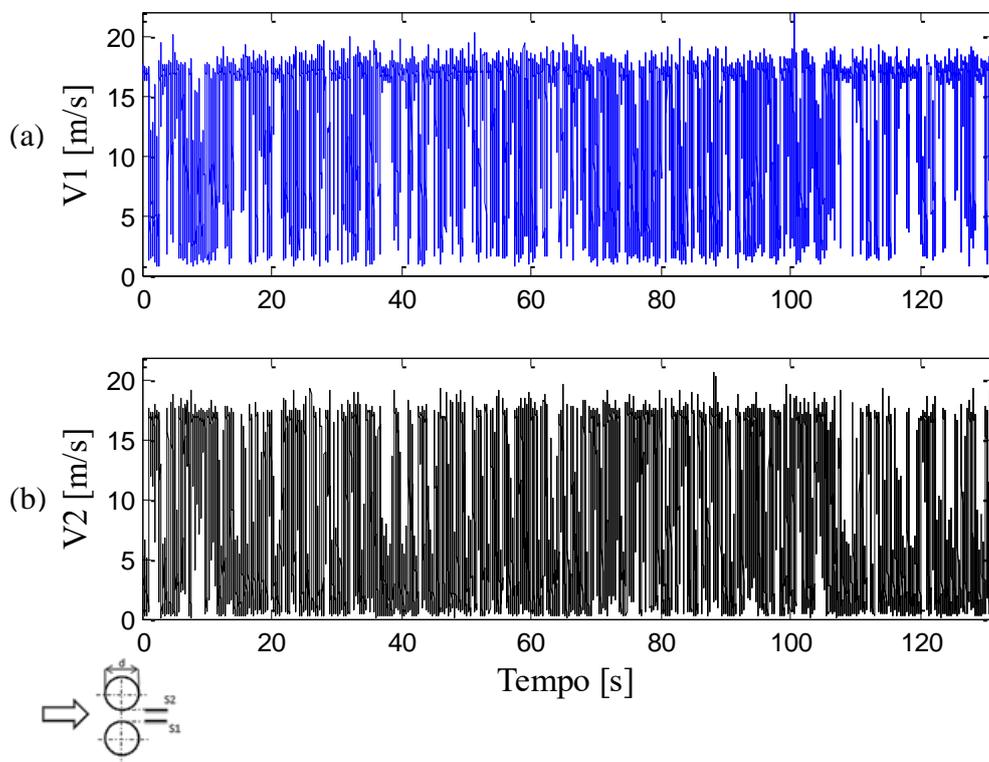


Figura 4.22 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm e  $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V1. (b) Sonda 2-V2

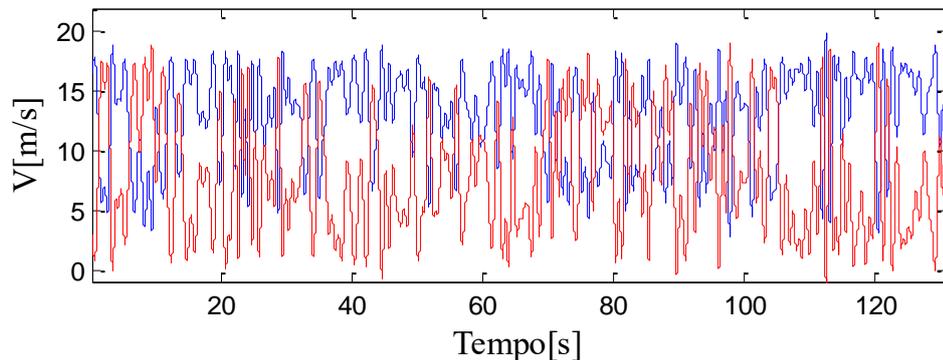


Figura 4.23 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz), dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.22 através de DWT tipo Db20 (— V1) (— V2).

Através do espectrograma de energia (Figura 4.24), obtidos pela transformada contínua de ondaleta dos sinais de V1 e V2, para intervalos de frequência de 1 Hz na faixa de 5 a 60 Hz, é possível perceber que ambos os sinais apresentam baixos níveis de energia, e que se concentram predominantemente nas faixas de frequência de 5 a 10 Hz.

O espectrograma de energia do sinal V1 (Figura 4.24a), devido às velocidades predominantemente mais elevadas do sinal, apresenta picos com valores mais elevados, enquanto que o espectrograma do sinal V2 (Figura 4.24b) apresenta picos mais sutis. Em nenhum momento, apenas através da observação dos espectrogramas de ondaletas, é possível identificar claramente o momento em que as trocas de modo ocorrem no escoamento. Isto se deve ao fato de o sinal apresentar trocas intermitentes e não formar patamares de velocidade como nas razões de espaçamento anteriormente estudadas.

A Figura 4.25 mostra os sinais de velocidades no intervalo de tempo de 0,6 a 1,6 segundos da Figura 4.22. É possível notar que as trocas de modo do escoamento não se dão de maneira instantânea, ocorrendo um crescimento gradativo das flutuações de velocidade e da energia contida nos sinais, até o momento em que a troca ocorre de fato. Tais características estão de acordo com os resultados encontrados no estudo experimental realizado por De Paula, 2008.

A Figura 4.26 mostra os espectrogramas energia dos sinais de velocidade V1 e V2, gerados através de transformada contínua de ondaletas, com intervalos de frequência de 1 Hz, na faixa entre 1 e 80 Hz. Destes espectrogramas é possível observar que há uma distribuição

de energia espalhada no intervalo de tempo entre 0,9 e 1,1 segundos, correspondendo ao intervalo da troca entre os modos do escoamento. Nota-se a presença de um crescimento gradual da energia nos momentos que precedem a troca de modo, esse aumento da energia é percebido em ambos os sinais.

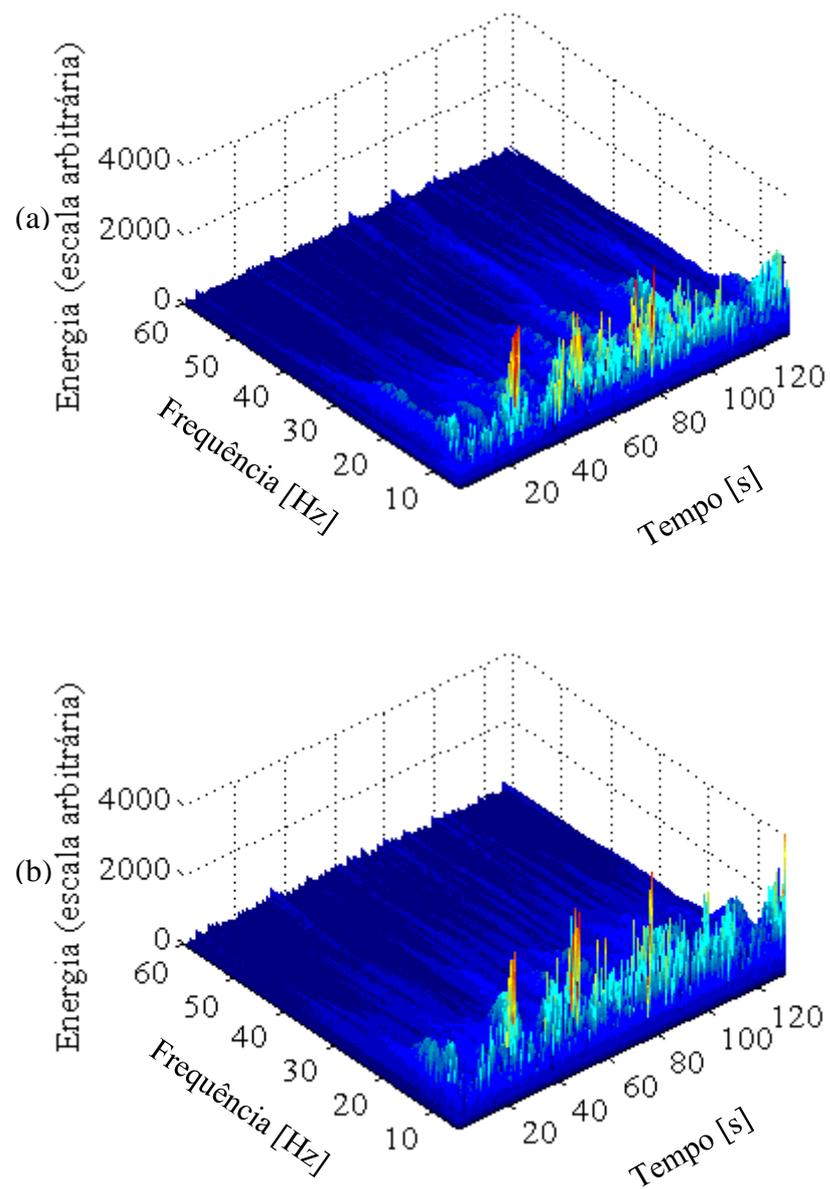


Figura 4.24 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.22. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2

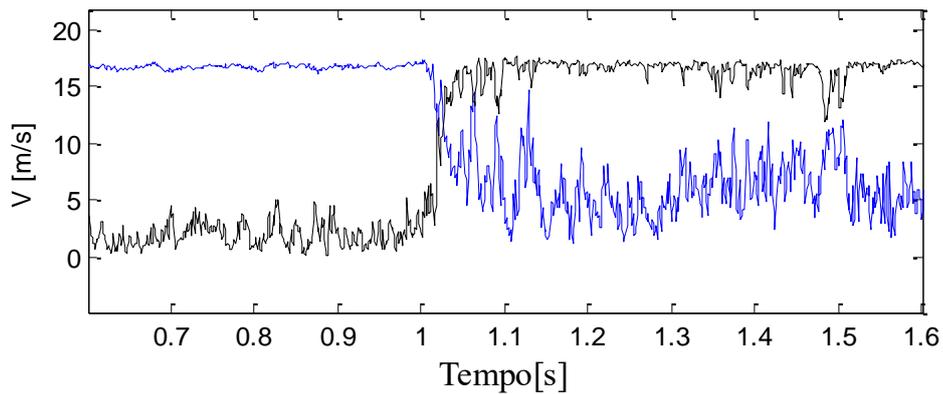


Figura 4.25 – Sinais de velocidade instantânea da Figura 4.22 para o intervalo de tempo de 0,6 a 1,6 segundos. ( — )V1 ( — )V2.

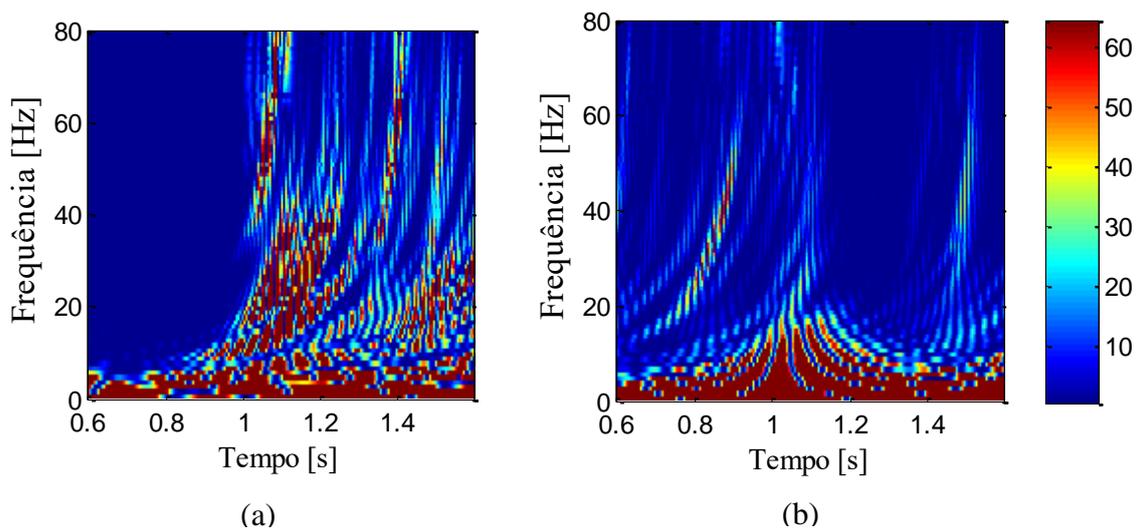


Figura 4.26 – Espectrograma de energia dos sinais de velocidade da Figura 4.25, para o intervalo de tempo de 0,6 a 1,6 segundos. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram os sinais de velocidade obtidos nos posicionamentos B e C, respectivamente, para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , frequência de aquisição 1000 Hz. O número de Reynolds e a velocidade de referência permanecem os mesmos do experimento anterior.

Nas Figuras 4.27c e 4.28c são ilustradas as aproximações dos sinais para os posicionamentos B e C, respectivamente, através da transformada discreta de ondaleta, tipo

Db20 e nível 9. Observando estas aproximações dos sinais verificam-se duas situações referentes às características dos sinais adquiridos.

Para o sinal de velocidade adquirido pela sonda 2 na posição B, a aproximação do sinal pela transformada discreta de ondaleta, mostra que o sinal V4 acompanha as trocas de modo que ocorrem no sinal obtido pela sonda 1 (V3), porém em função da remoção das flutuações das frequências superiores a 0,976 Hz, o sinal aproximado de V4, não atinge os valores elevados de velocidade do sinal aproximado de V3. Nota-se que as trocas de modo ocorrem de maneira intermitente e devido a sua irregularidade não é possível uma análise estatística.

Ao efetuar-se a aproximação dos sinais de velocidade instantânea adquiridos na posição C (Figura 4.28c) através da transformada discreta de ondaletas, é verificado que o sinal obtido pela sonda 2 (V6) nesta posição, não apresenta nenhuma característica que remeta às trocas de modo intermitentes presentes no sinal da sonda 1 (V5). Esta característica do sinal permite sua análise estatística, sendo os valores dos momentos estatísticos para o sinal da sonda 2 (V6), encontrados na Tabela 4.2.

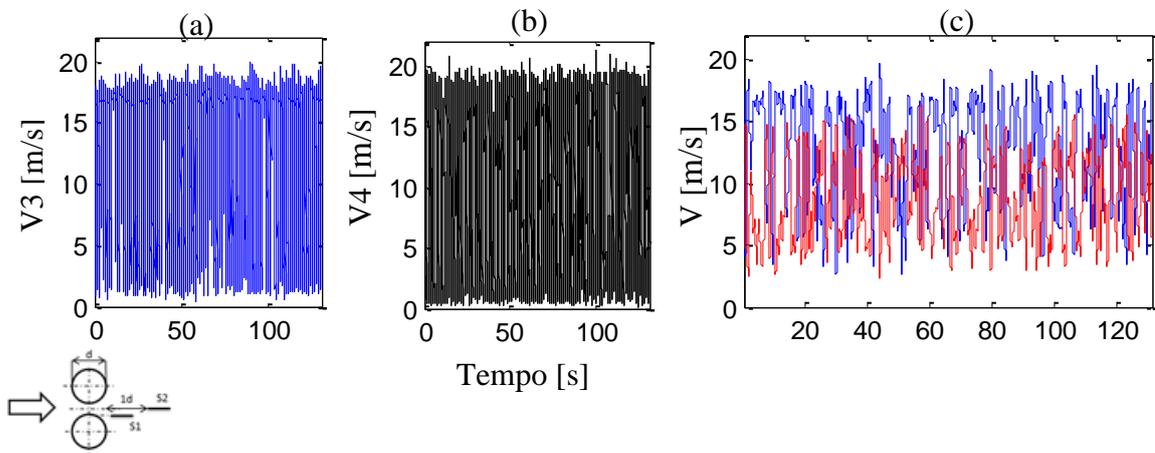


Figura 4.27 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1000$  Hz, e  $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V3. (b) Sonda 2-V4 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V3) (— V4).

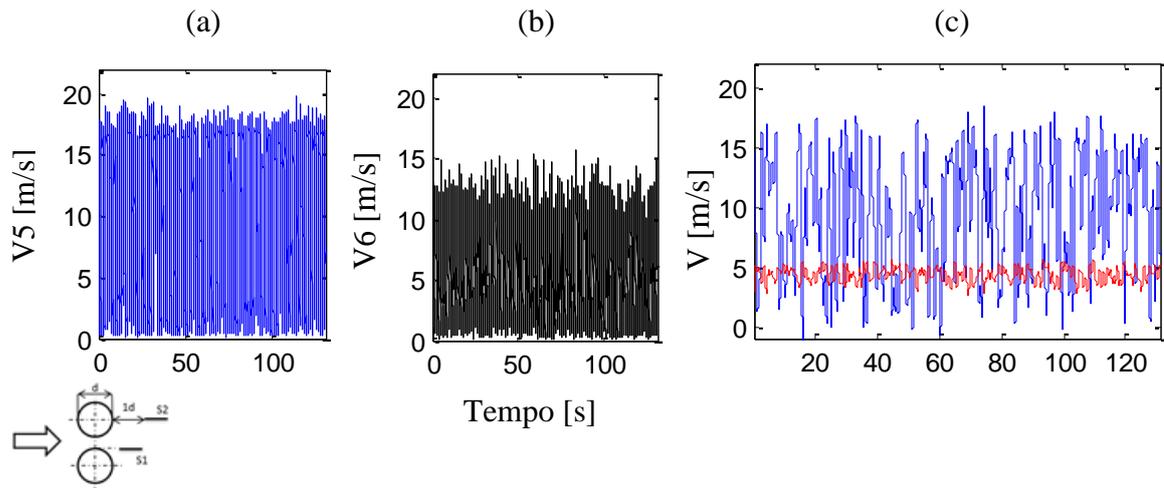


Figura 4.28 – Sinais de velocidades instantâneas obtidas para  $f_s = 1000$  Hz, e  $p/d = 1,6$ . (a) Sonda 1-V5. (b) Sonda 2-V6 e (c) DWT nível 09 (0 a 0,976 Hz) (— V5) (— V6).

Tabela 4.2 – Momentos estatísticos para o sinal de velocidade instantânea V6, para  $f_s = 1$  kHz e  $p/d = 1,6$ , no ponto de medição B

	Sonda 2-V6 (Posição C)
Velocidade média [m/s]	4,34
Desvio Padrão [m/s]	2,07
Assimetria	0,76
Planicidade	3,71

## 4.2 Canal aerodinâmico com grade promotora de turbulência.

A adição de uma grade de barras redondas paralelas ao canal aerodinâmico, a montante dos tubos, ocasionou o aumento da intensidade de turbulência. A curva de decaimento para a componente axial da velocidade foi apresentada no Cap. 3, Figura 3.4.

As medições foram realizadas primeiramente nas seis posições ilustradas na Figura 3.8 e já detalhadas anteriormente. A adição da grade ao escoamento tem a finalidade de verificar se o aumento da intensidade de turbulência ocasiona alterações no comportamento do fenômeno da biestabilidade no escoamento sobre dois cilindros paralelos.

#### 4.2.1 Razão de espaçamento $p/d = 1,26$

A Figura 4.29 nos mostra os resultados obtidos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$  com frequência de aquisição de 1 kHz, na posição de medição A. Os tubos foram posicionados a 150 mm da grade promotora de turbulência e as sondas se encontram na posição A, conforme Figura 4.1. O número de Reynolds do experimento é de  $1,684 \times 10^4$  e a velocidade de referencia é 9,92 m/s.

É visto através dos sinais adquiridos para V1 e V2, que as trocas de modo do escoamento ocorrem de maneira bastante intensa e de forma indefinida. A aproximação do sinal pela transformada discreta de ondaleta (Figura 4.30), tipo Db20 e nível 9 elimina as flutuações de velocidade nas frequências acima de 0,976 Hz, e através do sinal aproximado é possível identificar os momentos em que trocas de modo quase intermitentes ocorrem no escoamento.

Percebe-se por meio da aproximação, que os sinais V1 e V2 não formam patamares bem definidos de velocidade, devido a intermitência das trocas de modo existentes no escoamento. Essa característica também se deve ao aumento da intensidade de turbulência que torna o escoamento menos estável. É possível ver também através das aproximações dos sinais, que mesmo as sondas 1 e 2 estando posicionadas lado a lado e a mesma distância do centro dos cilindros, o sinal aproximado da velocidade V2 apresenta-se em uma faixa de valores mais baixos que o sinal aproximado da velocidade V1, em função da eliminação das flutuações de alta frequência. Assim os sinais aproximados formam dois patamares distintos de velocidade, porém mantém a característica de simetria.

Através dos espectrogramas de energia (Figura 4.31), gerados a partir dos sinais de velocidade da Figura 4.29, através da transformada contínua de ondaletas, tipo Db20, é possível identificar que o comportamento, tanto de V1 quanto de V2, é bastante semelhante. A Figura 4.31a mostra o espectrograma referente ao sinal V1, pode-se ver que o sinal apresenta níveis de energia mais elevados quando comparado ao sinal V2 (Figura 4.31b), devido aos valores mais elevados de velocidade. O espectrograma do sinal V2 apresenta os valores de energia distribuídos de maneira mais uniforme ao longo do tempo. A distribuição de energia encontra-se em ambos os espectrogramas na faixa de 5 a 10 Hz. Não é possível identificar claramente através dos espectrogramas os momentos em que as trocas de modo ocorrem no escoamento devido a sua característica intermitente.

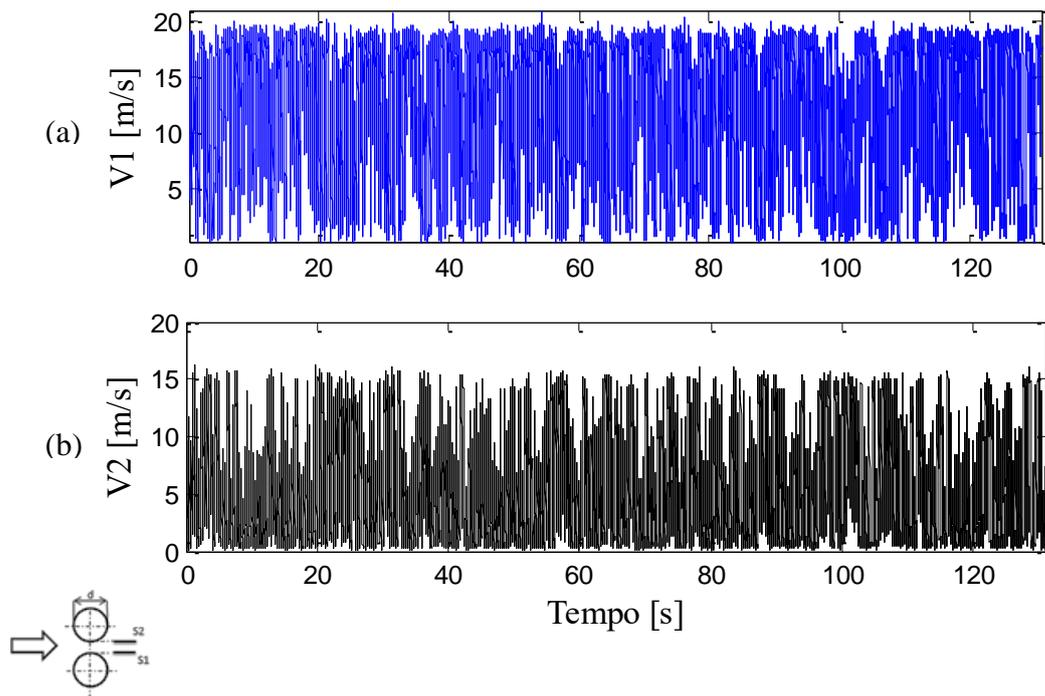


Figura 4.29 – Sinal de Velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade, na posição A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.

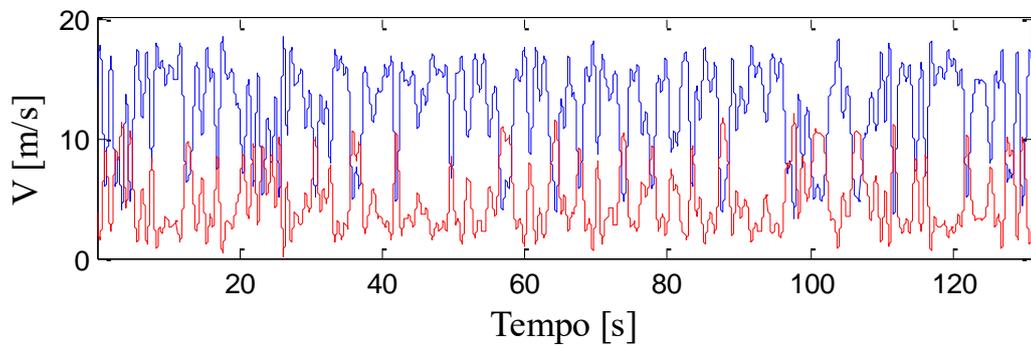


Figura 4.30 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.29 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2).

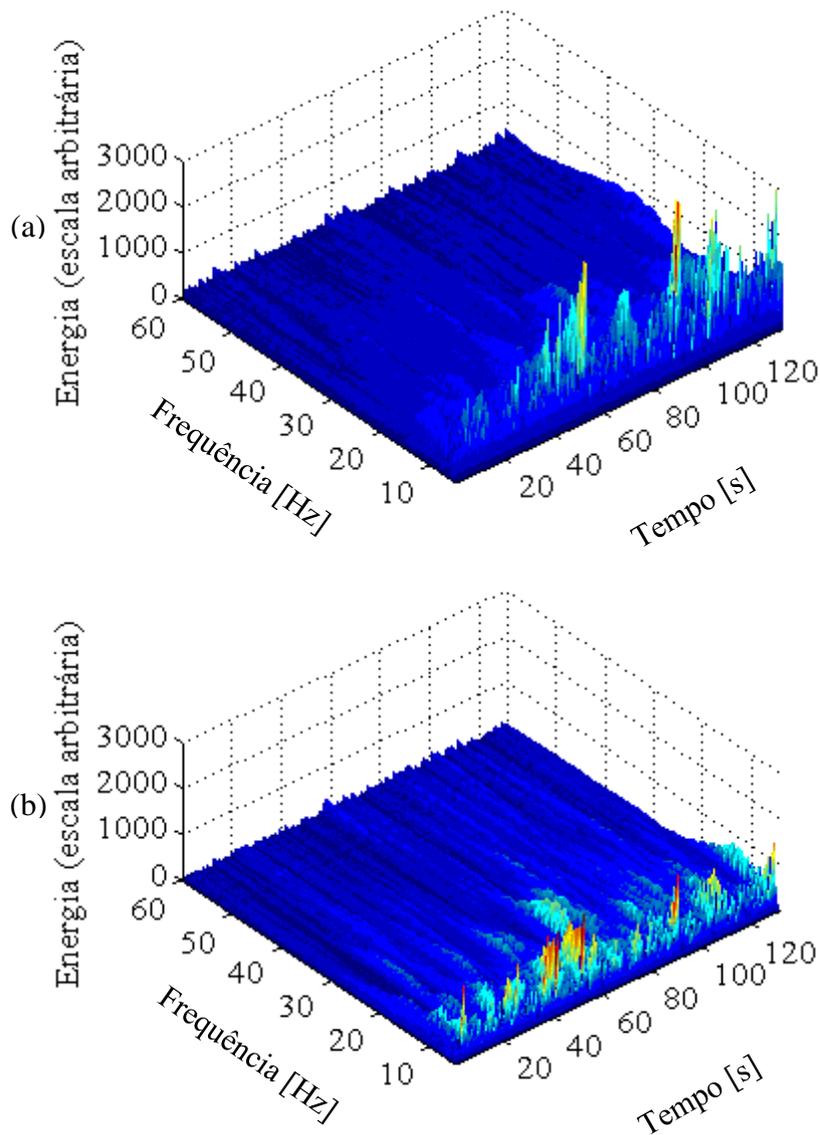


Figura 4.31 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.29. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2

Analisando-se o intervalo de tempo de 1,25 a 2 segundo (Figura 4.32) dos sinais de V1 e V2, é visto que as trocas de modo não ocorrem de maneira instantânea, ocorrendo um crescimento gradativo da energia e das flutuações de velocidade, instantes antes que a troca ocorra. A Figura 4.33 mostra os espectrogramas de energia para os sinais V1 e V2 nos intervalos de 1,25 a 2 segundos. Observa-se que ocorre um crescimento e espalhamento da energia entre 1,4 e 1,5 segundos, que corresponde aos instantes que precedem a troca de modos. Esta distribuição de energia chega a faixas de frequência de 10 a 100 Hz.

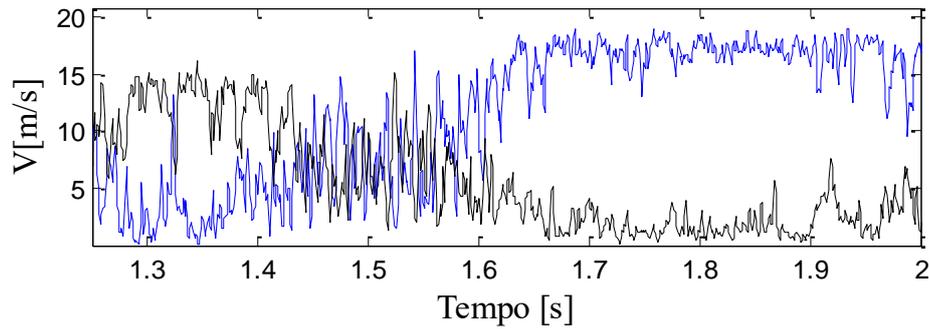


Figura 4.32 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 1,25 a 2 segundos da Figura 4.29. (—) V1 (—) V2.

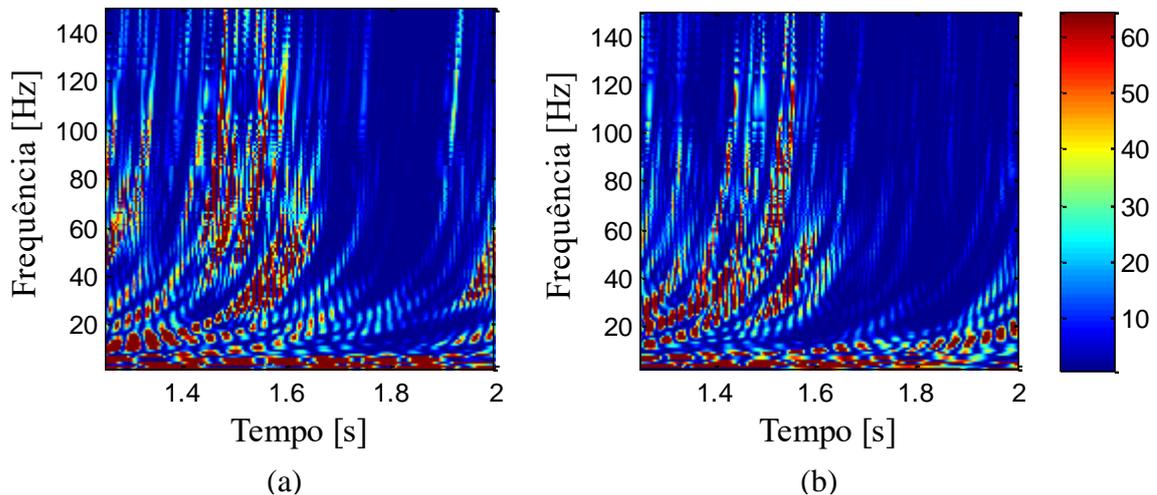


Figura 4.33 – Espectrograma de energia dos sinais de velocidade da Figura 4.32, para o intervalo de tempo de 1,25 a 2 segundos. (a) Sonda 1-V1 (b) Sonda 2-V2.

Na Figura 4.34 tem-se os sinais de velocidade instantânea obtidos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ , a 150 mm da grade promotora de turbulência, para a posição B, descrita anteriormente na Figura 4.5. O número de Reynolds e frequência de aquisição, permanecem os mesmos do experimento anterior. É possível observar através destes sinais que as trocas de modo permanecem ocorrendo de maneira irregular ao longo do período de tempo adquirido. Através da aproximação do sinal, com a utilização da transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, vemos que a aproximação do sinal da velocidade V4 acompanha as trocas de modo do escoamento juntamente com o sinal de velocidade V3,

porém devido a filtragem das frequências superiores a 0,976 Hz pela ondaleta, os dois sinais aproximados formam dois patamares de velocidades, sendo os valores máximos do sinal V3 ficam na faixa dos valores mínimos do sinal V4

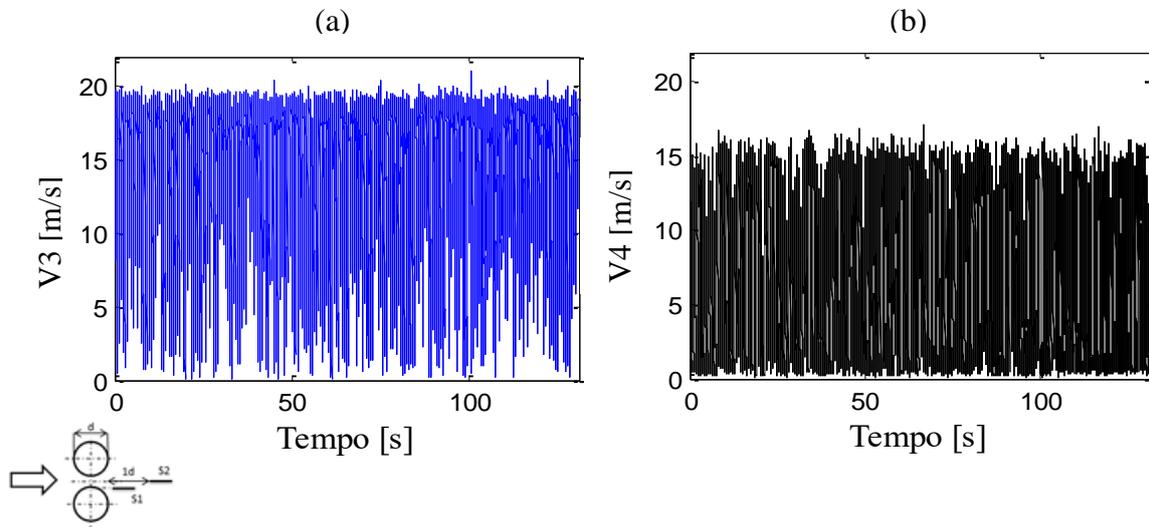


Figura 4.34 - Sinais de velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz a  $x = 150$  mm na posição B. (a) Sonda 1-V3 (b) Sonda 2-V4.

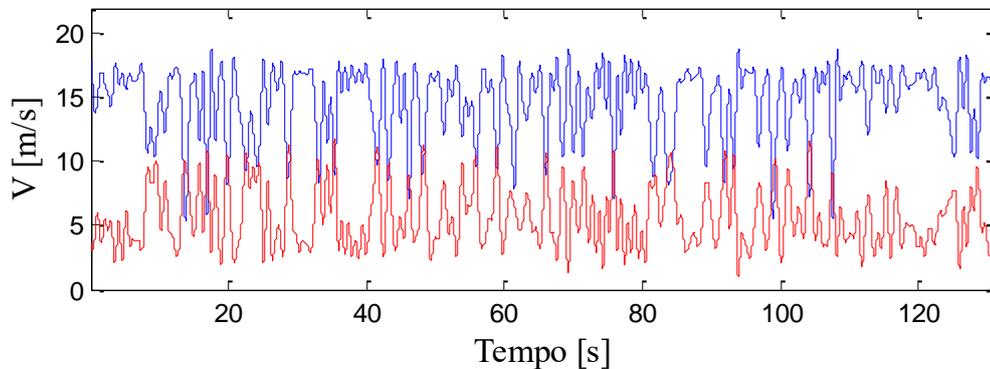


Figura 4.35 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.34 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4).

A Figura 4.36 apresenta os sinais de velocidades instantâneas adquiridas para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ , a 150 mm a jusante da grade promotora de turbulência, para a posição de medição C. Ao ser feita a análise dos sinais de velocidade, percebe-se que ocorre um decaimento nos valores das flutuações encontradas para o sinal V6, em comparação ao sinal medido para V5.

Ao efetuar-se a aproximação dos sinais através da transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, para os sinais adquiridos no posição C (Figura 4.37), verifica-se que o sinal V6, não acompanha as trocas de modo do escoamento verificadas no sinal V5.

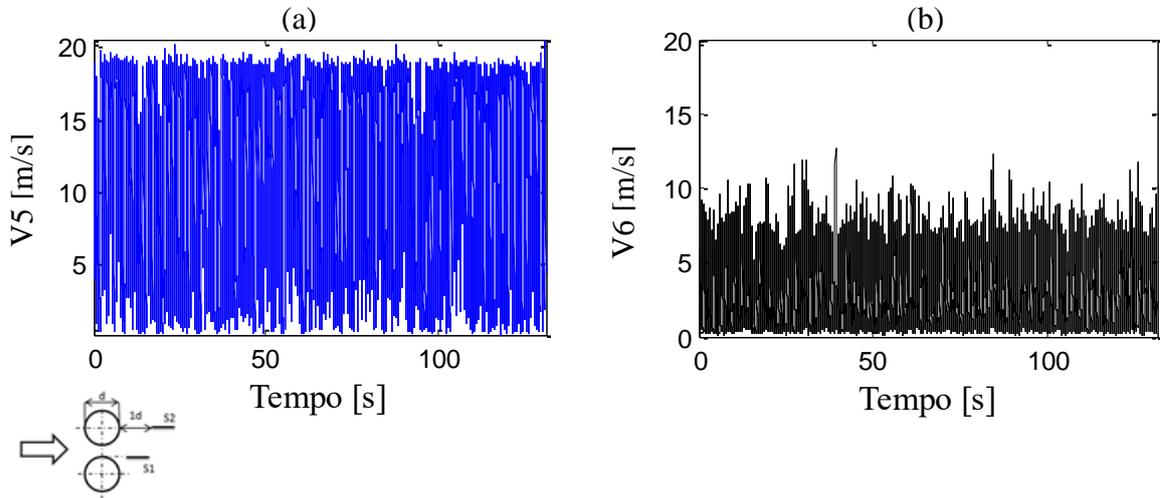


Figura 4.36 – Sinais de velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade na posição C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6.

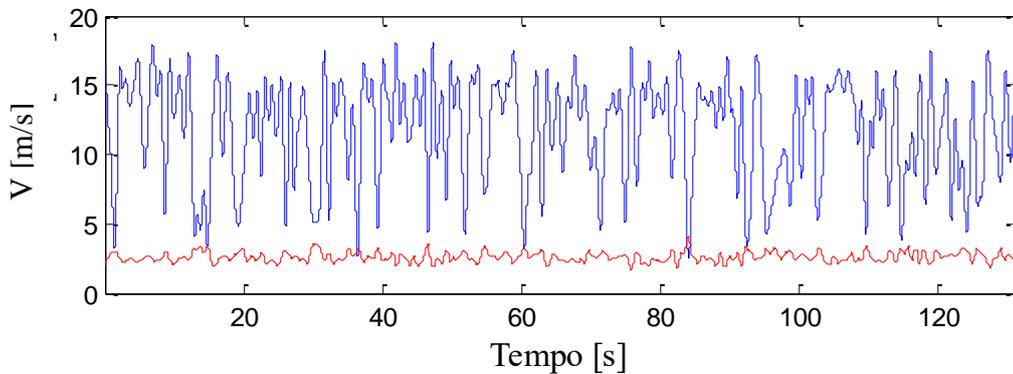


Figura 4.37 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.36 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6).

As Figuras 4.38 e 4.40 apresentam os sinais de velocidades instantâneas para as posições de medição D e E, respectivamente, para o mesmo número de Reynolds, velocidade de referência e distância da grade dos experimentos anteriores. Ambos os sinais de velocidades adquiridos pela sonda 2 (V8 e V10), apresentam valores de flutuações inferiores àqueles registrados para os sinais obtidos pela sonda 1 (V7 e V9). Ao ser feita a aproximação dos sinais através da transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, dos sinais

medidos nas posições D e E (Figura 4.39 e 4.41 respectivamente) verifica-se a ocorrência de pequenos picos de velocidade em momentos correspondentes às trocas de modo do escoamento, principalmente nos instantes onde as flutuações de V7 e V9 apresentam maior amplitude.

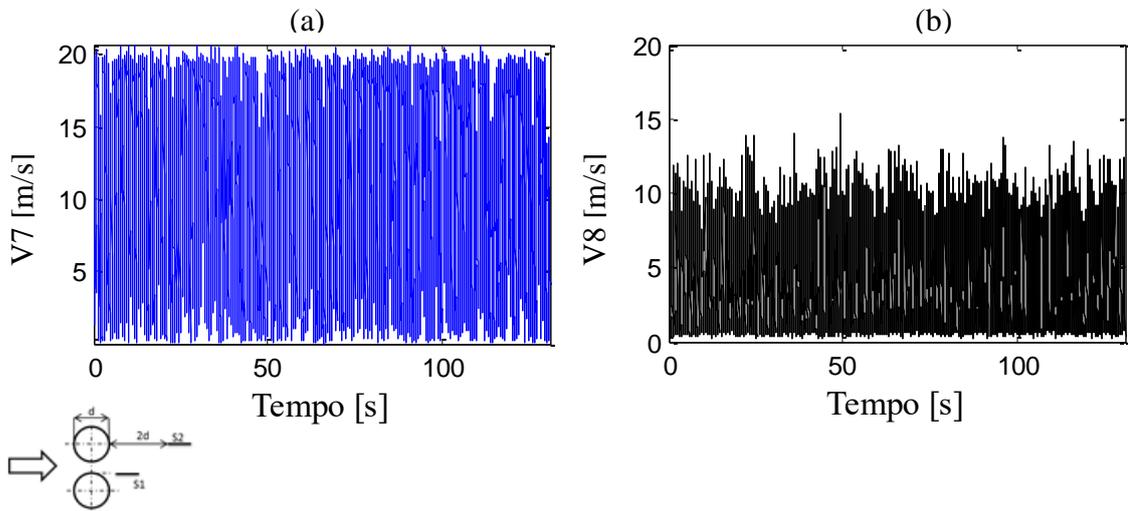


Figura 4.38 – Sinais de velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade na posição D. (a) Sonda 1-V7 e (b) Sonda 2-V8.

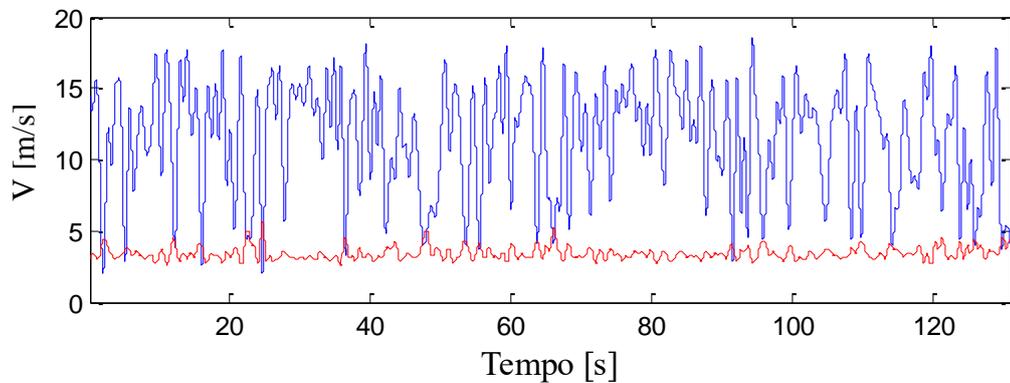


Figura 4.39 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.38 através de DWT, tipo Db20 (— V7) (— V8).

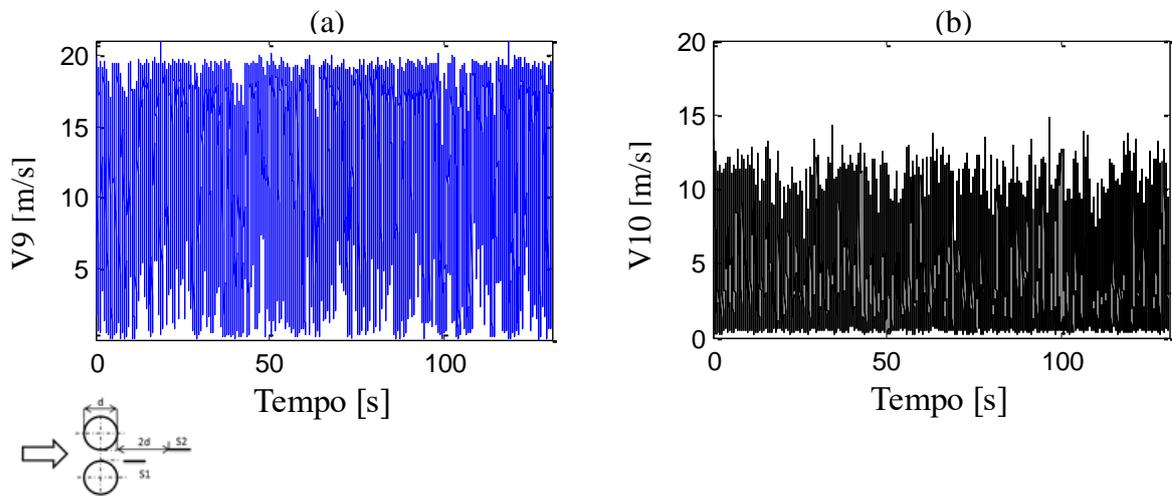


Figura 4.40 – Sinais de velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade na posição E. (a) Sonda 1-V9 e (b) Sonda 2-V10.

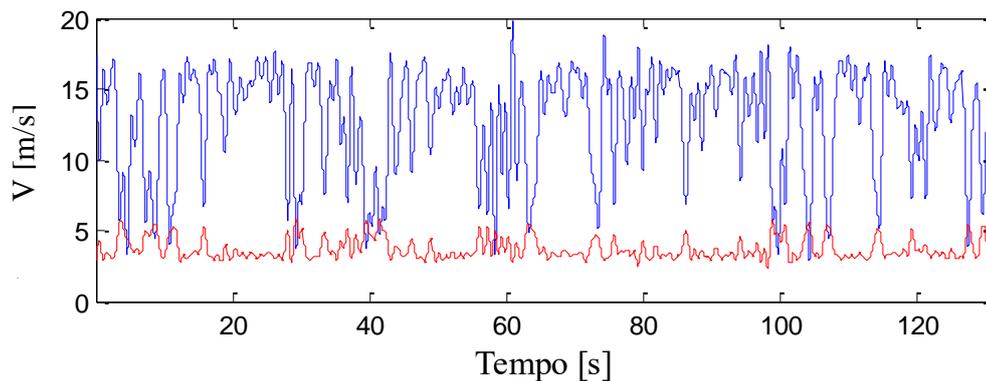


Figura 4.41 – Aproximação de nível 09 (0 a 0,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.40 através de DWT, tipo Db20 (— V9) (— V10).

Na Figura 4.42 são mostrados os sinais de velocidade instantânea adquiridos para a posição F, o número de Reynolds permanece  $1,684 \times 10^4$ , a frequência de aquisição 1000 Hz, e a distância de 150 mm da grade. Observa-se que de forma semelhante ao ocorrido nos sinais referentes aos pontos de medição anteriores, as flutuações do sinal V12 (Figura 4.42b) apresentam valores inferiores àqueles encontrados no sinal V11 (Figura 4.42a).

Ao ser realizada a aproximação dos sinais (Figura 4.43), através da transformada discreta de ondaleta, tipo Db20 e nível 9, é verificado que o sinal V12 apresenta picos de

velocidade, em instantes que correspondem as trocas de modo do escoamento, porém ocorre uma redução em relação aos valores de velocidade de V11. Tal redução possivelmente se deve ao aumento da intensidade de turbulência, a qual também contribui em relação ao aumento da intensidade das trocas e com a forma intermitente com que estas ocorrem.

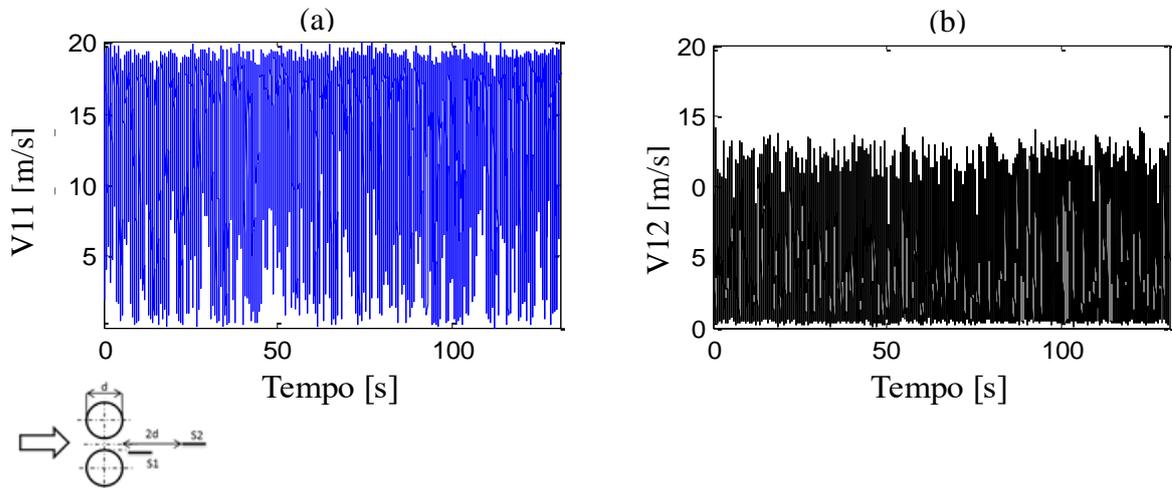


Figura 4.42 – Sinal de Velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade na posição F. (a) Sonda 1–V11 e (b) Sonda 2–V12.

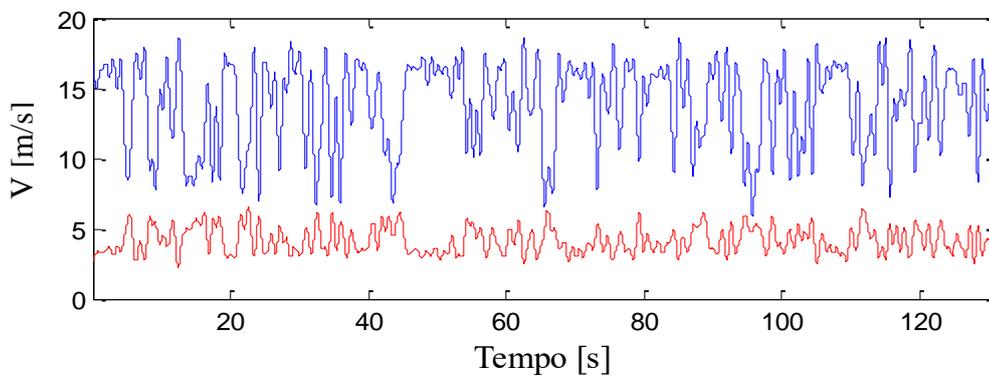


Figura 4.43 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.42 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V11) (— V12).

#### 4.2.2 Razão de espaçamento $p/d = 1,16$

Um experimento semelhante foi conduzido para razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ . A frequência de aquisição é 1000 Hz, o número de Reynolds do experimento é  $1,684 \times 10^4$ , a

velocidade de referência é 9,92 m/s e a distância da grade promotora de turbulência é 150 mm.

A Figura 4.44 mostra os sinais de velocidade instantânea adquiridos para  $p/d = 1,16$ , na posição de medição A, ilustrada na Figura 4.1. Pode-se observar nos sinais adquiridos, a ocorrência de quatro trocas de modo no escoamento. Pela aproximação dos sinais através da transformada discreta de ondaleta (Figura 4.45), constata-se que os sinais continuam apresentando a característica de simetria, quando V1 encontra-se na esteira larga, V2 encontra-se na fenda, e vice-versa, devido ao posicionamento das sondas lado a lado e a mesma distância do centro dos cilindros. Também pode-se ver que, as trocas de modo nos sinais V1 e V2 não ocorrem exatamente no mesmo instante de tempo.

A Figura 4.46 mostra o espectrograma de energia dos sinais V1 e V2 para a razão de espaçamento 1,16, a 150 mm da grade de turbulência, para faixas de frequência de 1 Hz, de 5 a 60 Hz. Pode-se ver que o espectrograma do sinal V1 (Figura 4.46a) apresenta seus picos de energia na faixa de frequência de 20 a 40 HZ para os instantes em que o escoamento permanece na esteira estreita. No restante do espectrograma não são identificados níveis relevantes de energia. O mesmo fenômeno pode ser observado no espectrograma do sinal V2 (Figura 4.46b), porém os níveis de maior energia encontram-se na faixa de 20 Hz, concentrados no instante em que este sinal se apresenta na esteira estreita. No restante do espectrograma os níveis de energia apresentam-se baixos.

Ao ser feita a ampliação de um dos períodos de tempo onde ocorre a troca de modos, percebe-se mais claramente o instante em que a troca de modo ocorre em ambos os sinais, e que o fenômeno ocorre em instantes diferentes de tempo. A Figura 4.47 mostra os sinais V1 e V2 no intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos, correspondentes a segunda troca de modo no escoamento. Pela análise do sinal percebe-se que a troca de modo do sinal V2 ocorre aproximadamente um segundo antes que a troca de modo do escoamento ocorra de fato no sinal V1.

Pela Figura 4.48 pode-se ver o espectrograma de energia dos sinais para o intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos, para intervalos de frequência de 1 Hz na faixa de 5 a 80 Hz. Nota-se que o sinal V1 (Figura 4.48a), apresenta um crescimento nos níveis de energia após 73,5 segundos, e que esta energia se distribui nas faixas de 5 a 40 Hz, este intervalo de tempo corresponde ao momento em que ocorre a troca de modos de V1. Já o sinal V2 (Figura 4.48b)

apresenta um crescimento da energia entre os instantes de 72,5 a 73,2 segundos, que correspondem ao intervalo em que ocorre a troca de modo do sinal V2.

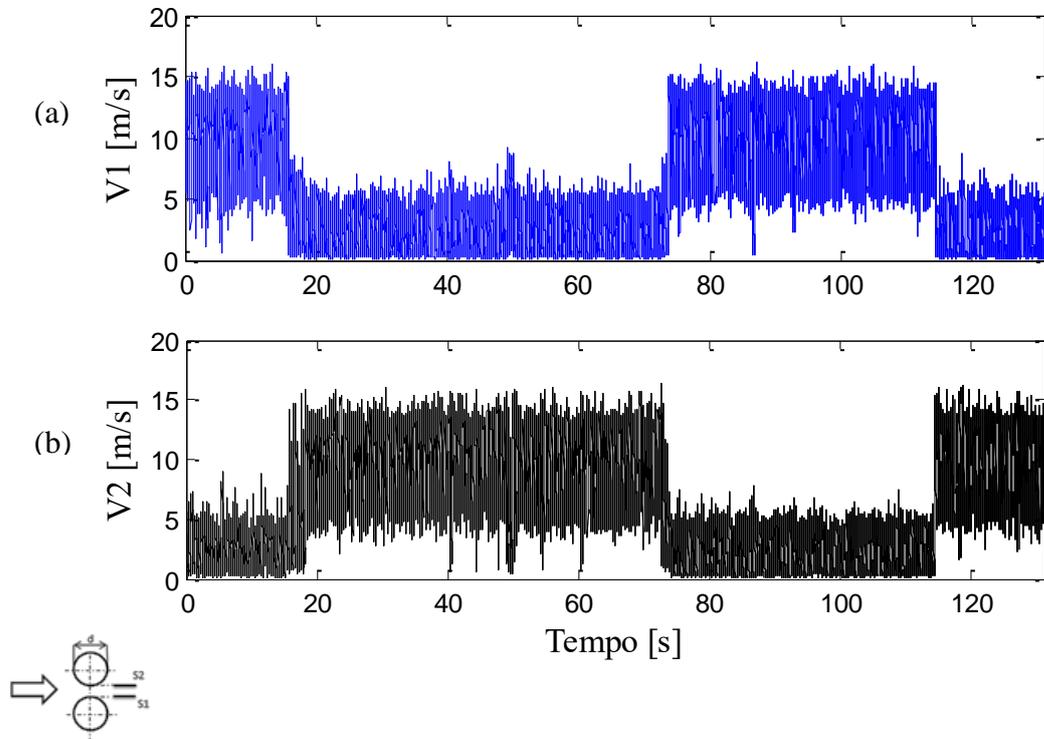


Figura 4.44 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,16$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.

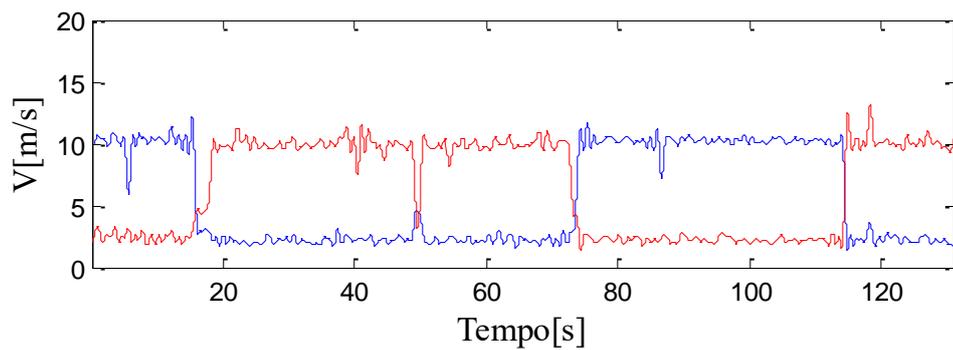


Figura 4.45 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.44 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2).

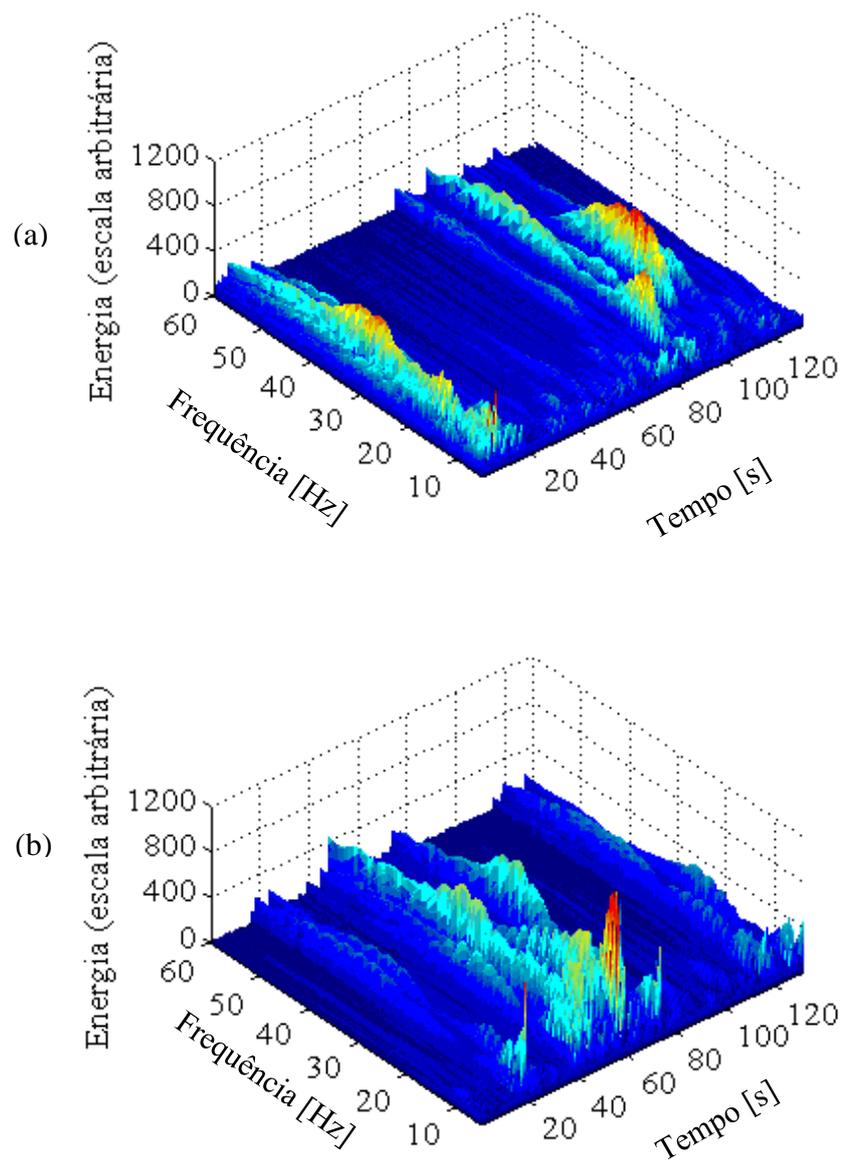


Figura 4.46 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.44. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2

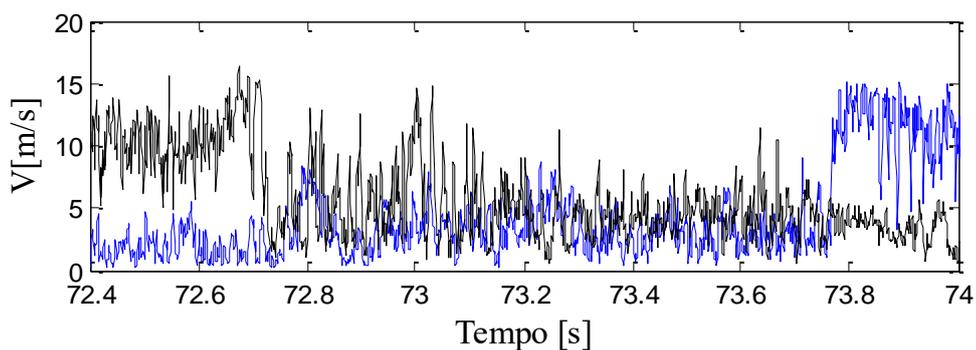


Figura 4.47 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos da Figura 4.42.. ( — )V1 ( — )V2.

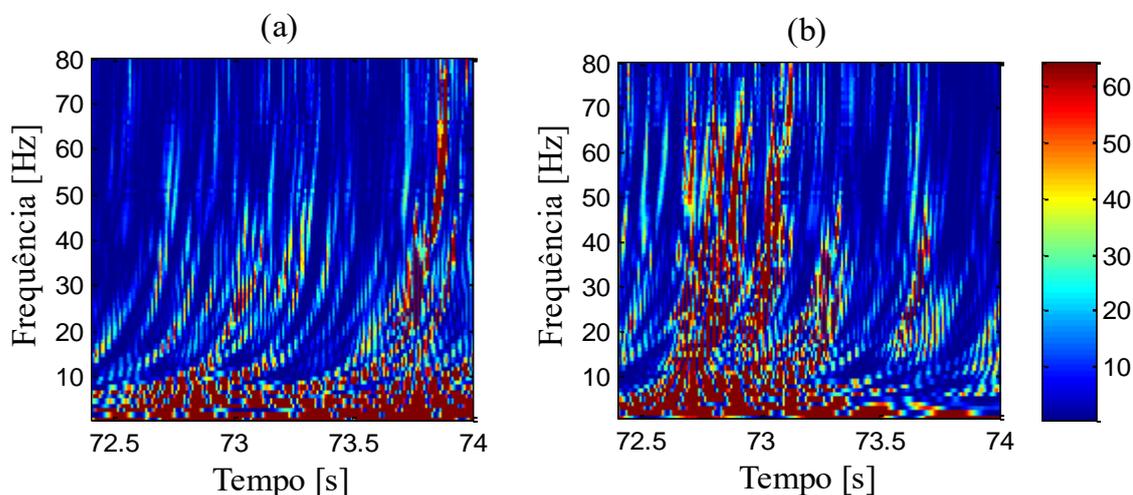


Figura 4.48 – Espectrograma dos sinais de velocidade da Figura 4.45, para o intervalo de tempo de 72,4 a 74 segundos. (a) Sonda 1-V1 (b) Sonda 2-V2

A Figura 4.49 mostra os sinais de velocidade para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , para o ponto de medição B. O número de Reynolds, a velocidade de referência e a distância da grade promotora de turbulência permanecem os mesmos do experimento anterior. Pode-se perceber que, durante o período de tempo adquirido, ocorre apenas duas trocas de modo no escoamento. É visto também que o sinal V4 (Figura 4.49b) não acompanha as trocas de modo do sinal V3, apresentando apenas dois picos, nos instantes em que as trocas ocorrem.

Através da aproximação dos sinais pela transformada de ondaletas discreta (Figura 4.50), tipo Db20 e nível 9, é possível visualizar que os dois picos presentes em V4 ocorrem de

fato no momento em que as trocas de modo ocorrem em V3. Ao ser ampliado o sinal nos instantes de 16 a 19 segundos (Figura 4.51), que correspondem ao intervalo em que ocorre a primeira troca, percebe-se que, a troca de modo em V3 não ocorre de maneira imediata, ocorrendo um decaimento da energia e das flutuações instantes antes da troca de modo. Nota-se que ao mesmo tempo que a energia de V3 decai, o sinal V4 apresenta um crescimento das flutuações e da energia, seguido da troca de modo. Esta troca de modo, porém dura cerca de 0,6 segundos, ocorrendo logo em seguida um decaimento da energia e o sinal retorna ao modo anterior.

A Figura 4.52, mostra os espectrogramas de energia, obtidos através de transformada continua de ondaletas, do sinal da Figura 4.50 para o intervalo de tempo de 16 a 19 segundos para faixas de frequências de 1 Hz, no intervalo de 5 a 60 Hz. Nota-se que ambos os sinais apresentam a energia distribuída entre 16,5 e 17,5 segundos, correspondendo ao intervalo em que ocorre a troca de modos. O espectrograma do sinal V3 (Figura 4.52a) apresenta um pico de energia antes de 17 segundos, e logo após esta energia decai, em função da ocorrência da troca. Já o espectrograma do sinal V4 (Figura 4.52b) apresenta um crescimento da energia, que vai desde aproximadamente 17 segundos e dura até 18 segundos, decaindo logo após. A energia se encontra concentrada principalmente nas faixas de 5 a 40 Hz.

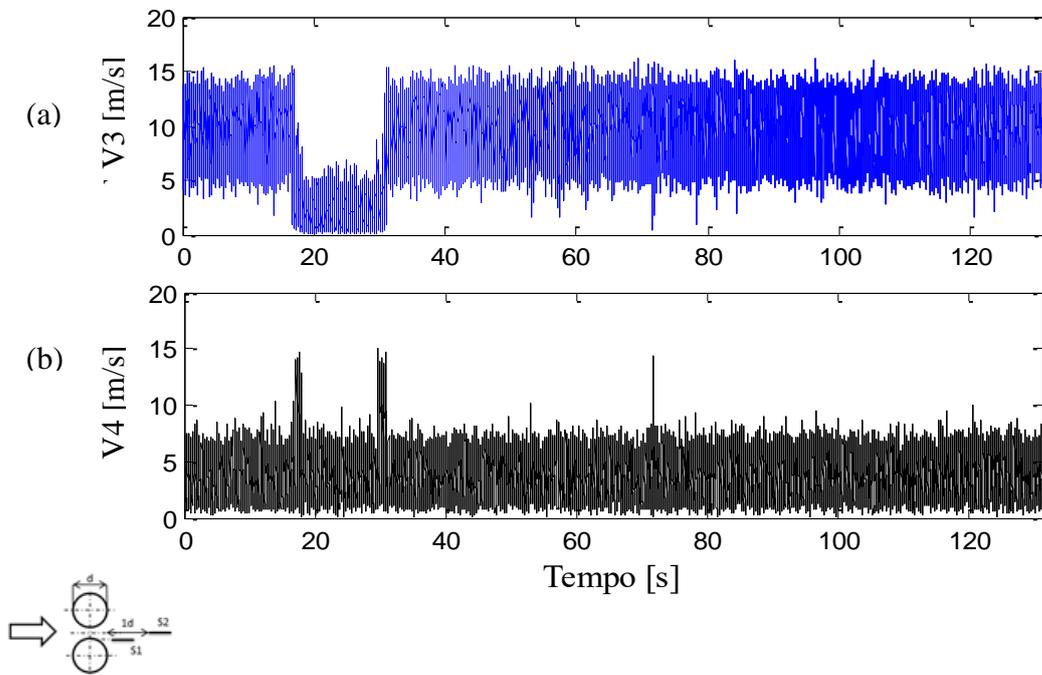


Figura 4.49 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,16$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto B. (a) Sonda 1-V3 e (b) Sonda 2-V4.

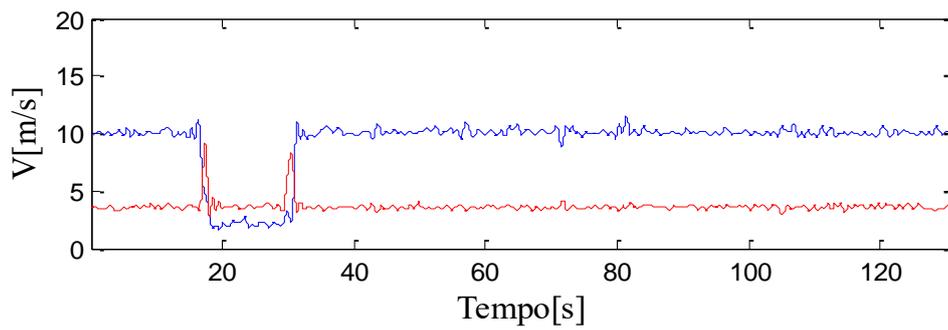


Figura 4.50 – Aproximação de nível 09 (0 a d,976 Hz) dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.49 através de DWT, tipo Db20 (— V3) (— V4).

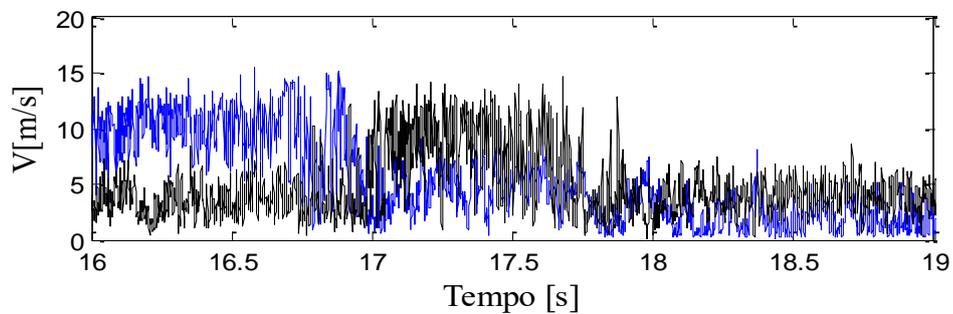


Figura 4.51 – Sinais de velocidade instantâneas no intervalo de tempo de 16 a 19 segundos da Figura 4.49. (—) V3 (—) V4.

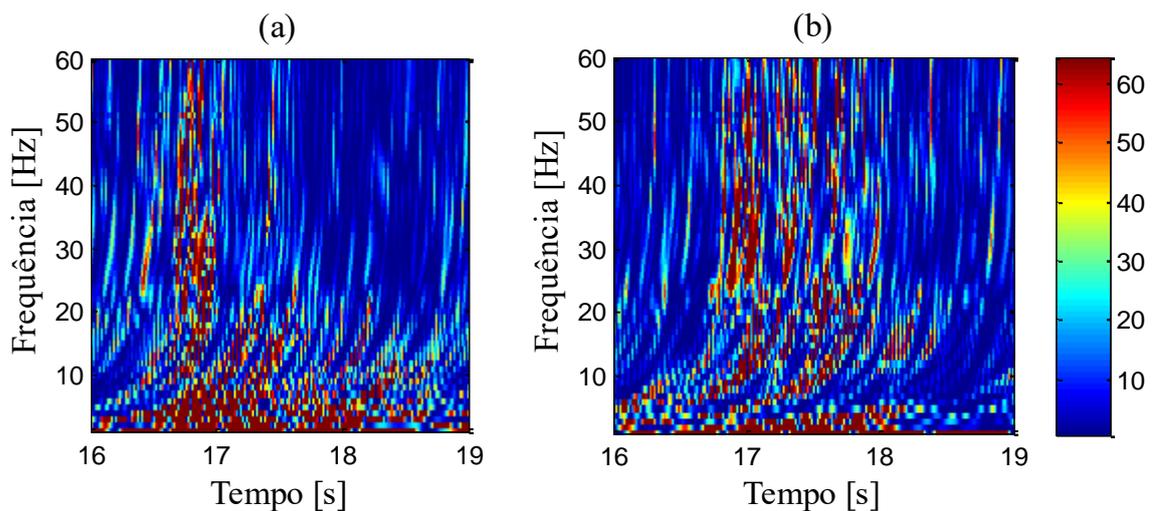


Figura 4.52 – Espectrograma dos sinais de velocidade da Figura 4.51, para o intervalo de tempo de 16 a 19 segundos. (a) sonda 1-V3 (b) sonda 2-V4.

A Figura 4.53 mostra os sinais de velocidade instantânea adquiridos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , para a posição de medição C (Figura 4.6). O número de Reynolds permanece  $1,684 \times 10^4$ , a frequência de aquisição 1000 Hz, a velocidade de referência é 9,92 m/s e a distância da grade 150 mm. Durante o tempo de aquisição dos sinais, foram captadas 7 trocas de modo no escoamento para o sinal sonda 1-V5. O sinal sonda 2-V6, apesar de apresentar alguns picos de flutuações, não indica a ocorrência de trocas de modo. Ao realizar-se a aproximação dos sinais através da transformada discreta de ondaletas (Figura 4.53) pode-se perceber que V6 apresenta alguns picos de flutuação, porém estes aparentam não ter nenhuma correlação com as trocas de modo do escoamento vistas em V5, uma vez que ocorrem em momentos diferentes de tempo.

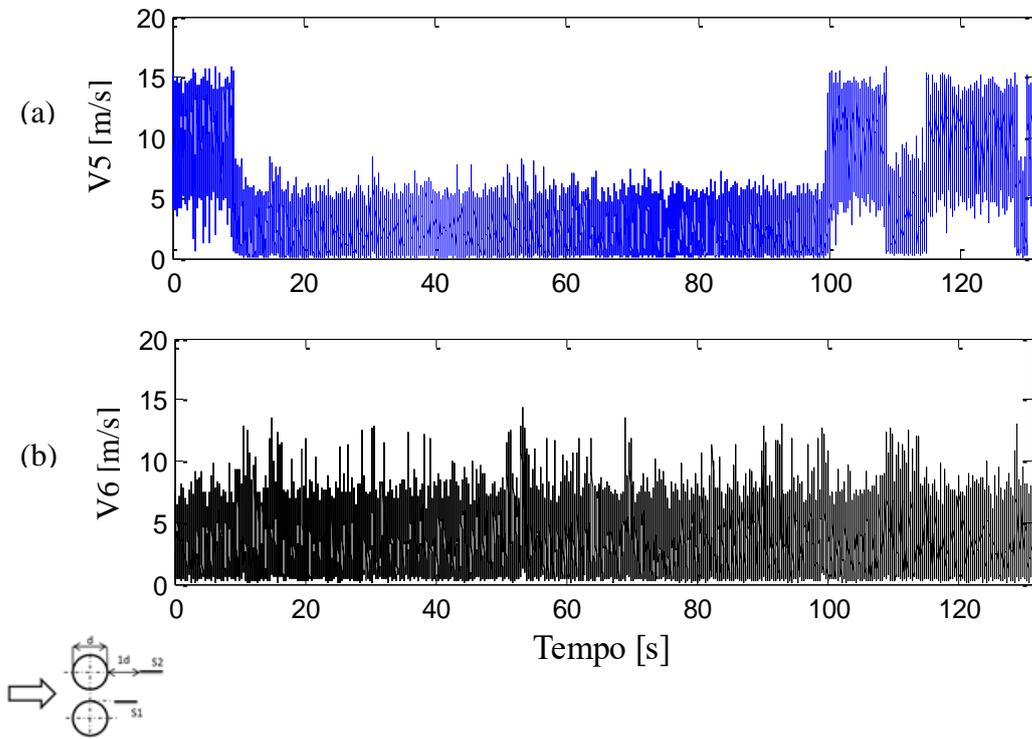


Figura 4.53 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,16$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6.

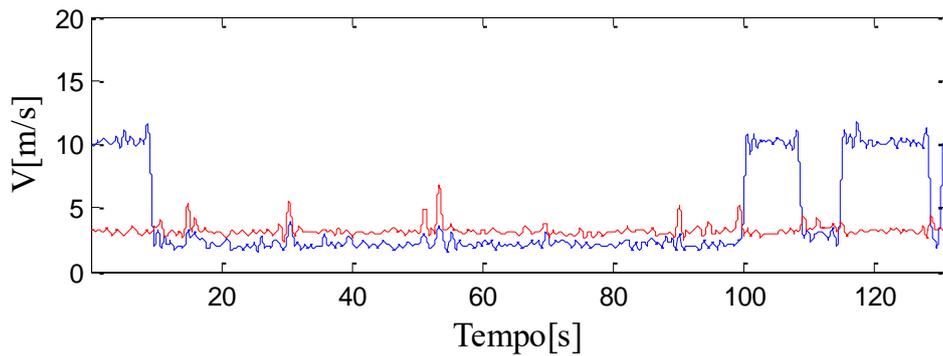


Figura 4.54 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.53 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6).

### 4.2.3 Razão de espaçamento $p/d = 1,6$

Um experimento similar foi conduzido para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , com frequência de aquisição 1000 Hz, número de Reynolds  $1,684 \times 10^4$ , velocidade de referência de 9,92 m/s e 150 mm de distância da grade promotora de turbulência. A Figura 4.55 mostra os sinais de velocidade instantânea adquiridos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , para o ponto de medição A, já descrito na Figura 4.1. Pode-se notar que os sinais apresentam uma simetria, porém não formam um padrão de troca com patamares de velocidades definidos, mantendo uma característica irregular. Esta irregularidade do sinal fica mais clara ao ser realizada a aproximação dos sinais, através da transformada discreta de ondaletas (Figura 4.56), tipo Db20 e nível 9. Vê-se que os sinais apresentam-se simétricos porém as trocas de modo apresentam valores de amplitudes diferentes para V1 e V2 e não formam patamares de velocidades, mantendo-se irregulares.

Na Figura 4.57 é possível visualizar os espectrogramas de ondaleta para os sinais representados na Figura 4.55 para frequências de 1 Hz, na faixa de 5 a 60 Hz. Percebe-se que ambos os espectrogramas apresentam níveis baixos de energia e que esta se espalha ao longo das faixas de frequência de 10 a 20 Hz, ocorrem alguns picos de energia, porém não de forma significativa, não sendo possível identificar as trocas de modo no escoamento.

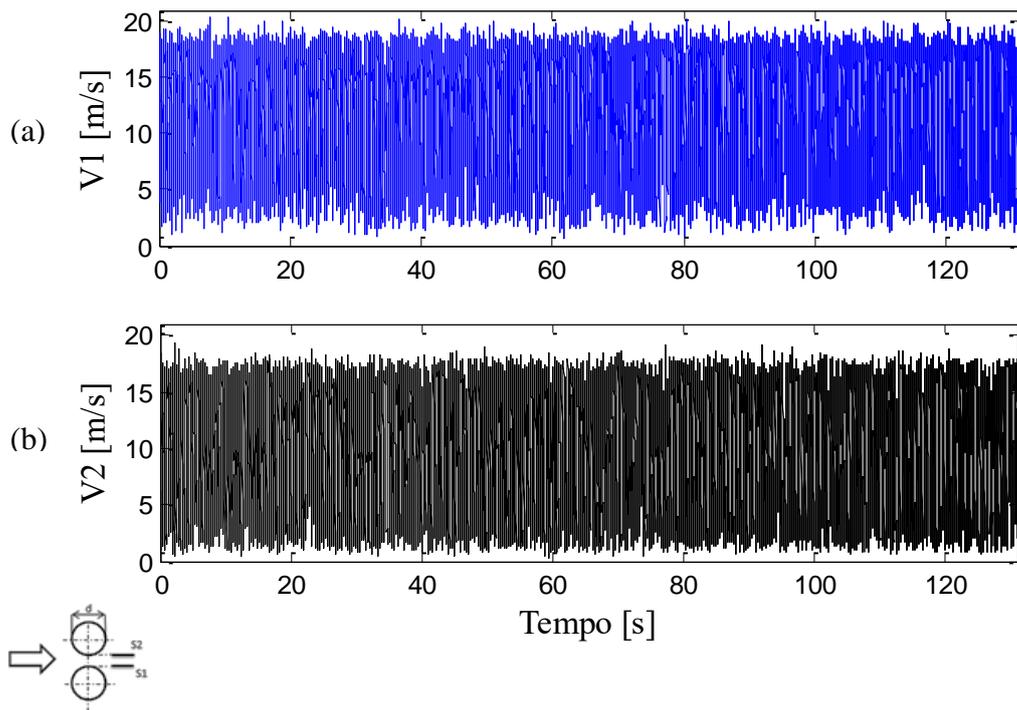


Figura 4.55 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,6$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto A. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2.

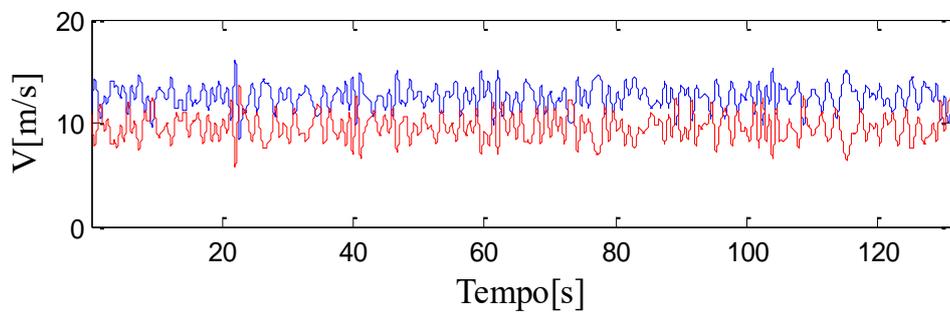


Figura 4.56 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.55 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V1) (— V2).

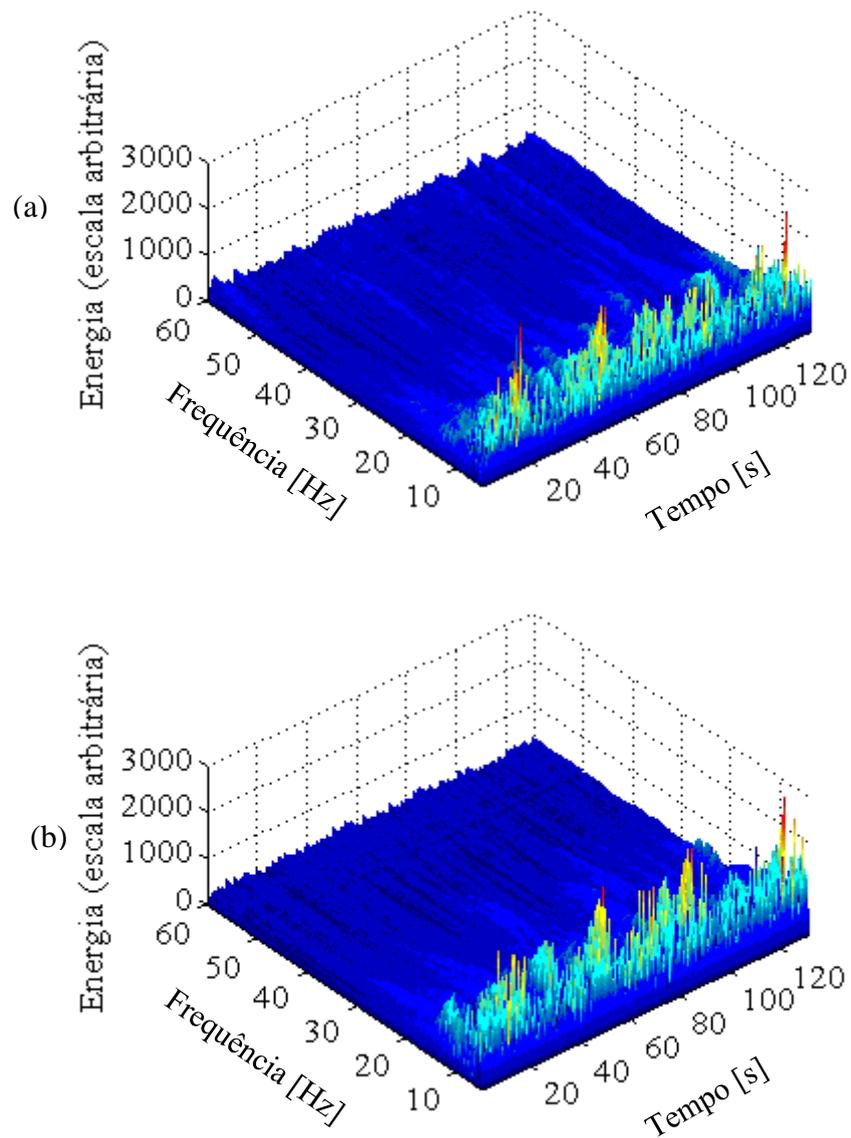


Figura 4.57 – Espectrogramas de energia para os sinais de velocidade instantânea da Figura 4.55. (a) Sonda 1-V1 e (b) Sonda 2-V2

A Figura 4.58 mostra os sinais adquiridos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , para a posição de medição B, ilustrada anteriormente na Figura 4.5, para os mesmos valores de número de Reynolds, frequência de aquisição e velocidade de referência do experimento anterior. Pode-se notar que a característica de irregularidade nas trocas de modos dos sinais permanece.

Através da aproximação do sinal pela transformada discreta de ondaletas (Figura 4.59), visualiza-se que o sinal V3 se apresenta bastante irregular, enquanto que o sinal V4 é quase estacionário e não apresenta indícios de troca de modo.

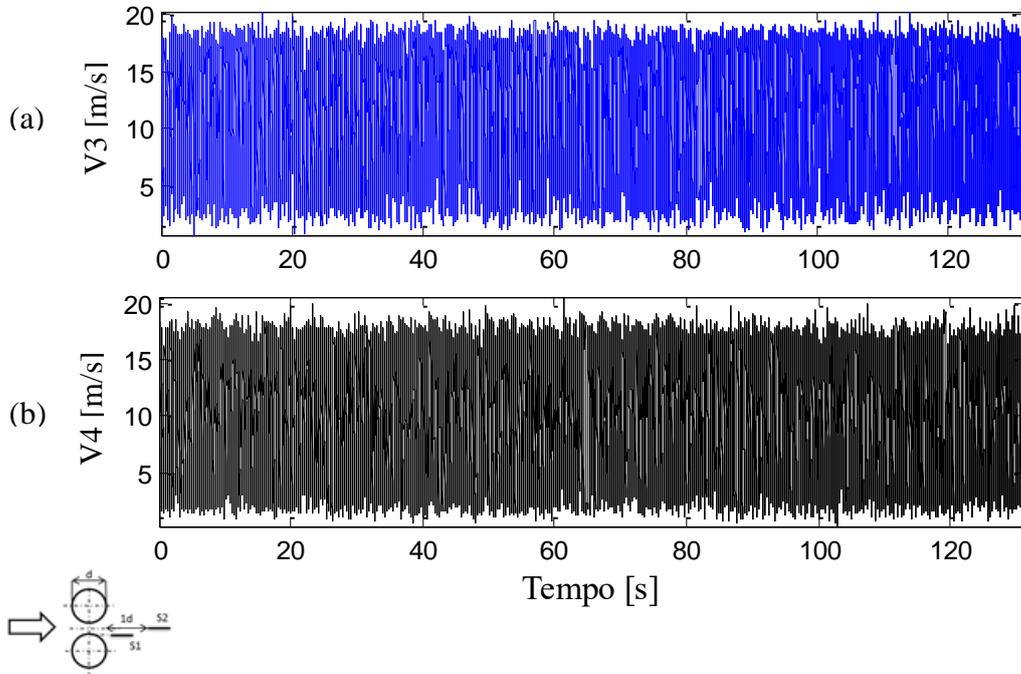


Figura 4.58 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,6$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto B. (a) Sonda 1-V3 e (b) Sonda 2-V4.

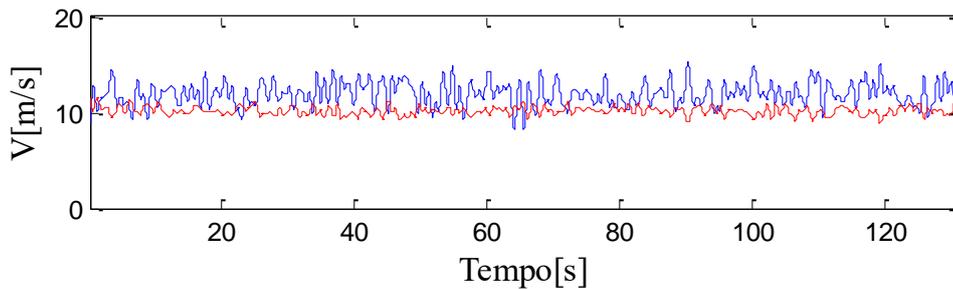


Figura 4.59 – Aproximação dos sinais de velocidade instantânea da Figura 4.58 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V3) (— V4).

Da mesma forma, a Figura 4.60 mostra os sinais de velocidade adquiridos para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ , no ponto de medição C. As características dos sinais apresentam-se semelhantes aos do experimento anterior. O sinal V5 (Figura 4.60a) permanece com uma

característica irregular, enquanto que V6 (Figura 4.60b) apresenta-se estacionário. Através da aproximação dos sinais pela transformada discreta de ondaletas (Figura 4.61) nota-se que os valores de velocidade do sinal V6 apresentam um afastamento em relação aos valores apresentados em V5. O sinal também não apresenta indícios de trocas de modo durante o período adquirido.

Devido às características estacionárias dos sinais adquiridos pela sonda 2 para os pontos B e C, é possível realizar a análise dos momentos estatísticos destes. Os valores encontrados encontram-se na Tabela 4.3.

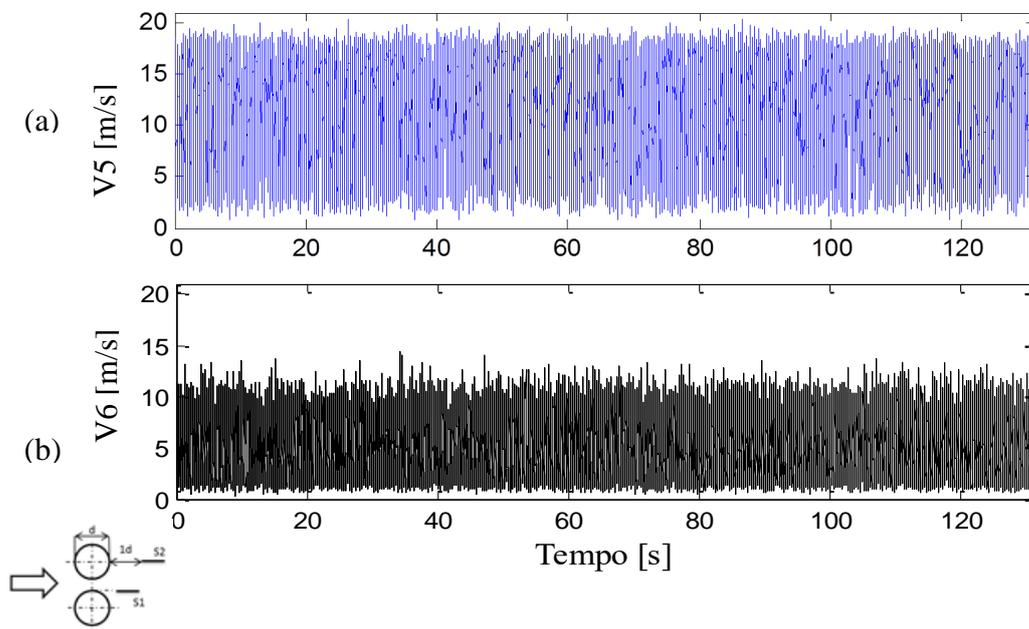


Figura 4.60 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,6$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 150$  mm da grade no Ponto C. (a) Sonda 1-V5 e (b) Sonda 2-V6.

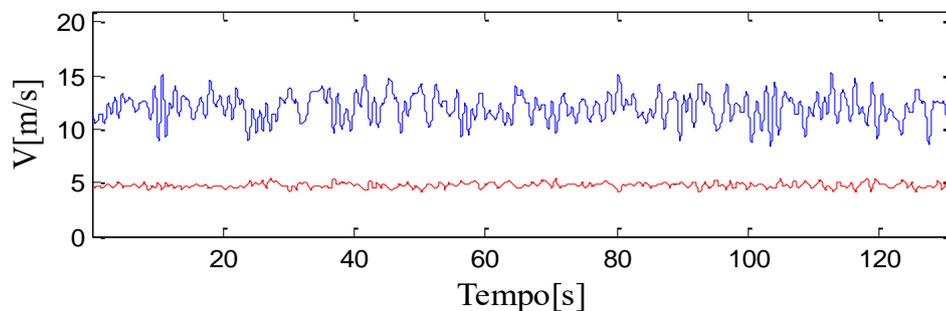


Figura 4.61 – Aproximação dos sinais de velocidades instantâneas da Figura 4.60 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz). (— V5) (— V6).

Tabela 4.3 – Momentos estatísticos para os sinais de velocidade instantânea V4 e V6, para  $f_s = 1$  kHz e  $p/d = 1,6$ .

	Sonda 2-V4 (Posição B)	Sonda 2-V6 (Posição C)
Velocidade Média [m/s]	10,17	4,75
Desvio Padrão [m/s]	3,52	2,03
Assimetria	-0,21	0,57
Planicidade	2,51	2,97

### 4.3 Medições em seção do canal aerodinâmico sem paredes laterais

As medições fora do canal aerodinâmico foram realizadas com o intuito de eliminar ou reduzir os efeitos causados pelo bloqueio ou pela presença das paredes laterais. Ambas as paredes laterais foram retiradas de maneira controlada e de forma simultânea. As medições foram realizadas com apenas uma sonda posicionada na linha tangente ao tubo, a distância de  $x = 10$  mm. O esquema de posicionamento da sonda encontra-se representado na Figura 4.62.

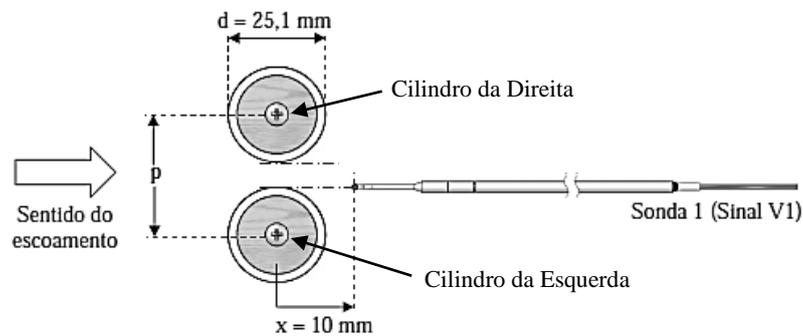


Figura 4.62 – Geometria dos dois cilindros lado a lado e posicionamento da sonda a  $x = 10$  mm do centro do cilindro da esquerda.

#### 4.3.1 Razão de espaçamento $p/d = 1,16$

Foram conduzidos estudos experimentais para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , para frequência de aquisição de 1000 Hz, e  $2^{17}$  (131072) pontos. O número de Reynolds do

experimento é  $1,3901 \times 10^4$  e a velocidade de referência é 10,17 m/s. Os tubos estão fixados no centro da seção onde as paredes laterais são retiradas, sendo que a seção possui 300 mm de comprimento. As paredes laterais foram removidas após 30 segundos de aquisição.

A Figura 4.63 mostra o sinal de velocidade instantânea adquirido para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ . As paredes laterais foram retiradas da seção do canal em  $t = 30$  segundos. Pode-se observar que nos primeiros 30 segundos de aquisição de dados, o sinal apresenta tentativas de troca de modo, resultando após a remoção das paredes, em uma nova condição estável em outro modo de velocidade. Após 30 segundos, que corresponde ao momento da retirada das paredes laterais da seção do canal, o sinal apresenta um decaimento nos valores das flutuações de velocidade e não apresenta mais nenhuma troca de modo durante o restante do tempo de aquisição permanecendo com a fenda desviada para a esquerda.

A Figura 4.64 apresenta a aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.63, através da transformada discreta de ondaletas, tipo Db20 e nível 9. A aproximação do sinal mostra que este apresentava algumas tentativas de trocas rápidas de modo no escoamento, e que após a remoção das paredes em  $t = 30$  segundos, o sinal não apresentou mais nenhum pico de velocidade, permanecendo em um único modo estável até o final do tempo de aquisição.

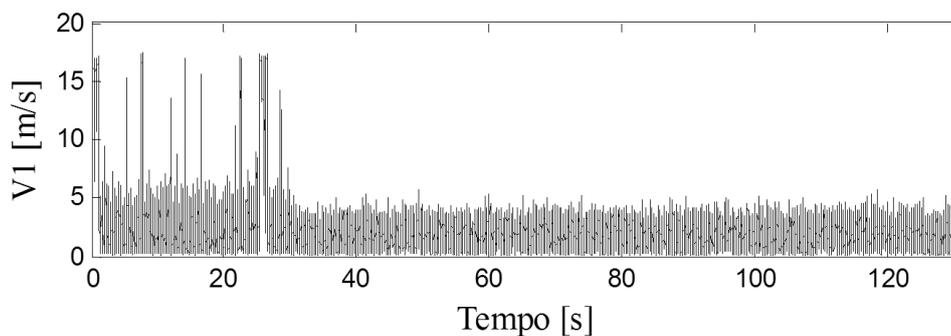


Figura 4.63 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,16$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em  $t = 30$  segundos.

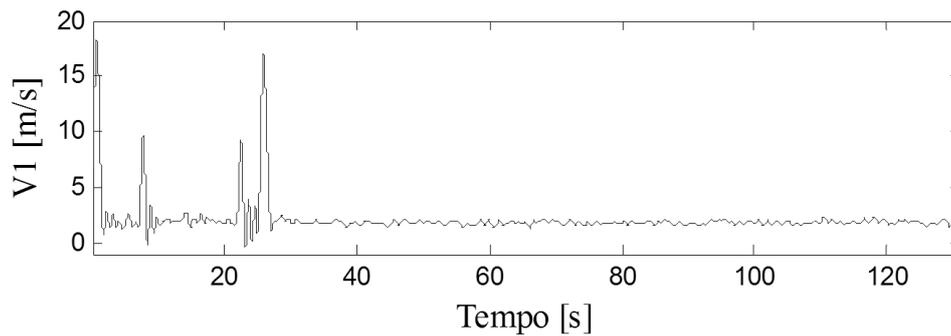


Figura 4.64 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.62 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

Após a retirada das paredes laterais, o ventilador foi desligado durante um período de tempo e religado novamente. Este procedimento foi realizado com o intuito de verificar se a condição de fenda desviada se mantém ou se esta é originária da presença de paredes. Foram realizadas medição de velocidade na rampa de aceleração para a razão de espaçamento 1,16, com a finalidade de verificar se o escoamento na seção sem paredes laterais é influenciado pelo aumento gradativo do número de Reynolds. A Figura 4.65 mostra o sinal de velocidade adquirido para o regime transiente, desde a velocidade zero até a velocidade de referência de 10,17 m/s, e até zero novamente durante o desligamento do ventilador. Observa-se que o sinal não apresenta nenhum pico que indique a troca de modos do escoamento durante o aumento do número de Reynolds, a fenda porém mantém-se desviada para a esquerda.

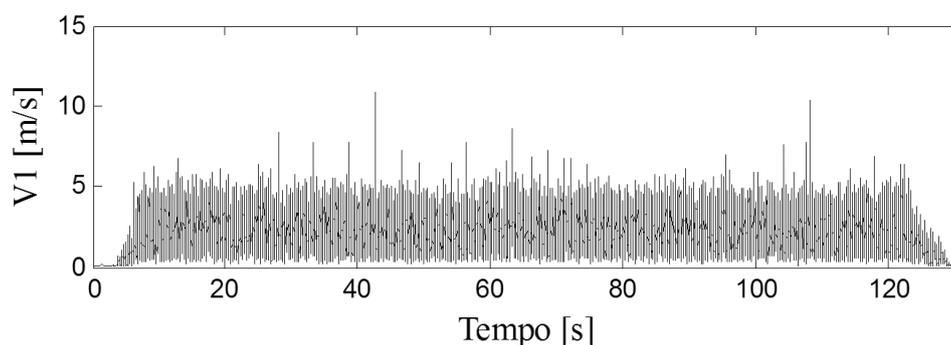


Figura 4.65 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para  $p/d = 1,16$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes.

A Figura 4.66 apresenta a aproximação do sinal de velocidade adquirido na Figura 4.65. É visível que não ocorrem trocas de modo durante o período de aquisição dos dados e que o jato da fenda permanece desviado.

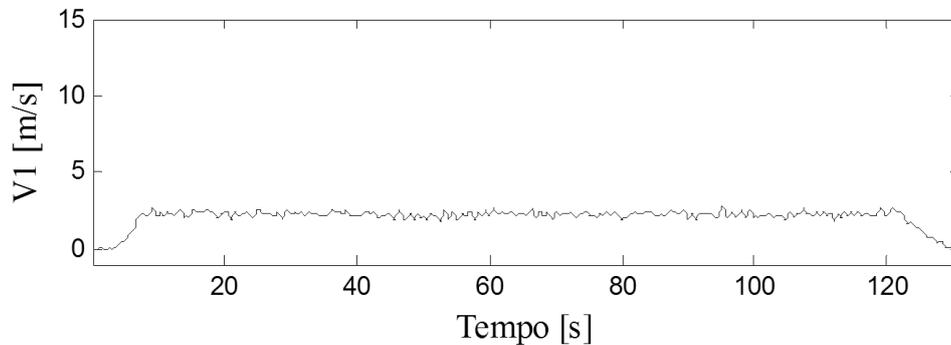


Figura 4.66 – Aproximação do sinal de velocidade transiente da Figura 4.64 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

### 4.3.2 Razão de espaçamento $p/d = 1,26$

Um experimento semelhante foi conduzido para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ . A frequência de aquisição de dados é 1000 Hz, o número de Reynolds permanece  $1,3901 \times 10^4$ , a velocidade de referência é 10,17 m/s. As paredes laterais da seção de testes do canal são removidas no instante de tempo  $t = 30$  segundos.

A Figura 4.67 apresenta o sinal de velocidade instantânea adquirido durante o processo de remoção das paredes laterais em  $t = 30$  segundos, para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$ . Nota-se que durante os primeiros 30 segundos de aquisição de dados, o sinal apresenta trocas de modo, formando dois patamares distintos de velocidade. Após 30 segundos, que corresponde ao instante da remoção das paredes laterais, o sinal permanece em um estado e não apresenta trocas de modo durante o restante do tempo de aquisição. As flutuações de velocidade diminuem sua amplitude após a remoção das paredes laterais da seção e o jato da fenda permanece desviado novamente para a esquerda.

Através da aproximação do sinal, com a utilização da transformada discreta de ondaletas (Figura 4.68), tipo Db20 e nível 9, nota-se que nos instantes anteriores à retirada das paredes laterais da seção de testes, o sinal apresenta trocas de modo no escoamento bem

definidas, e que a partir do instante em que as paredes são removidas em  $t = 30$  segundos, estas trocas de modo cessam e o jato permanece desviado em uma direção, durante o restante do período adquirido não há ocorrências de novas trocas de modo.

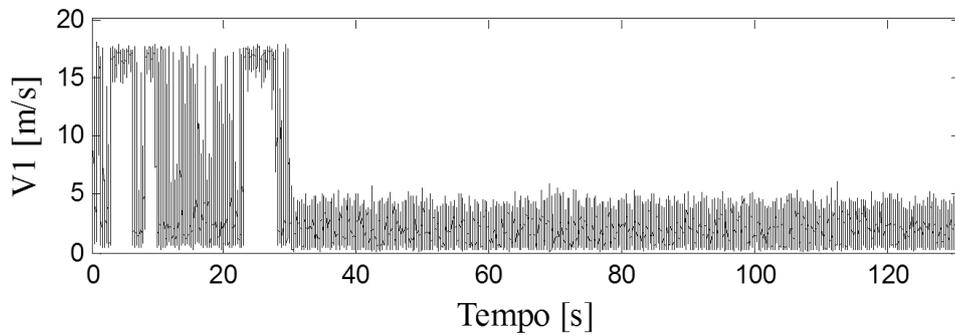


Figura 4.67 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em  $t = 30$  segundos.

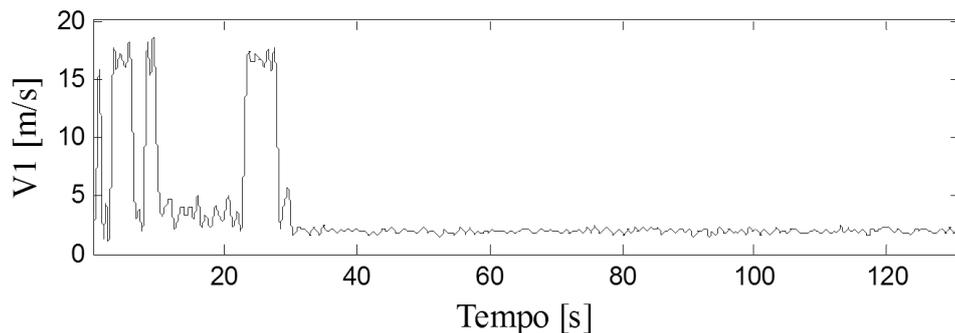


Figura 4.68 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.66 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

Novamente após a retirada das paredes laterais da seção de testes, o ventilador foi desligado para a realização de medições em regime transiente para a razão de espaçamento 1,26. A Figura 4.69 mostra o sinal de velocidade transiente adquirido para frequência de 1000 Hz. Observa-se que as flutuações de velocidade são bem intensas e que durante o período adquirido não ocorre nenhuma troca de modo no escoamento. O jato da fenda porém encontra-se desviado para a direita.

A aproximação do sinal (Figura 4.70), através da transformada discreta de ondaletas, tipo Db20 e nível 9, mostra que o sinal de fato não apresenta indícios de troca de modo no escoamento, durante o período de aquisição. É visível uma maior irregularidade no sinal, devido as maiores flutuações medidas.

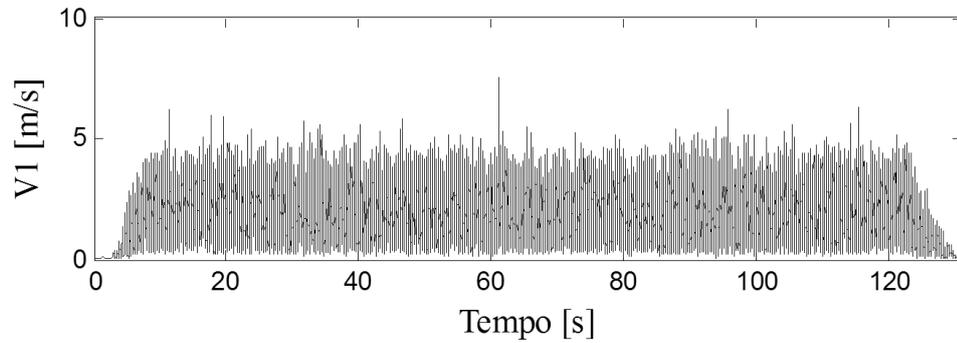


Figura 4.69 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para  $p/d = 1,26$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes.

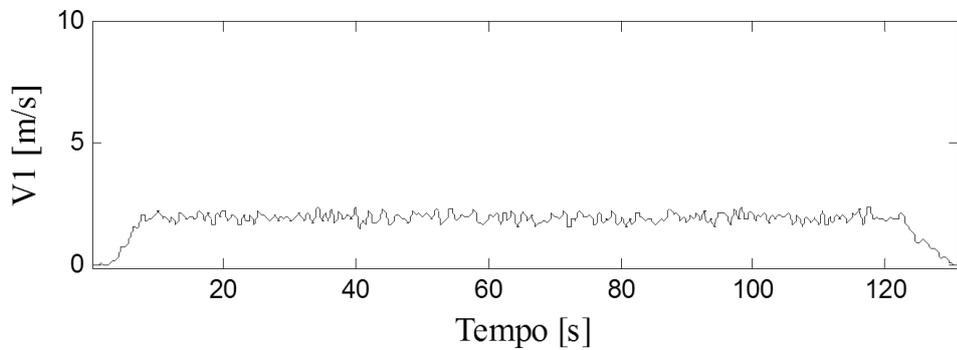


Figura 4.70 – Aproximação do sinal de velocidade transiente da Figura 4.68 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

### 4.3.3 Razão de espaçamento $p/d = 1,6$

Os mesmos procedimentos anteriores foram realizados para a razão de espaçamento  $p/d = 1,6$ . As condições de aquisição permanecem as mesmas, assim como o número de Reynolds e a velocidade de referência. As paredes laterais foram removidas em  $t = 30$  segundos após iniciada a aquisição de dados.

A Figura 4.71 mostra os resultados obtidos para as medições de velocidade instantâneas para a razão de espaçamento 1,6. Durante os 30 segundos iniciais de aquisição, é possível identificar a ocorrência de trocas de modo de maneira intermitente, onde o jato da fenda oscila de um lado para o outro de maneira rápida (*flip-flop*). Após 30 segundos, quando a parede é retirada, o escoamento assume um dos modos, e não são identificadas novas trocas durante o restante do período de tempo de aquisição.

A aproximação do sinal da Figura 4.71 através da transformada discreta de ondaletas (Figura 4.71), tipo Db20 e nível 9, apenas ressalta que durante os primeiros 30 segundos da série o escoamento apresentava trocas rápidas de modo, oscilando entre um modo e outro, e após a retirada das paredes laterais da seção de testes, o escoamento assume um dos modos, apresentado o jato desviado para a esquerda e permanece neste estado até o final da aquisição.

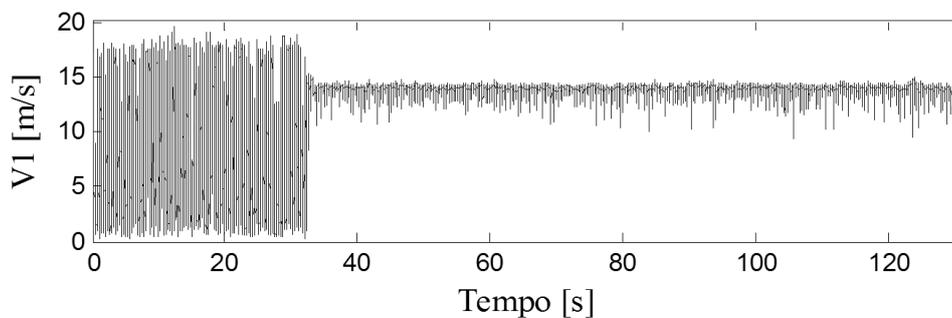


Figura 4.71 – Sinal de velocidade para  $p/d = 1,6$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, adquirido durante a retirada das paredes laterais em  $t = 30$  segundos.

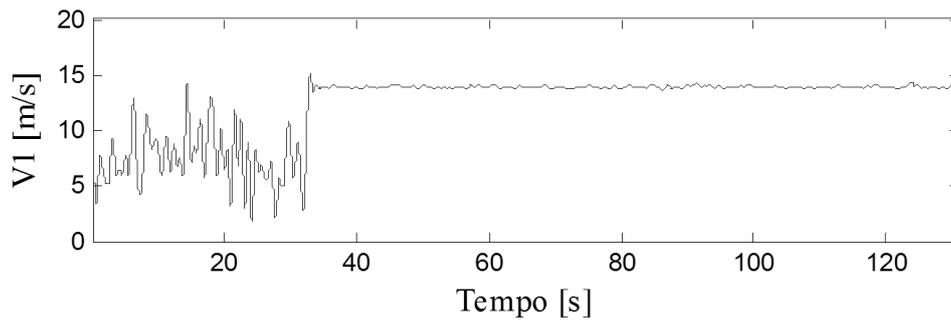


Figura 4.72 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.70 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

Após a retirada das paredes laterais, o procedimento de desligamento do ventilador e ligamento, após um período de tempo foi realizado. A Figura 4.73 mostra o sinal de velocidade transiente, adquirido durante o processo de aceleração do ventilador. Observa-se que durante o processo de aceleração do escoamento de zero a 10,17 m/s, correspondente aos primeiros 7 segundos da série, a fenda encontra-se desviada para a direita, após a velocidade de referência estabilizar em 10,17 m/s, em aproximadamente 13 segundos de aquisição, temos a ocorrência de uma troca de modo no escoamento, no qual a fenda desvia para a esquerda. Durante o restante do período não foram identificadas a ocorrência de outras trocas de modo.

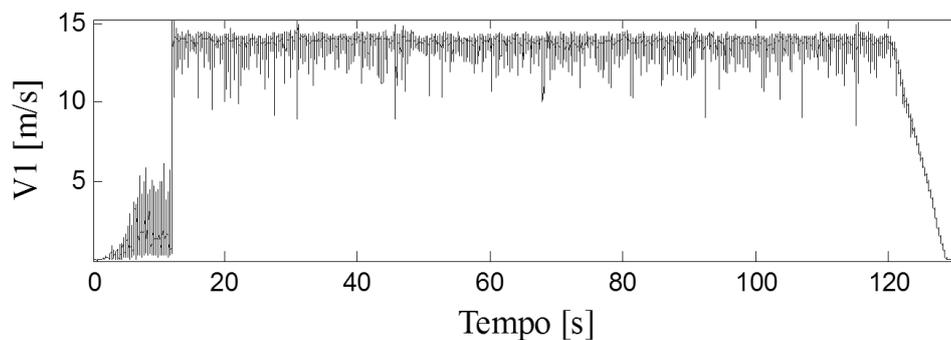


Figura 4.73 – Sinal de velocidade adquirido para regime transiente na seção do canal sem paredes laterais para  $p/d = 1,6$ ,  $f_s = 1000$  Hz,  $x = 10$  mm, após a retirada das paredes laterais da seção de testes.

A Figura 4.74 mostra a aproximação do sinal de velocidade adquirido para o regime transiente da Figura 4.73. Para a aproximação foi utilizada a transformada de ondaletas tipo

Db20 e nível 9. Observa-se claramente o momento em que a troca de modo ocorre em aproximadamente 13 segundos da série. Outras trocas de modo não foram observadas no período adquirido e a fenda permaneceu desviada para a esquerda.

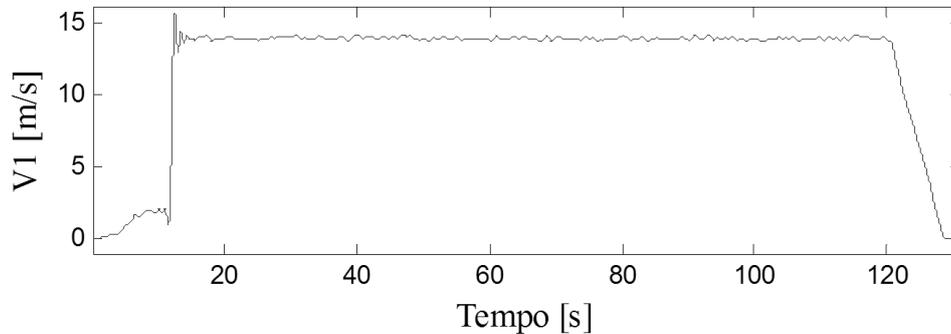


Figura 4.74 – Aproximação do sinal de velocidade instantânea da Figura 4.72 através de DWT, tipo Db20 e nível 09 (0 a 0,976 Hz).

## 5 DISCUÇÕES E CONCLUSÕES

### 5.1 Discussões

Através do estudo das razões de espaçamento ( $p/d$ ) de 1,16, 1,26 e 1,6 nas três condições: intensidade de turbulência inferior a 1%, intensidade de turbulência entre 6 e 8% e seção do canal sem paredes laterais, pode-se fazer as seguintes observações com relação ao comportamento do fenômeno biestável, relatadas a seguir.

Nos experimentos realizados com dois tubos lado a lado em relação ao escoamento e com o canal aerodinâmico com intensidade de turbulência inferior a 1% foi observada a existência do fenômeno biestável, caracterizado pela presença de duas esteiras de vórtices características, uma larga, associada às baixas velocidades, e outra estreita, associada às altas velocidades. Os resultados encontrados para a razão de espaçamento  $p/d = 1,26$  encontram-se de acordo com aqueles apresentados por De Paula, 2008. Observa-se também que o sinal adquirido pela sonda 2 apresenta comportamentos distintos conforme os pontos de medição são alterados. Para as distâncias mais afastadas dos cilindros como as posições E e F, os sinais não apresentaram mais indícios do comportamento biestável, mesmo o fenômeno ocorrendo e sendo visível nos sinais V9 e V11, da sonda 1. Muito deste comportamento se deve ao fato de

a sonda 2 nas posições E e F, permanecer sempre na região de esteira larga, ainda que proveniente de cilindros diferentes, como foi ilustrado na Figura 4.15.

Para a razão de espaçamento  $p/d = 1,16$  também é observado o fenômeno biestável, com menor ocorrência de trocas no período adquirido. As medições para esta razão de espaçamento foram realizadas apenas nas posições A, B e C, sendo que os sinais de V2, V4 e V6 mantiveram as características biestáveis nas três posições percorridas pela sonda 2, porém com valores de velocidade mais baixos do que os registrados para V1, V3 e V5. Os resultados apresentados para a razão de espaçamento 1,6 estão de acordo com os encontrados em De Paula, 2008. É possível visualizar a presença de biestabilidade nos sinais da posição A, porém as trocas ocorrem de maneira intermitente, dificultando a estimativa do número de trocas que ocorrem no período. Estas trocas de modo no entanto não ocorrem de maneira instantânea, ocorrendo primeiramente um crescimento da energia e das flutuações antes que a troca de modo ocorra. As trocas de modo ainda são identificadas em ambos os sinais V3 (sonda 1) e V4 (sonda 2) na posição B, porém na posição C, o sinal V6 (sonda 2) não apresenta indícios de trocas.

No experimento realizado após a colocação da grade promotora de turbulência o fenômeno da biestabilidade não foi tão claramente identificado para todas as razões de espaçamento estudadas. Para a razão de espaçamento de 1,26 o escoamento atrás dos tubos apresentou uma rápida alternância do jato proveniente da fenda, de um lado para o outro (*flip-flop*), os espectrogramas obtidos através de transformada contínua de ondaletas para estes sinais mostram um espalhamento de energia em várias frequências, e não é possível identificar nenhum pico de energia que caracterize a troca de modo. Percebe-se que as trocas não ocorrem de maneira imediata, da forma oposta ao que ocorre para este mesmo  $p/d$  em canal com intensidade de turbulência inferior. As velocidades adquiridas pela sonda 1 e as adquiridas pela sonda 2 também apresentam valores que se distanciam em relação ao mesmo valor médio.

Para a razão de espaçamento 1,16 as trocas de modo do escoamento permaneceram identificáveis ao longo do período adquirido para o ponto de medição A. Da mesma forma que para a razão de espaçamento 1,26, as trocas de V1 e V2 não ocorrem simultaneamente, ocorrendo primeiramente um crescimento gradativo da energia e das flutuações, antes que a troca de modo ocorra de fato. Para os outros ponto de medição B e C na razão de espaçamento 1,16 temos alguns picos ao longo dos sinais V4 e V6, que parecem não estar

relacionados com as trocas de modo do escoamento. A razão de espaçamento 1,6 apresenta trocas intermitentes, de maneira mais intensa do que ocorria para esta razão de  $p/d$  no canal com intensidade de turbulência inferior a 1 %. Os espectrogramas de energia apresentam um espalhamento de energia em varias faixas de frequência e os valores médios das velocidades V1 e V2 apresentam um afastamento em relação uma a outra.

Na Tabela 4.3 podemos ver um comparativo do comportamento dos sinais adquiridos no ponto A para todas as razões de espaçamento estudadas, em função da intensidade de turbulência, são listados os números de trocas, as pseudofrequências de cada sinal e o período médio. É possível observar que, com exceção da razão de espaçamento  $p/d = 1,16$ , para maior intensidade de turbulência ocorre um aumento da incidência de trocas de modo no escoamento. O mesmo ocorre também com a pseudofrequência, que aumenta juntamente com o aumento das trocas. O inverso ocorre com o período médio do escoamento, que decresce a medida que as trocas aumentam. O aumento das trocas de modo com a colocação da grade pode ser estimado em torno de 38%.

Tabela 5.1 – Comparativo entre os sinais para as diferentes intensidades de turbulência para o sinal V1 no ponto de medição A.

$p/d$	Intensidade de turbulência	Nº Trocas	Pseudofrequência [Hz]	Período médio [s]
1,16	< 1%	16	0,0610	16,384
1,16	7,50%	4	0,0153	65,536
1,26	< 1%	39	0,1488	6,7216
1,26	7,50%	107	0,4982	2,4499
1,6	< 1%	116	0,4425	2,2599
1,6	7,50%	159	0,6065	1,6487

Para as medições realizadas na seção sem paredes laterais do canal aerodinâmico, para a razão de espaçamento 1,16 e 1,26, após a retirada das paredes durante o período de tempo adquirido não foi observado a ocorrência de trocas de modo no escoamento e o jato permanece defletido para um dos lados. Para a razão de espaçamento 1,6 no período adquirido imediatamente após a retirada das paredes laterais, também não foi identificada a ocorrência do fenômeno biestável. No entanto durante a aquisição de uma rampa de velocidades, a razão de espaçamento 1,60 apresentou uma troca de modo em aproximadamente 10 segundos da aquisição de dados, no restante do período não foram observadas outras trocas de modo.

## 5.2 Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo experimental realizado em dois tubos paralelos submetidos a escoamento turbulento cruzado. Foram estudadas as razões de espaçamento de 1,16; 1,26 e 1,6 através da medição das flutuações de velocidade em canal aerodinâmico utilizando a técnica de anemometria de fio quente. As medições de velocidade foram realizadas no regime subcrítico.

O fenômeno biestável foi encontrado para todas as razões de espaçamento estudadas e no canal aerodinâmico com intensidade de turbulência inferior a 1% seu comportamento encontra-se de acordo com estudos anteriores. O aumento da intensidade de turbulência pela presença da grade promotora de turbulência, posicionada a montante dos tubos, causa modificações no comportamento fenômeno, principalmente no que diz respeito ao aumento da ocorrência de trocas de modo. O aumento da incidência de trocas também modifica a pseudofrequência do escoamento e causa a diminuição do período médio. A intensidade de turbulência mostra-se um fator relevante na análise da ocorrência de instabilidades no escoamento.

A existência de paredes laterais no escoamento mostra-se determinante para a definição de determinadas características do escoamento biestável, como a intensidade da sua ocorrência. Verifica-se que apesar de, durante a maior parte do tempo de aquisição, não ter ocorrido nenhuma troca de modos no escoamento, este possivelmente ainda é biestável, porém com uma incidência menor de trocas entre as esteiras e com uma tendência a manter o jato desviado para a esquerda. Pode-se, portanto concluir que a presença das paredes, ou seja a existência de um certo valor de taxa de bloqueio favorece a ocorrência do fenômeno da bistabilidade.

A utilização das transformadas de ondaletas contínuas e discretas mostrou-se indispensável para a análise dos resultados obtidos nas medições de velocidade através da técnica da anemometria de fio quente. As ondaletas possibilitaram a identificação de características do fenômeno, principalmente a ocorrência de transientes, que a transformada de Fourier e a análise espectral não possibilitam realizar.

### 5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Devido ao grande número de características ainda desconhecidas a cerca do fenômeno da biestabilidade, sugere-se para trabalhos futuros:

- Realizar um estudo experimental variando a intensidade de turbulência gradualmente, a fim de verificar a partir de qual momento o nível de intensidade de turbulência passa a modificar a condição do escoamento de estável para instável.
- Realizar estudos com rampas de aceleração mais suaves e com a utilização de sondas posicionadas a montante e a jusante dos tubos simultaneamente, a fim de verificar a existência de possíveis perturbações no escoamento que possam causar o efeito de deflexão do escoamento na fenda.
- Estudo da relação entre as escalas de comprimento dos vórtices formados pela grade promotora de turbulência, nas alterações sofridas no comportamento do escoamento biestável.
- Estudo acerca das instabilidades presentes no escoamento e como estas influenciam no comportamento da biestabilidade e na interação dos vórtices nas esteiras.
- Utilização de conceitos de mecânica quântica na descrição e modelagem de possíveis gatilhos do fenômeno biestável.
- Análise ou desenvolvimento de um método que possibilite o estudo do fenômeno de crescimento gradual da energia nos instantes que precedem as trocas de modo do escoamento como sendo um dos possíveis mecanismos envolvidos na biestabilidade do jato da fenda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alam, M. M.; Moriya, M.; Sakamoto, H. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. **Journal of Fluids and Structures**, Bluff-body/Flow interactions., v. 18, n. 3–4, p. 325–346, 2003.

Batchelor, G. K.; Townsend, A. A. Decay of Isotropic Turbulence in the Initial Period. **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 193, n. 1035, p. 539–558, 1948.

Bearman, P. W.; Wadcock, A. J. The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 61, n. 03, p. 499–511, 1973.

Blevins, R. D. **Flow-induced vibration**. 2<sup>a</sup> ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

Daubechies, I. **Ten Lectures on Wavelets**. SIAM, 1992.

Frenkiel, F. N. The decay of isotropic turbulence. **Journal of Applied Mechanics**, Trans. ASME., p. 311–321, 1948.

Guillaume, D. W.; Larue, J. C. Investigation of the flopping regime with two-, three- and four-cylinder arrays. **Experiments in Fluids**, v. 27, p. 145–156, 1999.

Indrusiak, M. L. S. **Caracterização de escoamentos Turbulentos Transientes usando a Transformada de ondaletas**, 2004. Doutorado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Indrusiak, M. L. S.; Goulart, J. V.; Olinto, C. R.; Möller, S. V. Wavelet time-frequency analysis of accelerating and decelerating flows in a tube bank. **Nuclear Engineering and Design**, v. 235, p. 1875–1887, 2005.

Keogh, D. B.; Meskell, C. Bi-stable flow in parallel triangular tube arrays with a pitch-to-diameter ratio of 1.375. **Nuclear Engineering and Design**, v. 285, 2015.

Kim, H. J.; Durbin, P. A. Investigation of the flow between a pair of circular cylinders in the flopping regime. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 196, p. 431–448, 1988.

Kim, S.; Alam, M. M. Characteristics and suppression of flow-induced vibrations of two side-by-side circular cylinders. **Journal of Fluids and Structures**, v. 54, p. 629–642, 2015.

Kurian, T.; Fransson, J. H. M. Grid-generated turbulence revisited. **Fluid Dynamics Research**, v. 41, n. 2, p. 021403, 2009.

Lavoie, P.; Burattini, P.; Djenidi, L.; Antonia, R. A. Effect of initial conditions on decaying grid turbulence at low  $R\lambda$ . **Experiments in Fluids**, v. 39, n. 5, p. 865–874, 2005.

LESIEUR, M. **Turbulence in Fluids**. 4 th ed. Dordrecht, 2008.

Mahon, J.; Meskell, C. Surface pressure survey in a parallel triangular tube array. **Journal of Fluids and Structures**, v. 34, p. 123–137, 2012.

Maskell, E. C. A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel. **Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, London**, v. 3400, 1963.

Moffat, R. J. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 1, n. 1, p. 3–17, 1988.

Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. **Turbulência: Fundamentos.**, Coleção de Cadernos de Turbulência. v. 4, p.1–32, 2004. ABCM. Rio de Janeiro.

Olinto, C. R. **Estudo experimental das características do escoamento turbulento nas primeiras fileiras de bancos de tubos.** , 2005. Lume UFRGS.

Olinto, C. R.; Indrusiak, M. L. S.; Endres, L. A. M.; Möller, S. V. Experimental study of the characteristics of the flow in the first rows of tube banks. **Nuclear Engineering and Design**, v. 239, p. 2022–2034, 2009.

Païdoussis, M. P.; Price, S. J.; De Langre, E. **Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities.** Cambridge University Press, 2010.

De Paula, A. V. **Estudo sobre o fenômeno da biestabilidade de escoamentos turbulentos em bancos de tubos de arranjo triangular**, 2008. Mestrado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

De Paula, A. V. **Determinação de Parâmetros que Caracterizam o fenômeno da biestabilidade em escoamentos turbulentos.**, 2013. Doutorado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Peschard, I.; Le Gal, P. Coupled Wakes of Cylinders. **Physical Review Letters**, v. 77, n. 15, p. 3122–3125, 1996.

Roach, P. E. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 8, n. 2, p. 82–92, 1987.

Schlichting, H. **Boundary-layer theory.** New York, 1968.

Selvakumar, K. K.; Kumaraswamidhas, L. A. Experimental investigation on flow-induced vibration excitation in an elastically mounted circular cylinder in cylinder arrays. **Fluid Dynamics Research**, v. 47, n. 1, p. 015508, 2015.

Silveira, R. S. **Estudo experimental do efeito da razão de bloqueio em canal aerodinâmico sobre o número de Strouhal e o fenômeno da biestabilidade no escoamento em cilindros**, 2011. Mestrado, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Sumner, D.; Wong, S. S. T.; Price, S. J.; Païdoussis, M. P. Fluid Behavior of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow. **Journal of Fluids and Structures**, v. 13, p. 309–338, 1999.

Tennekes, H.; Lumley, J. L. **A First Course in Turbulence**. Cambridge, MA, 1972.

Zdravkovich, M. M.; Stonebanks, K. L. Intrinsically nonuniform and metastableflow in and behind tube arrays. **Journal of Fluids and Structures**, v. 4, n. 3, p. 305–319, 1990.

Žukauskas, A. Heat Transfer from Tubes in Crossflow. **Advances in heat Transfer**, v. 8, 1972.

## APÊNDICE A – Análise de incertezas

A incerteza de uma medição é definida como o possível valor do erro, e este é dado pela diferença entre o valor real e o valor medido. Nos estudos experimentais é de fundamental importância a estimativa dos efeitos das incertezas de medições nos resultados finais, possibilitando assim a avaliação de prováveis fontes de erros.

A incerteza de um resultado pode ser calculada combinando-se as incertezas das variáveis envolvidas, dada por Moffat, 1988

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

em que  $R = R(X_1, X_2, \dots, X_n)$  é o resultado em análise e  $\delta X_i$  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  $X_i$ .

Aplicando-se a Equação A.1 à equação que define o número de Reynolds (Equação A2), pode-se calcular a incerteza na determinação do número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{Ud}{\nu} \quad (\text{A.2})$$

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

A incerteza na leitura dos valores medidos é dada pela resolução da escala de medição. Na Tabela A.1 encontramos os principais valores de resolução das escalas dos instrumentos utilizados neste trabalho.

Aplicando-se a Equação A.1 na Equação A4 temos a incerteza calculada para o número de Strouhal:

$$S = \frac{fd}{V} \quad (\text{A.4})$$

$$\delta S = S \left[ \left( \frac{\delta f}{f} \right)^2 + \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\delta d}{d} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

A incerteza na leitura do diâmetro dos tubos ( $d$ ) é de  $\pm 0,0001$  m. A incerteza no posicionamento das sondas é estimado em  $\pm 0,001$  m. A aproximação da sonda em relação aos tubos é realizada com um sistema de posicionamento tridimensional, que permite o alinhamento milimétrico do suporte da mesma. O ajuste após a aproximação aos tubos é realizado por meio de um paquímetro, cuja incerteza de medição é de  $\pm 0,05$  m.

A incerteza na leitura da velocidade depende da equação utilizada para conversão dos valores de tensão obtidos pelo anemômetro de fio quente. Para sonda de fio reto utiliza-se a Equação A.5, [Indrusiak, 2004]:

$$\delta U_x = \frac{U_x}{nx} \left[ (\ln U_x \delta nx)^2 + \left( \frac{1}{B_x} \delta B_x \right)^2 + \left( \frac{2E_{0x}}{E_x^2 - E_{0x}^2} \delta E_{0x} \right)^2 + \left( \frac{2E_x}{E_x^2 - E_{0x}^2} \delta E_x \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

A faixa da incerteza das medições de velocidade com a sonda de fio quente situa-se na faixa entre 1 e 5 %, e depende da curva de calibração utilizada.

A incerteza para os valores de frequências de desprendimento de vórtices utilizando-se a análise de Fourier, estão relacionados com a largura de banda ( $Be$ ) e com o erro médio estatístico ( $\varepsilon$ ) de cada aquisição realizada. Valores usuais destes são  $3 \text{ Hz} < Be < 4 \text{ Hz}$  e  $8 \% < \varepsilon < 12 \%$ .

A incerteza na leitura de uma medição depende da resolução da escala do respectivo instrumento de medição envolvido. Na Tabela A.1 encontram-se listadas as principais resoluções dos instrumentos utilizados neste trabalho.

Tabela A. 1 – Resolução dos principais instrumentos utilizados.

Equipamento	Resolução	Unidade
Sensor de Temperatura	$\pm 0,1$	$^{\circ}\text{C}$
Barômetro	$\pm 0,5$	mmHg
Paquímetro	$\pm 0,05$	mm
Trena	$\pm 0,5$	mm
Micromanômetro de coluna	$\pm 0,02$	mmH <sub>2</sub> O
Manômetro de coluna d'água	$\pm 1$	mmH <sub>2</sub> O
Manômetro eletrônico	1%	
Multímetro digital de mão	$\pm 0,5\% + 4D$	mA

## APÊNDICE B – Procedimento de calibração de sondas de fio quente em canal aerodinâmico

A calibração das sondas de anemometria de fio quente é realizada com a utilização de um bocal convergente, cuja função é restringir gradualmente o fluxo do escoamento, aumento assim sua velocidade. Um tubo de Pitot está instalado na mesma seção onde serão posicionadas as sondas de fio quente, modelo DANTEC 55P11, sendo responsável pela medição da pressão. Os valores de pressão são anotados juntamente com os valores de tensão apresentados pelas sondas, uma relação entre tensão e velocidade é realizada. Geralmente as curvas de calibração são obtidas para 10 ou 12 pontos de medição, distribuídos no intervalo de zero até 45 m/s com o auxílio de um inversor de frequências. Dados como a pressão ambiente, obtida com barômetro e temperatura ambiente, obtida com sensor de temperatura, também são utilizados na obtenção dos coeficientes “n” e “B”, utilizados na correção da curva da velocidade.

A Tabela B.1 mostra um registro típico de calibração do sensor de velocidade. Em função das faixas de medição, são utilizados três equipamentos para a medição da pressão no interior do canal: um micro manômetro de coluna inclinada para valores de velocidades inferiores a 8 m/s, um manômetro eletrônico para valores entre 8 m/s e 20 m/s e um manômetro de coluna d’água para valores superiores a 21 m/s. A Figura B.1 mostra uma relação típica entre tensão e velocidade resultante da calibração e a Figura B.2 mostra a variação do erro de calibração em função da velocidade.

Tabela B. 1 – Registro típico de uma calibração do sensor de velocidade

$E_{corr}$ [V]	$U_{real}$ [m/s]	$\ln(E^2 - E_0^2)$	$\ln(U_{real})$	$U_{calc}$ [m/s]	Erro [%]
1,8350	3,3945	0,2303	1,2221	3,1643	6,7808
1,9309	5,2579	0,4825	1,6597	5,2290	0,5501
2,0109	7,2490	0,6601	1,9809	7,4488	-2,7574
2,1028	10,2206	0,8386	2,3244	10,6275	-3,9807
2,2196	15,0479	1,0361	2,7112	15,7499	-4,6655
2,3085	19,7524	1,1697	2,9833	20,5475	-4,0252
2,3924	25,3894	1,2852	3,2343	25,8632	-1,8660
2,4364	28,7479	1,3422	3,3586	28,9749	-0,7898
2,4943	34,2570	1,4142	3,5339	33,4410	2,3821
2,5473	38,9955	1,4771	3,6634	37,9017	2,8049
2,6002	44,9056	1,5374	3,8046	42,7428	4,8163

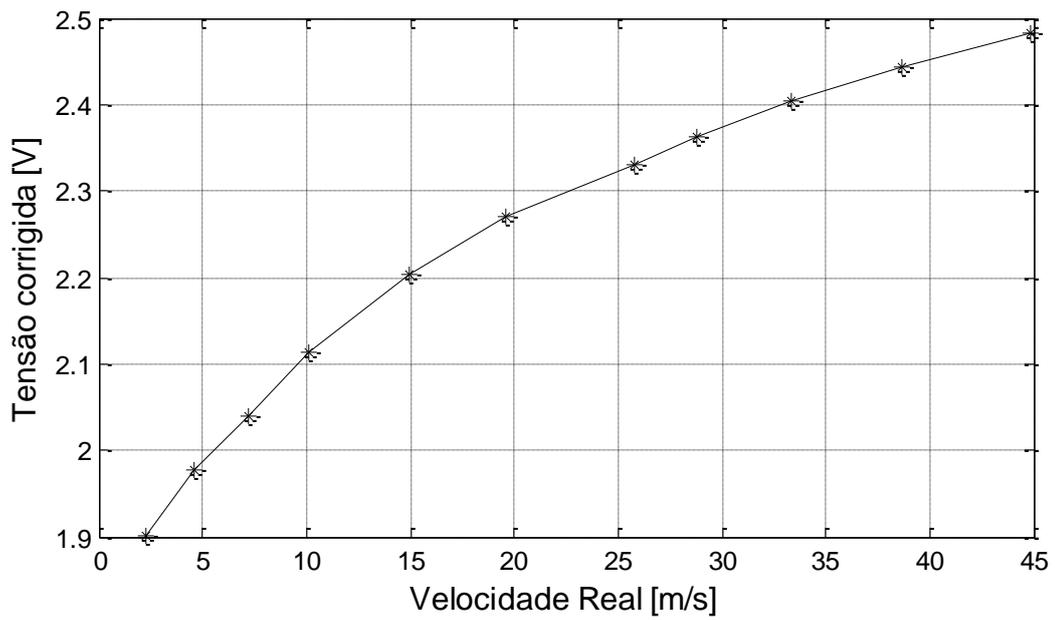


Figura B. 1 – Relação Típica entre tensão e velocidade resultante da calibração.

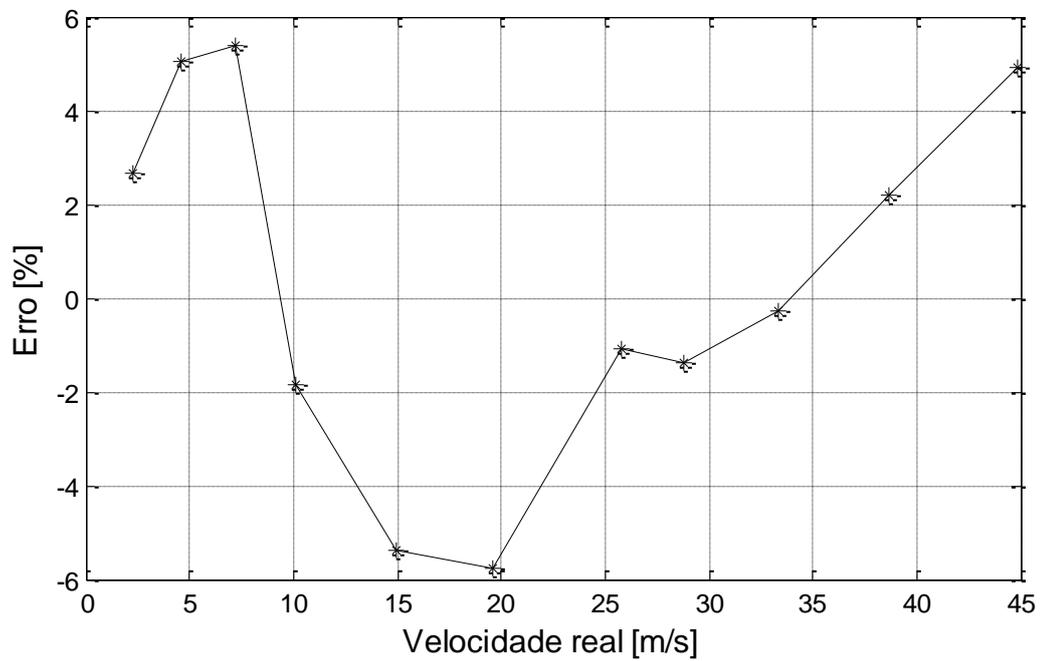


Figura B. 2 – Variação do erro da calibração com a velocidade.