

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO TRANSVERSAL TURBULENTO
SOBRE DOIS CILINDROS PARALELOS FIXOS, COM LIBERDADE OSCILATÓRIA E
ROTACIONAL

por

Dolir Jose Climaco Varela

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2017

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO TRANSVERSAL TURBULENTO
SOBRE DOIS CILINDROS PARALELOS FIXOS, COM LIBERDADE OSCILATÓRIA E
ROTACIONAL

por

Dolir Jose Climaco Varela
Engenheiro Mecânico

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 Cláudio Rodrigues Olinto, FURG

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, PPGEE/UFRGS

Prof. Dra. Adriane Prisco Petry, DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 27 de Julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. A minha família e amigos, e em especial ao meu orientador professor Dr. Sergio Viçosa Möller, pela dedicação e sabedoria demonstradas durante essa jornada. Agradeço também aos meus colegas de laboratório, Roberta e Gustavo, pelo apoio e pela ajuda prestada durante o processo de aprendizado e ao professor Dr. Alexandre Vagtinski de Paula pelo auxílio durante os procedimentos experimentais. Um obrigado especial também à Katia Zanella, por estar ao meu lado nos momentos que mais precisei. Ao programa do PROMEC e aos professores do mesmo, pela oportunidade e conhecimentos transmitidos.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental do fenômeno de biestabilidade que ocorre na geometria simplificada de dois tubos dispostos lado a lado submetidos a um escoamento cruzado turbulento. Na análise consideram-se a condição de tubos fixos e com um grau de liberdade (rotacional), submetidos a diferentes números de Reynolds. A técnica experimental consiste na medição de flutuações de velocidade do escoamento através da anemometria de fio quente em canal aerodinâmico, na avaliação dos esforços do escoamento sobre os tubos com o uso de uma célula de carga e na visualização dos efeitos do fenômeno biestável sobre os tubos livres para rotacionar. Os dados obtidos da medição no canal são tratados com o uso de ferramentas estatísticas, espectrais e de ondaletas. Os resultados das visualizações do escoamento são apresentados através de imagens obtidas das filmagens realizadas com uma câmera digital. A investigação experimental consiste de ensaios de cilindros rígidos elasticamente montados e pivotados na base e posteriormente liberados para oscilar e/ou rotacionar em um eixo central aos dois tubos, submetidos ao escoamento perpendicular permanente de ar no canal. Nos resultados experimentais observam-se a presença da biestabilidade e nota-se o comportamento não simultâneo deste fenômeno ao longo dos cilindros. A formação assimétrica das esteiras também é estudada e atribuída à interação entre os vórtices das esteiras, já que, inicialmente, o desprendimento dos vórtices atrás dos cilindros é simétrico. Na avaliação dos esforços por extensimetria, as etapas de condicionamento e aquisição do sinal foram elaboradas e os resultados de deformação mecânica apresentaram similaridade com o fenômeno observado na anemometria experimental. Para um número de Reynolds de 27635 encontrou-se uma força de 26,1 mN com um torque desenvolvido na célula de carga de 84,95Nmm. A técnica de visualização do fenômeno empregada corrobora a interpretação dos resultados obtidos através da técnica de anemometria de fio quente e extensimetria em canal aerodinâmico.

Palavras-chave: Escoamento Biestável; Anemometria de fio quente; Turbulência; Célula de carga; Análise Experimental.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study of the bistability phenomenon that occurs in the simplified geometry of two tubes arranged side by side submitted to a turbulent cross flow. In the analysis we consider the condition of fixed tubes and with a degree of freedom (rotational), submitted to different Reynolds numbers. The experimental technique consists in the measurement of velocity fluctuations through the aerodynamic channel with the hot wire anemometry technique, the evaluation of the stresses of the flow on the tubes with the use of a load cell and the visualization of the effects of the bistable phenomenon on the tubes free to rotate. The data obtained from the measurement in the channel are treated with the use of statistical, spectral and wavelet tools. The results of the flow visualizations are presented through images obtained with a high speed digital camera. The experimental investigation consists of tests of rigid cylinders mounted elastically and pivoted at the base and later released to oscillate and / or to rotate in a central axis to the two tubes, submitted to the flow of air in the channel. In the experimental results we observe the presence of bistability and note the non-simultaneous behavior of the phenomenon along the cylinders. The asymmetric formation of the wakes is also studied and attributed to the interaction between the vortices from wakes behind the cylinders, since, initially, the wake detachments is symmetrical. In the evaluation of the forces by means of the extensimetry technique, the steps of conditioning and acquisition of the signal were elaborated and the results of mechanical deformation presented similarity with the phenomenon observed in the experimental anemometry. For a Reynolds number of 27635 a force of 26.1 mN was found with a torque developed in the load cell of 84.95 Nmm. The technique used for the visualization of the phenomenon corroborates the interpretation of the results obtained through hot wire anemometry and extensimetry in aerodynamic channel.

Keywords: Bistable flow; Hot wire anemometry; Turbulence; Load cells; Experimental analysis;

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3	FUNDAMENTOS.....	17
3.1	DOMÍNIO DO TEMPO	18
3.2	DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	21
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	23
3.4	DOMÍNIO TEMPO – FREQUÊNCIA	25
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
4.1	TÉCNICA EXPERIMENTAL.....	29
4.1.1	Canal aerodinâmico	29
4.1.2	Anemometria de Fio quente	31
4.1.3	Base de fixação e articulação dos tubos	34
4.1.4	Célula de carga	35
4.1.5	Visualização.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	DOIS TUBOS FIXOS DISPOSTOS LADO A LADO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE REYNOLDS 40	
5.2	DOIS TUBOS FIXOS COM REPOSICIONAMENTO DE SONDAS.....	49
5.3	TUBOS LIVRES PARA ROTACIONAR.....	58
5.4	FORÇA DE ARRASTO E MOMENTO DE ROLAMENTO	66
5.5	VISUALIZAÇÃO	70
6	CONCLUSÕES.....	74
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	75
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	APÊNDICE A - INCERTEZA DE MEDIÇÃO	82
	APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE FIO QUENTE.....	86

APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	90
--	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação esquemática do escoamento biestável para (a) modo 1 e (b) modo 2, e seus respectivos sinais característicos (de Paula, 2013)	2
Figura 2.1 - Esquema das esteiras assimétricas apresentando esteira larga, esteira estreita e escoamento de fenda inclinado (Alam <i>et al.</i> , 2003).	4
Figura 2.2 – Comportamento numérico das esteiras com a variação das razões de espaçamento entre cilindros, adaptado de Afgan <i>et al.</i> , 2011.	5
Figura 2.3 – Sinal temporal experimental obtido com anemometria de fio quente para valores de velocidade apresentando trocas de modos biestáveis.	6
Figura 2.4 - Comportamento do número de Strouhal em relação ao espaçamento entre cilindros sobre bancos de tubo com arranjo quadrangular, adaptado de Blevins, 1990.	8
Figura 2.5 – Comportamento do número de Strouhal em relação ao número de Reynolds sobre cilindros simples, adaptado de Blevins, 1990.	8
Figura 2.6 – Regiões de interferência entre cilindros, adaptado de Zdravkovich, 1997.	9
Figura 2.7 – Processo de formação e desprendimento do vórtice sobre um cilindro adaptado de Meneghini, 2002.	10
Figura 4.1 – Esquema do canal aerodinâmico utilizado nos experimentos, adaptado de Paula, 2008.	30
Figura 4.2 – Posicionamento dos tubos na seção de testes experimental.....	31
Figura 4.3 – Esquema do sistema de aquisição de dados por anemometria de fio quente, adaptado de Dantec, 2004.....	32
Figura 4.4 – Conjunto de posicionador para as sondas de fio quente a) posicionador do suporte da sonda de fio quente, b) movimentação em z (Traverstool, 2015) e c) mesa x e y (Bazus ,2015).....	33
Figura 4.5 – Suporte de posicionamento de duas sondas simultaneamente na posição a) Vertical e b) Horizontal (Neumeister, 2015).....	34
Figura 4.6– Suportes de fixação e articulação dos tubos.....	34
Figura 4.7– Esquema para articulação do experimento.....	35
Figura 4.8 – Posicionamento e ligação dos extensômetros (Balbinot e Brussamarello, 2011).	36
Figura 4.9 – Bancada de medições.	37

Figura 4.10 – Elemento mola fixado no eixo da base.	37
Figura 4.11 – Câmera de alta velocidade com lente acoplada e tripé de fixação.	38
Figura 4.12 – Luminária LED.	39
Figura 5.1 – Geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o posicionamento das sondas utilizadas nos experimentos (Adaptado de De Paula, 2008).	41
Figura 5.2 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	42
Figura 5.3 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	43
Figura 5.4 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	43
Figura 5.5 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	44
Figura 5.6 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	44
Figura 5.7 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1. (b) Sonda 2.	45
Figura 5.8 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	45
Figura 5.9 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	46
Figura 5.10 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	46
Figura 5.11 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	47
Figura 5.12 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	47
Figura 5.13 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	48
Figura 5.14 – Geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o posicionamento das sondas utilizadas nos experimentos (adaptado de De Paula, 2008).	50
Figura 5.15 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	51
Figura 5.16 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	51
Figura 5.17 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	52

Figura 5.18 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	53
Figura 5.19 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	53
Figura 5.20 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	54
Figura 5.21 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	54
Figura 5.22 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	55
Figura 5.23 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	55
Figura 5.24 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	56
Figura 5.25 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	56
Figura 5.26 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	57
Figura 5. 27 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	60
Figura 5. 28 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	60
Figura 5. 29 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	61
Figura 5. 30 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	61
Figura 5. 31 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	62
Figura 5. 32 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	62
Figura 5. 33 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	63
Figura 5. 34 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	64
Figura 5. 35 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	64
Figura 5. 36 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.	65

Figura 5. 37 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.	66
Figura 5. 38 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.	66
Figura 5.39 – Sinais de Força e a reconstrução dos sinais através de transformada discreta de ondaletas. (a) $Re: 1,80 \times 10^4$, (b) $Re: 2,30 \times 10^4$, (c) $Re: 2,74 \times 10^4$	69
Figura 5.40 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) $Re: 1,80 \times$ 10^4 , (b) $Re: 2,30 \times 10^4$, (c) $Re: 2,74 \times 10^4$	70
Figura 5.41 – Visualização com $Re = 1,39 \times 10^4$	72
Figura 5.42 – Visualização com $Re = 2,76 \times 10^4$	73
Figura B.1 - Dispositivo de calibração da sonda de fio quente, adaptado de Paula, 2013.	86
Figura B.2 – Curva característica de calibração.	89
Figura B.3 – Curva característica de erro na calibração.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1– Medições de Pressão, Velocidade, Reynolds, Força e Torque.	68
Tabela A.1– Equipamentos e resoluções	82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CESUP	Centro Nacional de Supercomputação
CTA	Constant Temperature Anemometry
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numeric Simulation
DPIV	Doppler Particle Image Velocimetry
FFT	Fast Fourier Transform
GCI	Grid Convergence Index
LES	Large Eddy Simulation
LDA	Laser Doppler Anemometry
LMF	Laboratório de Mecânica dos Fluidos
PIV	Particle Image Velocimetry
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RMS	Root Mean Square
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
SAS	Scale Adaptive Simulation
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent
SGMV	Systematic grid and model variation
SST	Shear Stress Transport
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
URANS	Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

a	Coeficiente de escala da ondaleta
A_P	Coeficiente da discretização sub índice indica direção análise (P, N, S, E, F e B)
B	Coeficiente de intercepção entre curvas de calibração
B_e	Largura de banda de frequência, Hz
b	Coeficiente de posição da ondaleta
$B(u')$	Função densidade probabilidade
C_L	Coeficiente de sustentação
C_D	Coeficiente de arrasto
C_{xy}	Coeficiente de correlação cruzada
C_ψ	Coeficiente de correlação ondaletas
c_μ	Constante de viscosidade do modelo de turbulência
C_{ij}	Tensor cruzado
$c(x,t)$	Coeficiente dinâmico de grandezas resolvidas em LES
c	Constante fechamento modelo de turbulência
d	Diâmetro do cilindro, m
D	Condutância da difusão do escoamento
E	Tensão lida pela ponte de Wheatstone
e	Rugosidade
E_{corr}	Tensão corrigida, V
E_p	Constante empírica lei da parede
ε	Erro entre valores das variáveis monitoradas
E_0	Tensão na velocidade zero, V
$E_{0\text{corr}}$	Tensão corrigida da velocidade zero, V
f_c	Frequência de corte, Hz
f_s	Frequência de aquisição, Hz
f	Frequência, Hz
\tilde{f}	Variável grandes escalas
I	Corrente, A

IT	Intensidade turbulenta, %
i	Função imaginária
J	Constante lei da parede
k	Energia cinética turbulenta, m^2/s^2
κ	Constante de von Kármán, 0,41
k_p	energia cinética turbulenta na parede adjacente da célula centroide P
l	Tamanho do bloco da série de dados
L	Comprimento característico, m
L_{vk}	Comprimento de escala de von Kármán, m
L_m	Dimensão medida com trena, mm
M_{ij}	Tensor sub-teste
m	Coefficiente de posição para a subamostra da ondaleta
n	Coefficiente de inclinação entre curvas de calibração
offset	Acréscimo de tensão executada nas medições com sonda de fio quente, V
p	Pressão, Pa
\bar{p}	Pressão média, Pa
p'	Flutuação de pressão, Pa
P_d	Pressão dinâmica, Pa
p/d	Razão de espaçamento entre cilindros
p	distância entre centros dos cilindros, m
P	Pressão atmosférica, Pa
$P_{xx}(a,b)$	Espectro ondaleta contínua
P_k	Taxa de produção da energia cinética
$P_{xx}(d,e)$	Espectro ondaleta discreta
P^*	Pressão estimada, Pa
R_{xy}	Correlação cruzada
R_{xx}	Autocorrelação
Re	Número de Reynolds, $\bar{u}d / \nu$
R	Conjunto dos números reais
R_{ar}	Constante específica do ar, J/kg,K
R_i	Variável de interesse para cálculo de incerteza

s	Valor absoluto da taxa de deformação no modelo de turbulência
S_{ij}	Tensor da taxa de deformação
S_k	Terceiro momento das potências de velocidade – skewness
S	Tensão de Reynolds anisotrópica
St	Número de Strouhal, fd / \bar{u}
t	Tempo, t
T_{ar}	Temperatura, K
T	Tensor de Reynolds
T_{ij}	Tensor de Reynolds sub-teste
T_m	Temperatura do meio, °C
T_c	Temperatura média durante a calibração, °C
T_0	Temperatura na velocidade zero, °C
u_i	Componente velocidade em notação indicial, m/s
u_j	Componente velocidade em notação indicial, m/s
u	Velocidade instantânea, m/s
u'	Flutuação de velocidade, m/s
\bar{u}	Velocidade média, m/s
u^*	Relação da tensão na parede e massa específica, m/s
u^+	Velocidade adimensional
u^*	Velocidade escalas submalha, m/s
\tilde{u}	Velocidade grandes escalas, m/s
u_{real}	Velocidade real da calibração, m/s
U	Velocidade calculada a partir dos coeficientes B e n
y	Direção da coordenada
y_p	Distância da parede adjacente da célula centroide P
y^+	Distância adimensional
y^*	Distância adimensional
v'	Flutuação da velocidade em y, m/s
ν_t	Viscosidade turbulenta, m^2/s
ν	Viscosidade cinemática, m^2/s
x	Direção da coordenada

$x(t)$	Função genérica
x_i	Componente direção em notação indicial, m
x_j	Componente direção em notação indicial, m
x_i	Variável primária no cálculo de incerteza
w'	Flutuação de velocidade em z, m/s
z	Direção da coordenada

Letras Gregas

δx_i	Incerteza da variável x_i
ϕ_{xx}	Espectro de potência de Fourier
ϕ_{xy}	Densidade espectral
ϕ	Propriedade da função de escala ondaleta
κ	Constante de von Kármán, 0,41
μ	Viscosidade dinâmica, kg/ms
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta, kg/ms
π	Constante, 3,1415
ψ	Função ondaleta
ρ	Massa específica, kg/m ³
τ_T	Tensão total, Pa
τ_w	Tensão na parede, Pa
τ_ω	Tensão de cisalhamento, Pa
τ	Tempo de defasagem, s
τ_{ij}	Tensor de Reynolds
σ^2	Segundo Momento - Variância
σ_k	Constante de difusão da energia cinética turbulenta
σ_ϕ	Constante de difusão do comprimento de escala de von Kármán
∇	Operador Laplaciano
ω	Taxa de dissipação específica, 1/s

1 INTRODUÇÃO

Bancos de tubos são uma configuração muito comum em diversas aplicações de engenharia, como aquelas encontradas em núcleos de reatores nucleares, em tubulações de transporte, como oleodutos e gasodutos, em linhas de transmissão de energia elétrica, em tubulações de transporte e prospecção de petróleo offshore, conhecidas como risers e no interior de trocadores de calor do tipo casco e tubos.

Em escoamentos sobre arranjos de tubos pode ocorrer vibração induzida, causadas pelas cargas dinâmicas provenientes do próprio escoamento, e que geralmente são amplificadas com o aumento da velocidade do fluido. O aumento da eficiência dos trocadores de calor e de sua consequente compacticidade pode ser obtido através da diminuição da distância entre os tubos (passo) e do aumento da velocidade do escoamento do fluido, porém, com desejada redução da resistência da subcamada viscosa adjacente à parede dos tubos. A presença desta subcamada faz com que a transferência de calor ocorra somente por condução, pois nela o escoamento tem características laminares, com pouca difusividade. Um projeto que não leva tal fato em consideração acarretará em maiores custos operacionais e na movimentação do fluido de trabalho, sem significativo aumento da transferência de calor (Endres e Möller, 2001b).

Alam et al., 2003, estudaram experimentalmente o escoamento ao redor de dois cilindros dispostos lado a lado e identificaram a ocorrência de um jato desviado que emana entre os dois tubos e se direciona para um dos lados. Porém, este comportamento altera-se subitamente, e o jato passa a direcionar-se para o lado oposto. Esta característica é chamada na literatura como biestabilidade, e ocorre em períodos irregulares de tempo.

O fenômeno da biestabilidade, mostrado na Figura 1.1, possui características muito interessantes e muitas delas ainda não completamente entendidas. Este desconhecimento dos mecanismos que agem nos escoamentos sobre dois cilindros posicionados lado a lado é a principal motivação do presente estudo, sendo que, a insciência das razões e dos meios do acontecimento do fenômeno biestável é o interesse central das análises.

Na biestabilidade há uma esteira estreita a jusante de um dos tubos e uma esteira larga a jusante do outro (Figura 1.1a e 1.1b). Este fenômeno gera duas frequências predominantes de desprendimento de vórtices, cada uma delas associada a uma esteira: a esteira estreita está associada com a maior frequência, e a esteira larga está associada com a menor frequência de

desprendimento. Através da fenda, o escoamento é desviado na direção de um dos cilindros, formando a esteira estreita. O escoamento biestável é caracterizado pela mudança no padrão de escoamento da fenda, de um lado para o outro, em períodos irregulares de tempo. Desta maneira, se a velocidade do escoamento for medida, por exemplo, ao longo de linhas tangentes às geratrizes externas dos cilindros, a jusante, um padrão de troca entre os modos do escoamento pode ocorrer conforme o ilustrado no esquema da Figura 1.1c. De acordo com estudos anteriores, este padrão é independente do número de Reynolds e não está associado com possíveis desalinhamentos entre os cilindros ou influências externas, o que sugere ser uma característica intrínseca do escoamento.

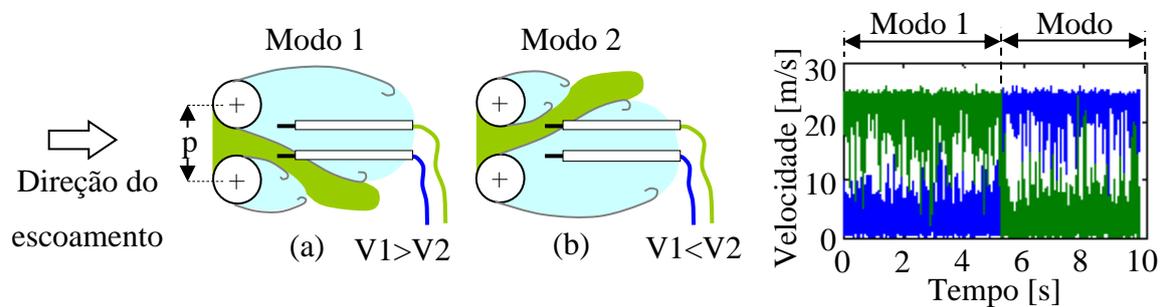


Figura 1.1. Representação esquemática do escoamento biestável para (a) modo 1 e (b) modo 2, e seus respectivos sinais característicos (de Paula, 2013)

Considerando que o escoamento exerce esforços sobre as superfícies sólidas, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo para a determinação da inter-relação entre o fenômeno da biestabilidade em escoamentos turbulentos sobre cilindros paralelos dispostos lado a lado com razão de espaçamento $p/d = 1,26$ e as forças causadas pelo escoamento sobre os cilindros, visto que a biestabilidade pode atuar como uma fonte adicional de instabilidades dinâmicas nessa geometria.

Desta maneira, foi empregada a técnica de anemometria de fio quente em canal aerodinâmico com o intuito de medir o campo médio e flutuante de velocidades a jusante dos tubos, obtendo-se assim séries temporais de velocidade e ondaletas. Foi analisado o comportamento transiente do escoamento nas regiões de esteira para melhor entender o fenômeno biestável e os mecanismos envolvidos no mesmo e mensurar as ações das flutuações de velocidade em pontos das esteiras para diferentes números de Reynolds.

Para complementar esta investigação, foram realizadas medições de flutuações das forças de arrasto e momento de rolamento as quais são originadas pela interação, fluido (ar) e

estrutura (tubos), no canal aerodinâmico com o uso da célula de carga. Esta etapa da investigação experimental consiste de ensaios de cilindros rígidos montados em uma base, submetidos ao escoamento permanente de ar no canal. Esta base tem um eixo na parte superior e inferior, com mancais de rolamentos que possibilitaram o movimento rotacional dos tubos. Os resultados poderão correlacionar os modos de desprendimento de vórtices do fenômeno da biestabilidade de tubos rígidos com aqueles que apresentam movimento rotacional e conseqüentemente geram momento torçor na estrutura elaborada.

Ao final, efetua-se a filmagem da movimentação dos tubos quando submetidos ao escoamento com liberdade rotacional, visando descrever e melhor compreender as características dos fenômenos observados durante os experimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Biestável é o conceito utilizado para descrever um fenômeno que, sobre as mesmas condições, apresenta comportamentos distintos de forma estável. Por este motivo, o comportamento dos escoamentos sobre cilindros, que apresentam dois patamares de médias de velocidades sob as mesmas condições, é chamado escoamento biestável.

A ocorrência do fenômeno da biestabilidade é diretamente dependente do espaçamento entre os cilindros, que é a relação das distâncias entre centros, p , e o diâmetro de um dos cilindros, d . O fenômeno é observado em espaçamentos $1,1 \sim p/d \sim 2$, nos quais ocorre a formação de esteiras assimétricas, conforme apresenta-se na Figura 2.1. Essa configuração possui uma esteira larga, uma esteira estreita e um escoamento de fenda inclinado e a biestabilidade é caracterizada pela troca de assimetria entre as esteiras sem razão aparente. A influência do número de Reynolds neste comportamento não é tão relevante, já que nos estudos efetuados por Alam et al., 2003, Sumner, 2010, e por Xu et al., 2003, o fenômeno acontece em baixos e altos números de Reynolds.

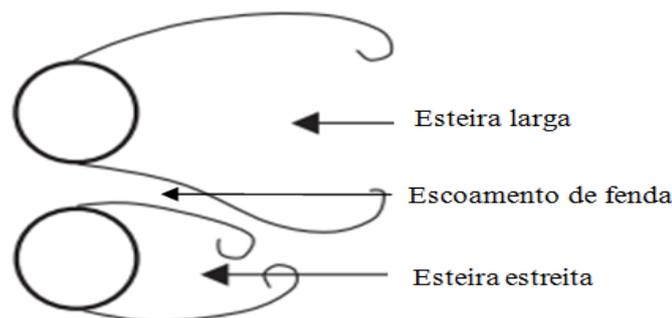


Figura 2.1 - Esquema das esteiras assimétricas apresentando esteira larga, esteira estreita e escoamento de fenda inclinado (Alam *et al.*, 2003).

No escoamento sobre cilindros alinhados lateralmente a assimetria de esteiras chama atenção, pois intuitivamente dois corpos simétricos imersos em um escoamento com mesmas características devem resultar em esteiras simétricas, mas isto não ocorre. Zdravkovich, 1997, cita que o escoamento da fenda inclinado possui duas características paradoxais. A primeira delas é que o escoamento simétrico sobre os cilindros cria um escoamento assimétrico e que um escoamento uniforme gera um comportamento não uniforme e randômico. O autor sugere, ainda, dois estágios que levam para a inclinação e a mudança de lado de assimetria

randômico. No primeiro estágio: a interferência acontece na fenda entre as camadas de cisalhamento que geram vórtices com sinal oposto. Como as camadas de cisalhamento estão na vizinhança nos cilindros com pouco espaçamento, eles mutuamente inibem o desprendimento dos turbilhões. Então, uma pequena deflexão no escoamento da fenda perturba o escoamento, uma das camadas cisalhantes se desprende e isto desencadeia o aumento da inclinação. O segundo estágio que o autor cita é que o mecanismo da troca intermitente da direção de inclinação pode estar relacionado com a deflexão inicial nas camadas de cisalhamento livre, externas aos cilindros. As camadas de cisalhamento separadas podem ser defletidas para o outro lado e o desprendimento inicial muda para aquela direção.

As faixas de relações de espaçamento em que o comportamento assimétrico é encontrado não é unânime na literatura, sendo que Zdravkovich, 1997, e Sumner, 2010, indicam a faixa entre $1,1 < p/d < 2 \sim 2,2$ e Afgan et al., 2011, destaca $1,1 < p/d < 1,8$. Optou-se pela aplicação das faixas de abrangência indicadas pelos autores, sendo que o importante são as características observadas, conforme apresenta-se na Figura 2.2, onde para cilindros com $p/d = 1$ o comportamento é de um único corpo rombudo existindo apenas uma esteira. Para $1,1 < p/d < 1,8 \sim 2,2$ existem duas esteiras com configurações distintas, que apresentam característica assimétrica e a troca biestável. Para $1,8 \sim 2,2 < p/d < 4$ verificou-se a presença de duas esteiras sem grande influência entre elas, mas ainda apresentando relação em fase ou anti fase e para $p/d > 4 \sim 5$ não há interferência entre as esteiras dos cilindros.

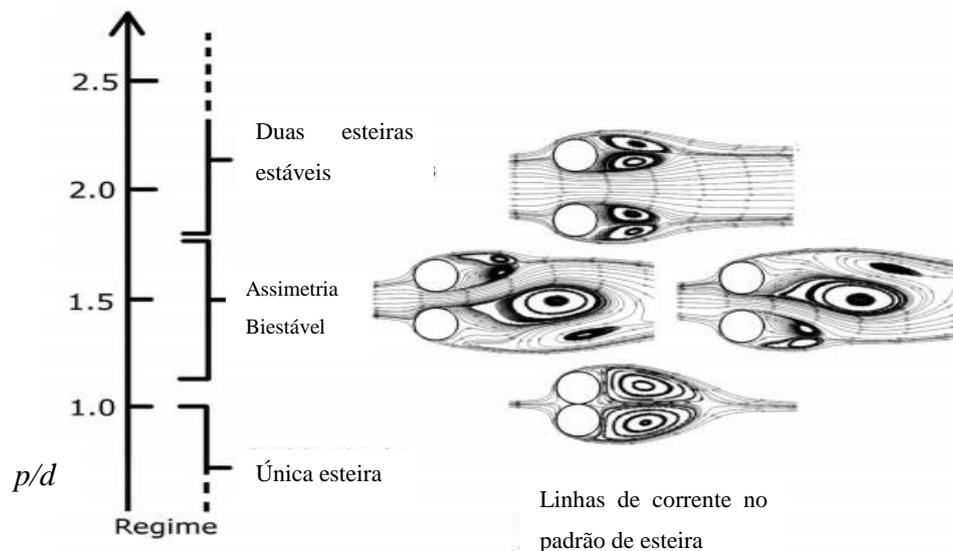


Figura 2.2 – Comportamento numérico das esteiras com a variação das razões de espaçamento entre cilindros, adaptado de Afgan et al., 2011.

A biestabilidade é observada experimentalmente nos patamares com médias distintas ao longo de uma série temporal e podem ser observadas na Figura 2.3. Na qual o patamar com velocidade média em 4 m/s representa a esteira larga e o patamar com velocidade média em 10 m/s a esteira estreita. Na figura 2.3 observa-se a característica não periódica de troca de modos, onde identificam-se períodos longos e curtos entre as trocas, na mesma série temporal.

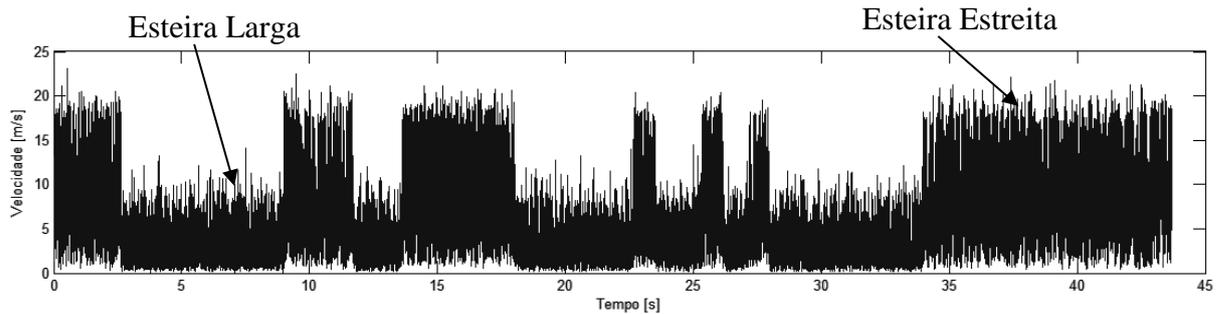


Figura 2.3 – Sinal temporal experimental obtido com anemometria de fio quente para valores de velocidade apresentando trocas de modos biestáveis.

O estudo do escoamento biestável é um assunto, relativamente, novo na pesquisa científica sendo que uma das primeiras análises de escoamento sobre cilindros utilizando visualização e anemometria de fio quente foi efetuada por Ishigai et al., 1972, onde os autores não observam a biestabilidade, mas sim o comportamento assimétrico das esteiras para $p/d = 1,25$. Alguns anos depois, Ishigai e Nichikawa, 1975, publicaram um novo estudo com escoamento sobre uma linha de cilindros, uma coluna de cilindros e duas colunas de cilindros. O intuito foi observar a formação dos vórtices e os autores concluíram que a formação dos mesmos e a inclinação do escoamento da fenda são dependentes do espaçamento entre cilindros e do efeito Coanda, pois o mesmo descreve a tendência do escoamento em aderir a uma superfície curva e desviar a direção.

Alguns anos depois Zdravkovich, 1977, apresentou uma revisão dos estudos com escoamentos sobre cilindros. O mesmo é o primeiro a utilizar o termo biestável, referindo-se ao comportamento de mudança na direção do jato na região da fenda nos resultados apresentados por Ishigai et al., 1972. Na revisão o autor mostra o comportamento das forças de arrasto e de sustentação para espaçamentos reduzidos entre cilindros.

Williamson, 1985, fez visualizações de escoamentos com baixos valores de Re sobre dois cilindros com razões de espaçamento entre 1 e 5. No estudo é apresentada a interferência entre as esteiras dos corpos, e a união das mesmas ao longo do escoamento atrás dos cilindros para baixas razões de espaçamento. Nas altas razões de espaçamento o comportamento independente das esteiras foi observado, mas com a ocorrência da sincronização das esteiras em mesmo sentido ou em sentido oposto.

Kim e Durbin, 1988, executaram o estudo experimental de escoamento sobre cilindros com anemometria de fio quente e apresentaram, pela primeira vez, o comportamento da série de velocidades com dois patamares distintos, característica da troca biestável espontânea. Os autores ligaram a troca de modos à alteração do campo de pressão atrás dos cilindros que gerou o desvio do escoamento da fenda e fez com que a assimetria fosse alterada. Aplicaram também uma placa entre os cilindros testando algumas posições, sendo que para alguns casos a chapa inibiu a troca biestável.

Blevins, 1990, apresentou um estudo sobre vibrações induzidas pelos escoamentos e entre outras abordagens o autor representou o comportamento dos números de Strouhal para diversas configurações de cilindros. Para o caso de escoamento em um banco de tubos com distribuição retangular o autor apresentou um diagrama que leva em conta o espaçamento p/d dos tubos e a distância em relação ao tubo posterior, conforme Figura 2.4. O escoamento sobre um cilindro, conforme apresentado na Figura 2.5, mostra que para a faixa de $Re = 10^3$ a 10^4 o valor do número de Strouhal fica entre 0,19 e 0,21. Ao avaliara relação entre $p/d = 1,26$ e uma distância grande em relação ao segundo tubo posicionado atrás do mesmo, nesta configuração utilizando o maior espaçamento em relação ao tubo de trás obtém-se um $St = 0,10$.

Zdravkovich, 1997, apresentou um esquema com as regiões de interferência entre cilindros, conforme apresentado na Figura 2.6, onde se podem verificar quatro regiões, sendo que a primeira delas é a região da esteira, a segunda é a proximidade do cilindro posicionado ao lado. A terceira é a região onde a proximidade entre os cilindros e a esteira apresentam influência e por último a região sem interferências, sendo que para $p/d = 1,26$ existe influência de proximidade e de esteira.

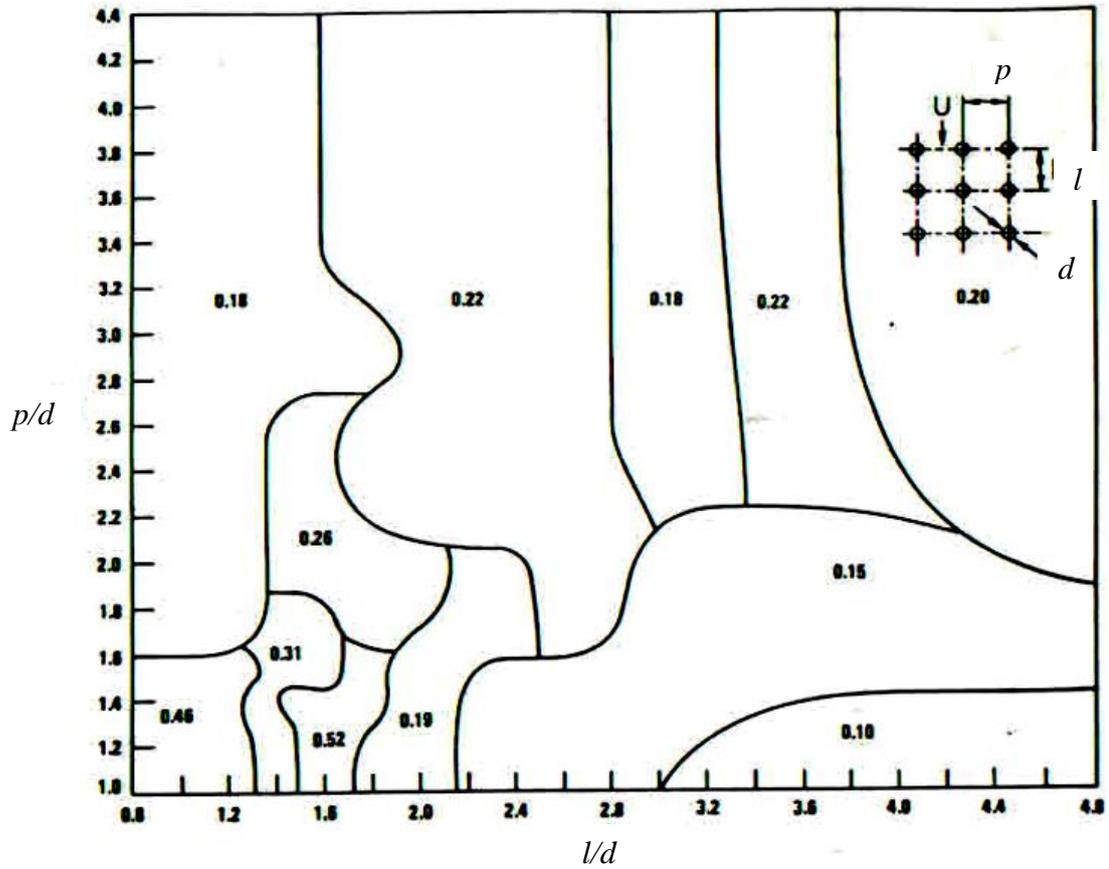


Figura 2.4 - Comportamento do número de Strouhal em relação ao espaçamento entre cilindros sobre bancos de tubo com arranjo quadrangular, adaptado de Blevins, 1990.

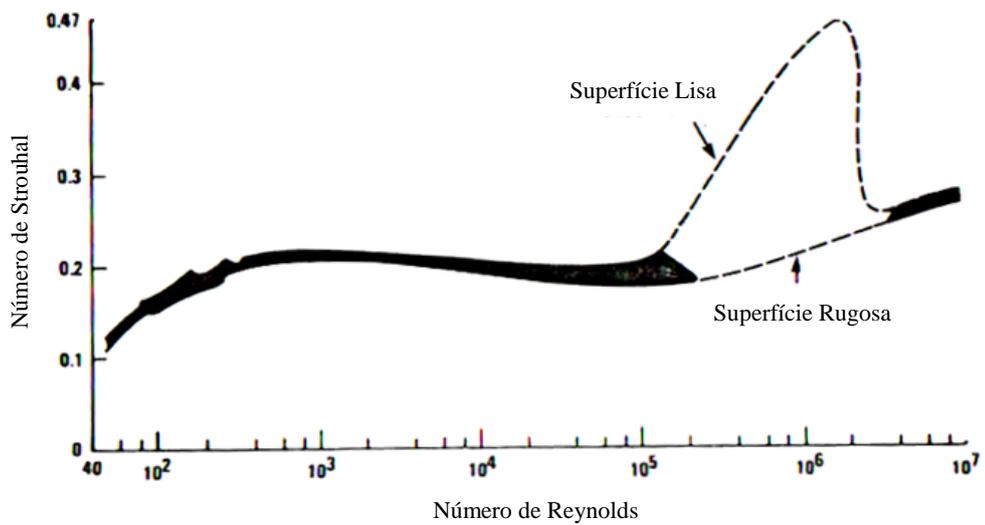


Figura 2.5 – Comportamento do número de Strouhal em relação ao número de Reynolds sobre cilindros simples, adaptado de Blevins, 1990.

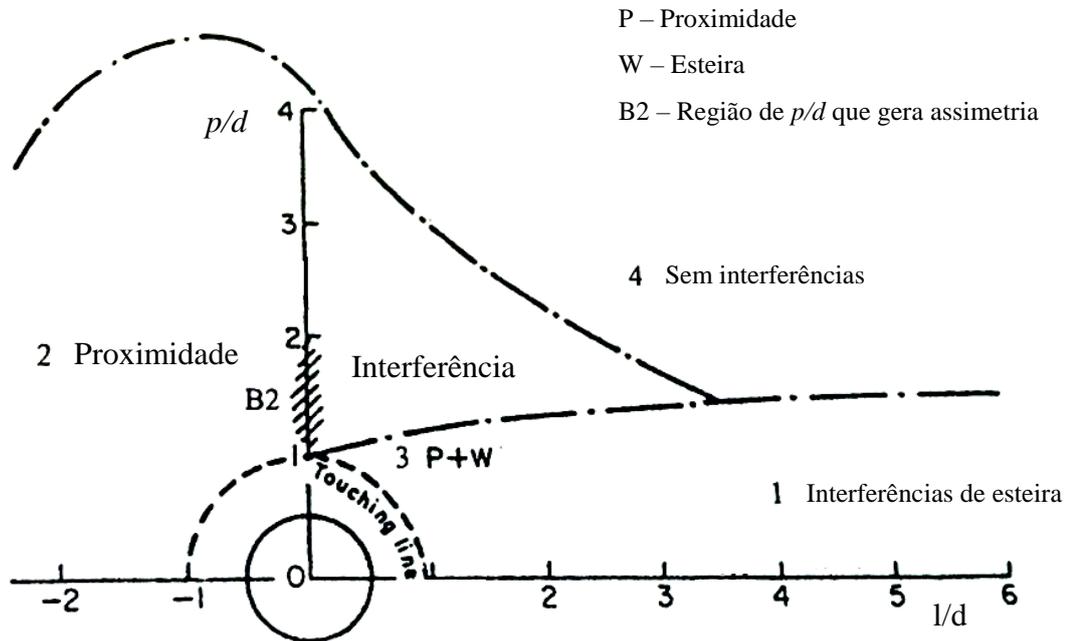


Figura 2.6 – Regiões de interferência entre cilindros, adaptado de Zdravkovich, 1997.

O modelo de desprendimento dos vórtices nos cilindros apresentado por Meneghini, 2002, descreve o mecanismo de geração de vórtices desenvolvido por Gerrard, 1966, que analisou e descreveu os mecanismos físicos envolvidos no fenômeno de formação de vórtices no escoamento ao redor de um cilindro. O modelo sugere influência entre as duas camadas cisalhantes na região da esteira do cilindro, formadas devido à separação da camada limite do corpo e constitui-se em um elemento decisivo no processo de formação dos vórtices da esteira.

A teoria descreve que o vórtice cresce recebendo circulação da camada cisalhante à qual está conectado. Depois de um determinado tempo o vórtice torna-se suficientemente intenso para atrair a camada cisalhante oposta. O fluido atraído, com vorticidade oposta, interrompe a alimentação do primeiro vórtice e então ele solta-se formando a esteira. Este modelo de Gerrard, 1966, é apresentado na Figura 2.7 com as linhas que demonstram os caminhos que as partículas de fluido da camada cisalhante podem seguir. No caminho *a* elas podem envolver-se com o vórtice em formação no lado oposto da esteira. No caminho *b* as partículas podem mover-se em direção a camada cisalhante oposta e causam a interrupção da alimentação de circulação para os vórtices em formação. No caminho *c* elas podem voltar na direção da

região da esteira próxima ao corpo e colaborar para a formação de um novo vórtice. O balanço da quantidade de fluido que segue cada um destes caminhos controla a frequência de geração e desprendimento de vórtices, a intensidade dos mesmos e a pressão na região posterior do corpo.

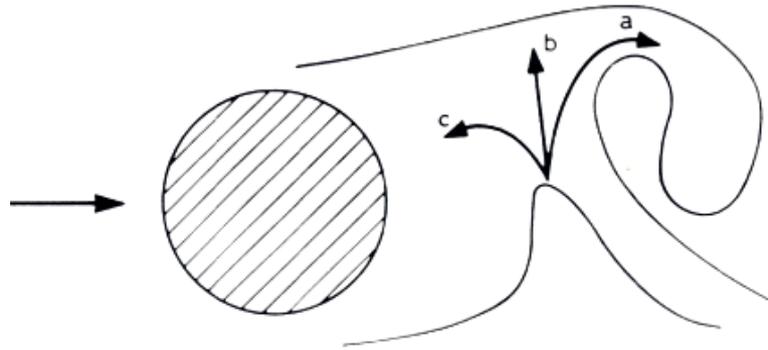


Figura 2.7 – Processo de formação e desprendimento do vórtice sobre um cilindro adaptado de Meneghini, 2002.

Guillaume e LaRue, 1999, executaram uma análise experimental, com anemometria de fio quente e visualização escoamentos sobre dois, três e quatro cilindros posicionados lado a lado. Os autores verificaram que o comportamento do escoamento a jusante os casos com três e quatro cilindros difere do encontrado no escoamento a jusante de dois cilindros, pois as estruturas se alteraram com a adição de cilindros. No mesmo ano Sumner et al., 1999, executaram uma análise de escoamento cruzado sobre dois e três cilindros de mesmo diâmetro posicionados lado a lado. Os dados do escoamento foram avaliados com a visualização, anemometria de fio quente e PIV (Particle Image Velocimetry) para espaçamentos $1 < p/d < 6$ em escoamento com $Re = 500$ até $Re = 3000$. Neste estudo os autores não encontraram biestabilidade, somente as características de um corpo, assimetria e corpos distintos dependendo do espaçamento entre cilindros. O não aparecimento do comportamento biestável foi vinculado com a razão de bloqueio, a razão de aspecto ou pequenos desalinhamentos entre os cilindros.

Endres e Möller, 2001, apresentaram um estudo experimental que mostrou a análise do comportamento da pressão e da velocidade no entorno de um cilindro posicionado em um banco de tubos. Foram avaliados casos com arranjo retangular e triangular com $p/d = 1,6$, $1,26$, $1,16$ e $1,05$. Os autores verificaram que os valores RMS das flutuações de pressões se

equivalem para os dois arranjos, sendo influenciados pelo p/d e a redução da razão de espaçamento tende a criar distribuições uniformes das flutuações de pressão na parede do cilindro. Os resultados dos espectros de potência com dados de pressão mostraram que para os arranjos retangulares o mesmo padrão de decaimento de energia é encontrado, enquanto no arranjo triangular cada p/d apresenta um padrão diferente de decaimento.

Alam et al., 2003, mostraram as características aerodinâmicas experimentais de um escoamento com dois cilindros posicionados lado a lado em um escoamento uniforme com $Re = 5,5 \times 10^4$ e razões de espaçamento $1,1 < p/d < 2,2$. O foco do estudo foi determinar as características das forças de arrasto e sustentação sobre os cilindros, frequências de esteira e fenômeno de troca biestável. No regime de escoamento biestável um terceiro modo de escoamento estável foi identificado, no qual o escoamento de espaçamento é orientado paralelamente ao escoamento principal e o número de St próximo ao obtido em um único cilindro. As forças de sustentação e de arrasto sofreram alteração de patamares durante as trocas biestáveis, sendo o coeficiente de arrasto maior no cilindro com esteira estreita e a força de sustentação menor.

Wang e Zhou, 2005, realizaram um estudo dos motivos que levam a inclinação do escoamento da fenda e citam três possíveis causas. A primeira é devido à proximidade dos dois cilindros e a forte interação entre os vórtices, que influenciam na deflexão do escoamento da fenda. A segunda razão relatada é a elevada quantidade de movimento, sendo que a base de pressão atrás do cilindro para onde o escoamento da fenda é defletido possui valores mais baixos que do outro cilindro. A terceira relação é que o desprendimento de vórtices do cilindro com esteira estreita é caracterizado por alta frequência e pouca força.

Olinto et al., 2006, estudaram o fenômeno da biestabilidade em dois tubos lado a lado e em um banco de tubos com arranjo retangular. Os autores apresentaram os espectros de potência obtidos da velocidade para avaliação do fenômeno e encontraram apenas uma frequência nas esteiras dos dois cilindros. No banco de tubos foi estudado o comportamento sobre o tubo central e pôde ser observado o fenômeno de troca na amostragem transiente apresentada. A análise de ondaletas para caracterização de cada modo de biestabilidade foi aplicada e apresentada para diferentes faixas de energia em cada modo de esteira.

Alam e Zhou, 2007, apresentaram uma investigação experimental na estrutura de escoamento com o C_L utilizando dois cilindros alternando o espaçamento $p/d = 1,1, 1,13$ e $1,2$, para entender a física por traz destes espaçamentos. Os autores aplicaram distribuições de

pressão e o escoamento nas superfícies dos cilindros são medidas usando um transdutor de pressão e a técnica de visualização superfície do cilindro com óleo é empregada. Aplicando as avaliações os autores encontraram que duas estruturas de escoamento distintas ocorrem em $p/d = 1,1$ e $1,2$ e que o C_L apresenta uma mudança repentina. O escoamento de espaçamento em $p/d = 1,1$ é altamente biestável, formando uma região de separação bem evidente nos dados. Em $p/d = 1,2$ a região de separação é bem menor. Para o caso de $p/d = 1,13$ existem dois tipos de mudanças descontínuas na estrutura do escoamento: uma é similar aos resultados para espaçamento $p/d = 1,1$ e a outra aos resultados para $p/d = 1,2$, apresentando assim 4 modos de biestabilidade para C_L .

De Paula, 2008, descreveu um estudo experimental acerca do fenômeno da biestabilidade em bancos de tubos de arranjo triangular submetidos a escoamento cruzado turbulento. Foram abordados os escoamentos sobre dois tubos dispostos lado a lado, três tubos e bancos de tubos que variaram de uma a cinco fileiras com arranjo triangular e em todos os casos aplica $p/d = 1,26$ e $1,6$. As medições das flutuações de velocidade em canal aerodinâmico utilizaram a técnica de anemometria de fio quente e apresentaram a visualização do escoamento. O autor identificou o fenômeno da biestabilidade para dois tubos dispostos lado a lado, para três tubos em arranjo triangular e para duas fileiras de tubos.

Olinto et al., 2009, apresentaram um estudo sobre as instabilidades em um banco de tubos com arranjo retangular e $p/d = 1,26$, $1,4$ e $1,6$. Os autores coletaram a velocidade e suas flutuações com anemometria de fio quente e relacionaram com o ângulo do escoamento na fenda, o estudo também apresentou a visualização do escoamento em canal de água. As análises com decomposições de sinais em diferentes bandas de frequência mostraram o fenômeno da biestabilidade. Os autores observaram na análise que na parte superior do banco de tubos a esteira larga ocorre sobre um tubo enquanto na parte inferior o mesmo tubo apresenta esteira estreita. Outro detalhe encontrado no estudo é que uma vez assimétrico, o escoamento não faz trocas de modos nas esteiras a não ser que o escoamento seja parado e reiniciado. No mesmo ano, o estudo numérico e experimental do escoamento sobre quatro cilindros em arranjo retangular foi apresentado por Lam e Zou, 2009, no qual utilizaram dados experimentais com DPIV e LDA e compararam com os resultados da simulação numérica em LES. Para casos experimentais com $p/d = 1,5$, $2,5$, $3,5$ e 5 e numéricos para $p/d=1,5$ e $3,5$ com $Re = 11000$, $Re = 15000$ e $Re = 20000$. Os resultados mostraram boa relação nas comparações e o comportamento biestável foi verificado na segunda fileira de tubos.

Gao et al., 2010, executaram uma análise experimental com escoamento sobre cilindros com diferentes diâmetros posicionados lado a lado utilizando PIV. Um cilindro com 8 mm e o outro com 12 mm, foram posicionados em um canal com água, nos quais são testados valores de $Re = 1200$ até $Re = 4800$. O fenômeno biestável foi verificado e os autores concluíram que quando a velocidade atingiu um valor limite, o estado de equilíbrio foi destruído. Desta forma o fenômeno de mudança de direção do escoamento da fenda ocorre, a energia turbulenta é redistribuída e um novo estado de equilíbrio acontece. Os autores salientaram que as características dos vórtices para $Re = 1200$ são diferentes daquelas para $Re = 2400$ e $Re = 4800$, sendo que o comprimento formação de vórtices diminui com o aumento do número de Reynolds.

Sumner, 2010, executou uma revisão bibliográfica para escoamento sobre dois cilindros infinitos de igual diâmetro imersos em regime permanente para as configurações lado a lado, alinhados e inclinados. Na sua análise o autor abordou os padrões de esteira, efeitos do número de Reynolds, comportamento e estrutura de esteiras intermediárias, os efeitos das forças de arrasto, sustentação e os números de Strouhal. O estudo contemplou diversas razões de espaçamento entre os cilindros, sendo que para cada caso o autor mostra as características de interesse. No estudo do autor o mesmo não encontrou biestabilidade, apenas o comportamento assimétrico da esteira e acreditou ser influência do aparato experimental utilizado.

Alam et al., 2011, executaram um estudo do escoamento sobre corpos quadrados, variando o p/d entre 1,02 e 6. A análise experimental foi executada em $Re = 4,7 \times 10^4$ aplicando anemometria de fio quente, PIV, célula de carga e visualização com laser fluorescente. O estudo analisou as forças de arrasto e sustentação para os vários p/d , além de verificar o comportamento das esteiras, números de Strouhal e a comparação com os valores obtidos na literatura para dois cilindros lado a lado nas mesmas configurações. Os autores encontraram algumas diferenças nos resultados dos corpos quadrados em relação aos redondos, como a abrangência da relação de espaçamento onde ocorre comportamento assimétrico, sendo que para corpos quadrados ocorre para $1 < p/d < 3$. Outro ponto de grande divergência foi à força de sustentação ser repulsiva para cilindros e atrativa para corpos quadrados. No mesmo ano Afgan et al., 2011, estudaram numericamente o escoamento em torno de cilindro simples e também dois cilindros posicionado lado a lado. Os casos foram resolvidos utilizando LES, com constante de Smagorinsky dinâmica. Os cilindros lado a lado

foram testados para p/d entre 1 e 5 com $Re = 3000$. Para razões de espaçamento intermediárias, múltiplas frequências de desprendimento foram detectadas com um escoamento de fenda defletido. Este comportamento foi consistente comparadas com medições, assim como as relações de força de arrasto e força de sustentação.

De Paula et al., 2012, descreveram o estudo experimental efetuado por medições com anemômetro de fio quente em canal aerodinâmico e visualizações de escoamento em canal de água. O banco de tubos testado teve razões de espaçamento de 1,26 e 1,6, e $Re = 7,5 \times 10^3$ e $Re = 4,4 \times 10^4$. Os resultados mostraram estabilidade padrão na esteira depois da primeira fileira de cilindros e as visualizações mostraram que o escoamento que surge do espaçamento entre os cilindros forma jatos coalescentes. Depois de duas fileiras de tubos o escoamento apresenta uma componente vertical transversal. Para $p/d = 1,26$, a direção do escoamento mudou em intervalos irregulares. Para $p/d = 1,6$, a esteira padrão foi estável. As características do escoamento turbulento pela terceira, quarta e quinta colunas de tubos parecem similares, onde o espaçamento apresentou uma rápida troca de um lado para outro.

De Paula e Möller, 2013, apresentaram um estudo experimental do fenômeno de biestabilidade em um escoamento turbulento sobre dois tubos posicionados lado a lado. As séries temporais da velocidade axial e transversal, obtidas com a técnica de anemometria de fio quente em um canal aerodinâmico, foram aplicadas em um modelo de mistura finita, para classificar os dados observados de acordo com a família de função de densidade probabilidade. Apesar do fenômeno da turbulência ser tridimensional a visualização de escoamento mostrou um escoamento predominantemente bidimensional.

De Paula, 2013, mostrou um estudo acerca dos principais parâmetros que caracterizam o fenômeno da biestabilidade em dois tubos dispostos lado a lado submetidos a escoamento cruzado turbulento. A técnica experimental da anemometria de fio quente em canal aerodinâmico foi aplicada na medição das flutuações de velocidade do escoamento após os tubos. As séries temporais obtidas foram utilizadas como dados de entrada para determinação das funções densidade de probabilidade usando um modelo de mistura finita, de acordo com uma função t de *Student* assimétrica e com o auxílio do método de Monte Carlo. Transformadas de ondaletas discretas e contínuas são aplicadas na filtragem das séries temporais para determinadas bandas de frequências e na análise do conteúdo de energia destes sinais. Através de conceitos de sistemas caóticos, foi realizada a reconstrução do atrator do problema pelo método dos atrasos temporais, a partir das séries experimentais de velocidade.

Os resultados mostraram a existência de dois patamares distintos de velocidade média nas séries temporais, correspondentes aos dois modos do escoamento, cada qual com números de Strouhal e funções densidade de probabilidades distintas. Reconstruções da trajetória filtrada das séries temporais para determinadas bandas de frequências apresentaram características caótico-determinísticas.

Alam e Zhou, 2013, estudaram as estruturas intrínsecas do escoamento sobre corpos quadrados posicionados lado a lado investigando diversos dos comportamentos, como a troca de modos, o comportamento assimétrico das esteiras, estabilidades, os vórtices da fenda e a imersão de duas esteiras em uma. A análise experimental utilizou visualização com $Re = 300$ e anemometria de fio quente para $Re = 4,7 \times 10^4$. Na análise dos autores sobre a evolução da esteira após os corpos, os mesmos encontraram uma correlação polinomial para $p/d > 1,2$, com a qual se calculou a dependência entre p/d e a distância crítica após o escoamento onde as esteiras transformaram-se apenas em uma. O escoamento inclinado foi vinculado a dois vórtices de sinais opostos que agem como gêmeos e tenderam a mover-se juntos gerando uma região de baixa pressão devido ao mesmo sinal e assim as velocidades altas entre os vórtices agem para mantê-los juntos. O mecanismo que torna duas esteiras em uma é descrito como uma interação dos vórtices gêmeos com os vórtices da corrente livre lateral. Quanto à troca de modos das esteiras e também a mudança do comportamento em fase e anti-fase em duas esteiras, são vinculados à mudança de deslocamento de fase entre os dois vórtices gêmeos da fenda e isto dispara a troca.

Oruç et al., 2013, executaram um estudo experimental com visualizações de tinta e PIV em canal de água considerando águas rasas, onde os autores adicionaram uma placa entre os dois cilindros com diversos comprimentos e constataram que a assimetria deixou de existir ao empregar placas com relação $L/d > 3$ e que nos casos com valores menores que isto, a assimetria persistiu. Nas avaliações com placa $L = d$ e $L = 2d$ as esteiras continuaram com assimetria, pois estas configurações ainda permitiram a interação entre os vórtices. A partir da placa com $L = 3D$ ocorreu simetria nas esteiras, pois as interações entre as esteiras aconteceram quando os vórtices já estão em dissipação.

Keogh; Meskell, 2015, descreveram a análise experimental efetuada sobre bancos de tubos com arranjo triangular e espaçamento $p/d = 1,375$. A análise levou em conta os dados de pressão obtidos na parede da seção de testes e de dois cilindros instrumentados com diversas tomadas de pressão, além disto, utilizam PIV para captura de imagens do

escoamento. O estudo abrangeu $Re = 0,63 \times 10^4$ até $Re = 1,27 \times 10^4$. Os autores verificaram que em certos escoamentos os sinais de pressão de cada cilindro instrumentado apresentaram alta correlação, eles também concluíram que em certas velocidades o comportamento da pressão mudou, resultando na ocorrência de um escoamento biestável pelo banco de tubos e opera em um arranjo tridimensional que mudou com o modo do campo do escoamento.

Neumeister, 2015, apresentou um estudo sobre o fenômeno de biestabilidade em escoamentos transversais turbulentos sobre dois cilindros lisos paralelos, com razão de espaçamento, p/d , de 1,26, utilizando abordagem numérica e experimental. As análises compararam escoamentos turbulentos com números de Reynolds subcríticos, variando entre $Re = 17000$ e $Re = 26000$. Nas avaliações experimentais utilizaram-se velocidades médias e flutuações de velocidade, adquiridas com a técnica de anemometria de fio quente, exploram-se também dados de flutuações de pressão obtidos com microfones condensadores posicionados na parede do canal aerodinâmico. Para comparação experimental e numérica executam-se leituras de pressões estáticas ao longo do canal aerodinâmico. Nos resultados numérico e experimental observaram-se a presença da biestabilidade e comportamento não simultâneo da mesma ao longo dos cilindros.

No presente trabalho, avaliações do comportamento biestável nos resultados experimentais são executadas, com o intuito de melhor entender os mecanismos de geração do fenômeno na região da esteira. Os comparativos são feitos com dados de velocidade, valores de flutuação de pressão e linhas de corrente sobre os cilindros em escoamentos com números de Reynolds que variam entre 8980 e 27635. As avaliações foram executadas aplicando duas abordagens, uma com tubos fixos e outra com um grau de liberdade, e estas comparadas com a literatura. Nas avaliações dos resultados utilizaram-se abordagens estatísticas como análise por transformada de Fourier e transformada de ondaletas. Serão realizadas medições de flutuações das forças de arrasto e momento de rolamento no canal aerodinâmico com o uso da célula de carga. A técnica de visualização por filmagem será empregada.

3 FUNDAMENTOS

O escoamento incompressível, seja laminar ou turbulento, é governado pelas equações de Navier-Stokes, porém a solução exata destas equações só é possível para escoamentos laminares ou com baixos valores de Re . As equações governantes do escoamento são a equação da conservação de massa, Equação (3.1) e a equação da quantidade de movimento, Equação (3.2), apresentadas em notação indicial.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.2)$$

Além da solução das Equações de Navier-Stokes que utilizam variações de velocidade, a aplicação da equação do campo de pressão também é muito utilizada na caracterização dos escoamentos e entendimento dos processos dinâmicos, sendo definida pela equação de Poisson indicada em Silvestrini e Möller, 2004:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

Para as análises experimentais de escoamentos turbulentos e algumas abordagens numéricas como o RANS aplica-se a decomposição de Reynolds, conforme descrito em Tennekes e Lumley, 1972, como abordagem de solução, onde considera-se que toda a variável é formada por uma componente média e uma componente de flutuação:

$$g(t) = \bar{g} + g'(t) \quad (3.4)$$

onde g é uma variável genérica do escoamento turbulento, \bar{g} o valor médio no tempo e g' a flutuação em relação ao valor médio. Ao aplicar a decomposição de Reynolds nas equações de balanço de massa e quantidade de movimento chega-se a:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (3.6)$$

A aplicação da decomposição de Reynolds gera um novo termo, $-\overline{\rho u'_i u'_j} = T$, que é denominado tensor de Reynolds e é simétrico, gerando um problema de fechamento, pois existem mais incógnitas que equações para solução.

A decomposição de Reynolds também é aplicada à equação de Poisson, Equação (3.3), resultando na equação da flutuação de pressão, apresentada em Silvestrini e Möller, 2004, que é relacionada às flutuações de velocidade em diversos pontos do campo de escoamento:

$$\nabla^2 p' = -2\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial^2 (u'_i u'_j)}{\partial x_i \partial x_j} + \rho \frac{\partial^2 \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3.7)$$

As análises numérica e experimental possuem, no geral, diferentes abordagens, devido ao tratamento numérico e estatístico dos dados, mas em alguns casos a mesma análise é aplicada. A abordagem experimental é estatística, onde utilizam-se os sinais de velocidade, flutuação de pressão. Nas análises de sinais obtidos pelos instrumentos de medição aplicam-se avaliações no domínio tempo, frequência e tempo – frequência. Para todas as avaliações experimentais executa-se a análise de incerteza associada e a mesma é descrita no Apêndice A.

3.1 Domínio do Tempo

Inicialmente aplicam-se às séries a análise de tempo, onde o cálculo da média da série coletada é executado com a Equação (3.8), conforme descrito em Silvestrini e Möller, 2004, e então se aplica a decomposição de Reynolds relacionando a série original de velocidade com a média, Equação (3.9).

$$\bar{u} = \frac{\sum u}{n} \quad (3.8)$$

$$u' = u - \bar{u} \quad (3.9)$$

onde u é a velocidade instantânea da série temporal em m/s, u' é a flutuação de velocidade em m/s e n o número de eventos da amostra de dados.

A análise das quantidades de flutuações é feita considerando que a média é estatisticamente permanente, hipótese de ergodicidade. Espera-se que a média de saída do circuito seja proporcional a uma janela de flutuações assumida, com a qual se define a função densidade probabilidade $B(u')$. Como a função é uma fração de tempo ela é sempre positiva e a soma de todos os valores da função precisa ser 1. Considerando as ondas senoidais a função resulta na expressão para uma função genérica $x(t)$:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x(u')B(u')du' \quad (3.10)$$

Os valores médios de várias potências de u' são chamados de momentos (Tennekes e Lumley, 1972). O primeiro momento é definido como a média temporal das flutuações e é zero. A média quadrática das flutuações de velocidade, σ^2 , é chamada de variância ou segundo momento e é calculado, conforme Equação (3.11). O valor de σ^2 não é afetado pela assimetria na distribuição da função densidade probabilidade e $B(u')$ é escrito como a soma das partes simétricas. A amplitude pode ser obtida aplicando $\sqrt{\sigma^2}$.

$$\sigma^2 = \overline{u'^2} = \int_{-\infty}^{\infty} u'^2 B(u') du' \quad (3.11)$$

O terceiro momento, ao contrário do segundo, depende apenas da parte assimétrica da função, sendo que se $B(u')$ é simétrico $\overline{u'^3} = 0$, é definido de acordo com a Equação (3.12). O terceiro momento torna-se adimensional por σ^3 , gerando um parâmetro de assimetria da função chamado *Skewness* (assimetria), conforme Equação (3.13).

$$\overline{u'^3} = \int_{-\infty}^{\infty} u'^3 B(u') du' \quad (3.12)$$

$$S_k = \frac{\overline{u'^3}}{\sigma^3} \quad (3.13)$$

O quarto momento representa a planicidade da função e é definido conforme Equação (3.14), porém, assim como para o terceiro momento, torna-se o valor adimensional e obtém-se um parâmetro de planicidade chamado *Kurtosis* ou *Flatness* (achatamento). O resultado da Equação (3.15) apresenta um valor alto se a função é espalhada e um valor baixo se a função for concentrada.

$$\overline{u'^4} = \int_{-\infty}^{\infty} u'^4 B(u') du' \quad (3.14)$$

$$K = \frac{\overline{u'^4}}{\sigma^4} \quad (3.15)$$

3.2 Domínio da frequência

Conforme Möller, 2000, a análise de Fourier é uma ferramenta valiosa para o estudo de fenômenos e processos aleatórios e muito aplicada nas análises de escoamentos turbulentos. Para avaliar as séries de dados coletadas, é obtido o espectro de potência de Fourier, que representa a variação do valor quadrático médio da função x com a frequência f , em um período T , para uma banda de frequência B_e , em um tempo t , conforme Equação (3.16).

$$\phi_{xx}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^t x^2(f, t, B_e) dt \quad (3.16)$$

O espectro de potência é obtido usando a transformada rápida de Fourier, onde normalmente é apresentado em escala logarítmica. No estudo estatístico de séries de velocidade aplica-se o mesmo, pois permite verificar em séries ergódicas, a predominância de picos de frequências nos fenômenos do escoamento monitorado.

No espaço de Fourier se define a densidade auto espectral como a transformada de Fourier da função de auto correlação R_{xx} , definida como o valor médio do produto desta função em um tempo, t , com o seu próprio valor a um tempo defasado $t + \tau$. Considerando duas séries genéricas no tempo, x e y , pode-se definir a função de correlação cruzada pela Equação (3.17).

$$R_{xy} = \overline{x(t)y(t+\tau)} \quad (3.17)$$

Os resultados das correlações nem sempre apresentam um grande significado desta forma, pois os valores ficam dependentes da série. Por este motivo utiliza-se a normalização da correlação que é chamado de coeficiente de correlação e fica entre -1 e 1 e possibilita a comparação de dados de forma mais eficiente, sendo que dados 100 % correlatos possuem coeficiente de correlação iguais a 1, se não há correlação o coeficiente é igual a zero e se há correlação negativa existe mudança de fase.

$$C_{xy} = \frac{\overline{x(t)y(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{x^2}}\sqrt{\overline{y^2}}} \quad (3.18)$$

A densidade espectral pode ser obtida por uma função complexa que relaciona correlação, frequência e defasagem descritas na Equação (3.19).

$$\phi_{xy} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (3.19)$$

Para a verificação da qualidade na densidade espectral é necessário que o tempo t da série seja adequado e para isto, utilizam-se dois parâmetros: a largura de banda de frequências, B_e , e o erro médio estatístico na determinação da densidade espectral, E . A largura de banda é obtida com a Equação (3.20). O valor de l é o tamanho do bloco em que será dividida a série de dados, sendo que a mesma deve ser diádica e sobre cada bloco é aplicada uma janela espectral e então a FFT é aplicada em cada bloco.

$$B_e = \frac{f_s}{l} \quad (3.20)$$

Para a obtenção da largura de banda, B_e , utiliza-se a frequência de aquisição escolhida que considera o intervalo de tempo entre a obtenção dos dados, conforme Equação (3.21). Esta frequência precisa ser compatível com o fenômeno em estudo, nos casos em análise aplicam-se as frequências de aquisição de 1 e 3 kHz.

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (3.21)$$

Outra consideração importante é a frequência de corte, que consiste na filtragem de frequência passa baixa, para evitar o dobramento das frequências no espectro e a avaliação equivocada dos resultados. A frequência de corte teórica, chamada de Nyquist, é a metade da frequência de aquisição de dados, mas como a ação do filtro não é de corte total utiliza-se a relação 1/3 da f_{s2} .

$$f_c = \frac{1}{3} f_s \quad (3.22)$$

Na aplicação da transformada rápida de Fourier existe uma relação entre a largura de banda e o tamanho da série que determina o erro médio estatístico do espectro e é representado pela Equação (3.23).

$$E = (B_e t)^{-1/2} \quad (3.23)$$

3.3 Modelagem matemática para caracterização do escoamento

As medições de velocidade de corrente livre no canal aerodinâmico são executadas com o tubo de Pitot ligado ao manômetro eletrônico e este ao multímetro de bancada, conforme descrito na seção 4.1. A partir da pressão dinâmica obtida com o manômetro calcula-se a velocidade média da corrente livre.

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad (3.24)$$

sendo \bar{u} a velocidade média da corrente livre em m/s, P_d a pressão dinâmica em Pa e ρ a massa específica do ar em kg/m³.

A massa específica do ar é obtida a partir da pressão e temperatura medidas durante a aquisição de dados, utilizando a equação dos gases ideais.

$$\rho = \frac{P}{R_{ar} T_{ar}} \quad (3.25)$$

com P a pressão atmosférica em Pa, R_{ar} a constante específica do ar em J/kg.K e T_{ar} a temperatura em K.

Depois da conversão dos dados de tensão coletados com as sondas para velocidades utilizando os resultados da calibração, procedimento indicado no Apêndice B, aplicam-se as análises estatísticas para verificar as características do escoamento. As séries utilizadas em todas as avaliações estatísticas são diádicas.

Para entendimento das condições de contorno do canal aerodinâmico obtém-se o perfil de intensidade turbulenta na entrada da seção de testes, aplicando a Equação (3.26), onde considera-se o comportamento isotrópico das flutuações de velocidade.

$$IT = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad (3.26)$$

O comprimento característico, L , é obtido pela Equação (3.27), onde a frequência f utilizada é a do pico com maior energia, obtida pela transformada rápida de Fourier aplicada ao sinal de velocidade.

$$L = \frac{\bar{u}}{2\pi f} \quad (3.27)$$

A viscosidade cinemática é definida pela Equação (3.28), determinada aplicando-se os valores de massa específica encontrados com as Equação (3.25) e a viscosidade dinâmica do ar, μ , na temperatura medida durante a aquisição de dados.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.28)$$

A caracterização do escoamento é baseado no número de Reynolds, Re , que permite a comparação com dados da literatura.

$$Re = \frac{\bar{u}d}{\nu} \quad (3.29)$$

com d equivalente ao diâmetro de um dos cilindros em m.

O número de Strouhal, St , é um parâmetro importante relacionado ao desprendimento de vórtices, muito utilizado se tratando de escoamento sobre cilindros e é definido por:

$$St = \frac{fd}{u} \quad (3.30)$$

onde f é a frequência de desprendimento predominante encontrada no espectro de potência.

A razão de bloqueio é obtida com

$$r = \frac{2da}{A} \quad (3.31)$$

sendo d diâmetro do cilindro em m, a altura do cilindro imerso no escoamento em m e A a área transversal do canal aerodinâmico (143x196mm).

3.4 Domínio Tempo – Frequência

Os escoamentos com fenômeno biestável não conseguem ser totalmente caracterizados usando o domínio de frequências de Fourier, pois não há informação de quando as frequências estão ocorrendo. Também não é possível caracterizar o fenômeno somente com o domínio de tempo, pois se extrai os momentos, médias e flutuações que não fornecem informações relevantes sobre o acontecimento do fenômeno, somente indicando instantes de trocas. Além disso, fenômenos biestáveis são intrinsecamente não estacionários, logo a hipótese de ergodicidade não se aplica, tornando a análise de Fourier inexata e as aplicações limitadas a um dos modos do processo biestável.

Por este motivo alguns estudos, como Alam et al., 2003, e Indrusiak, 2004, apresentam a utilização de funções com ondaletas, que permitem a análise no domínio tempo – frequência. Mostrando características de frequências em um momento específico da série, permitindo análises do motivo do acontecimento de um fenômeno. Uma função ondaleta, ψ precisa possuir suporte efetivo limitado a um intervalo finito e precisa que a soma dos valores positivos e negativos retorne zero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(t) dt = 1 \quad (3.32)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.33)$$

A base da função é gerada por dilatações e translações dadas por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a > 0 \quad (3.34)$$

onde a é o coeficiente de escala e b o coeficiente de posição da ondaleta. A função de escala é associada à ondaleta e satisfaz a seguinte propriedade:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (3.35)$$

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

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a > 0 \quad (3.36)$$

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

Diversas funções ondaletas estão disponíveis e dependem da aplicação para a seleção. Para as análises com dados de flutuação de pressão obtidas da turbulência gerada por cilindros posicionados lado a lado, são empregadas transformadas contínuas e discretas aplicando Daubechies 20 (Db 20), pois em estudos prévios apresentados por Indrusiak, 2004,

Indrusiak et al., 2005 e de Paula, 2008, a mesma foi aplicada com dados de velocidade obtidos em condições similares, gerando bons resultados.

A transformada contínua de ondaletas é representada pela convolução linear do sinal pela ondaleta de base e o espectro de ondaletas é definido como o módulo desta convolução ao quadrado. No espectro de ondaletas, a energia está relacionada a cada tempo e escala, sendo que o termo espectrograma é devido à característica da transformada de ondaletas de permitir a representação da distribuição da energia de sinais transientes sobre os domínios do tempo e da frequência. A transformada contínua de ondaleta e a transformada inversa estão descritas nas Equações (3.37) e Equação (3.38)(de Paula, 2008).

$$Wx(a, b) = \int x(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (3.37)$$

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int \int Wx(a, b)\psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2} \quad (3.38)$$

O espectro de ondaleta contínua é definido por:

$$P_{xx}(a, b) = |Wx(a, b)|^2 \quad (3.39)$$

A transformada discreta de ondaleta é uma subamostragem elaborada da transformada contínua de ondaletas em escalas diádicas. A definição de espectro discreto de ondaletas é dada pelo módulo da transformada discreta de ondaletas ao quadrado, porém, o número de níveis de transformações que pode ser calculado é limitado pelo número de pontos da série temporal. A transformada discreta de ondaletas é dada por:

$$D(m, j) = \sum_t x(t)\psi_{m,j}(t) \quad (3.40)$$

e a transformada inversa é:

$$x(t) = \sum_m \sum_j D(m, j) \psi_{m,j}(t) \quad (3.41)$$

onde os coeficientes de posição (m, j) e escala são díádicos e subamostras de (a, b) .

Aplicando $a = 2^m$ e $b = j2^m$ os ajustes das funções de ondaletas são:

$$\psi_{m,j}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - j), \quad m, j \in \mathbb{N} \quad (3.42)$$

O espectro de ondaletas discretas é:

$$P_{xx}(m, j) = |D(m, j)|^2 \quad (3.43)$$

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Técnica experimental

O estudo experimental aplicado neste trabalho consiste em medir a velocidade média e as flutuações de velocidade do ar ao passar pelo banco de tubos, através da técnica de anemometria de fio quente em um canal aerodinâmico. Assim, são obtidas séries temporais de velocidade que, com o auxílio das ferramentas matemáticas supracitadas possibilitam uma análise quantitativa dos resultados.

Também foi realizado um estudo qualitativo do fenômeno da biestabilidade através da avaliação da força com o uso de uma célula de carga. A seguir, estas duas técnicas são descritas em maiores detalhes.

E por último, a visualização por filmagem foi utilizada para avaliar a característica de movimentação dos dois tubos quando livres para rotacionar em um eixo central aos dois. O objetivo desta técnica é relacionar o movimento com o fenômeno biestável.

4.1.1 Canal aerodinâmico

O estudo experimental foi executado em um dos canais aerodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LMF, o desenho do canal aerodinâmico utilizado com seus respectivos componentes está representado na Figura 4.1. O mesmo é composto por um ventilador centrífugo Gema com 1 HP de potência seguido por um homogeneizador tipo grade com 30 divisões de dimensões 31 x 28 mm (B). Na sequência uma colmeia (C) com um espaçamento médio de 6 mm de diâmetro e seguida por duas telas (D) com 0,001m de espaçamento interno cada. A seção do canal aerodinâmico é composta por chapas de acrílico com 10 mm de espessura e montadas em formato retangular resultando uma seção transversal com 146 x 193 mm, podendo variar apenas o comprimento da seção de testes (E) para o experimento.

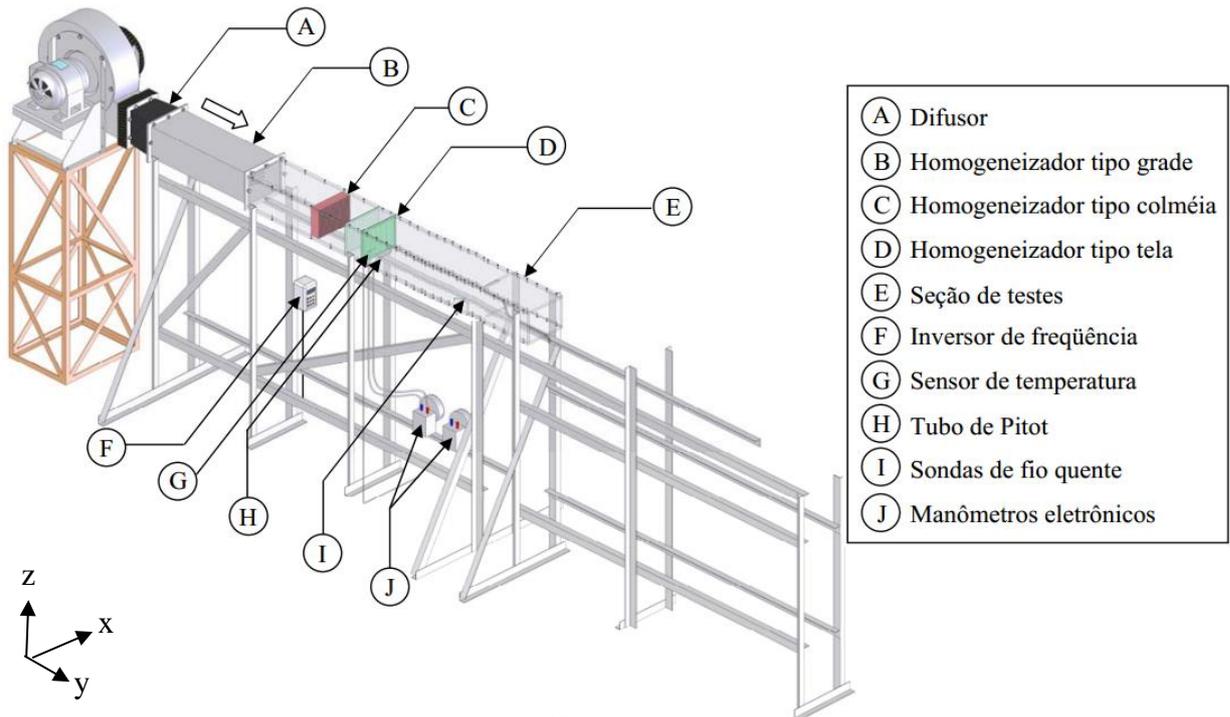


Figura 4.1 – Esquema do canal aerodinâmico utilizado nos experimentos, adaptado de Paula, 2008.

O ventilador é controlado por um inversor de frequência (F) que permite a experimentação com velocidades médias entre 0 e 16,7 m/s, variando a frequência de trabalho do mesmo. A leitura da velocidade de corrente livre é feita com um tubo de Pitot (H), posicionado conforme indicado na Figura 4.1, onde as tomadas de pressão estática e dinâmica estão posicionadas na mesma cota de altura. As tomadas de pressão estão ligadas a um manômetro eletrônico que é conectado ao multímetro e indica as leituras em corrente elétrica que são transformadas em pressão dinâmica pela Equação (4.1). A corrente elétrica gerada pelo transdutor de pressão do manômetro possui valor 4 mA para velocidade zero.

$$P_d = 25I - 100 \quad (4.1)$$

onde P_d é a pressão dinâmica no tubo de Pitot em Pa e I é a corrente elétrica lida do transdutor de pressão em mA.

Depois das telas de homogeneização instala-se a seção de testes com os dois cilindros de 25,1 mm lado a lado e, para este caso, utiliza-se o comprimento da seção de 900 mm, conforme apresentado na Figura 4.2. A razão de bloqueio, calculada pela Equação (2.31) apresentada com os cilindros posicionados no interior do canal aerodinâmico é de 26,5% e as incertezas das medições estão descritas no Apêndice A.

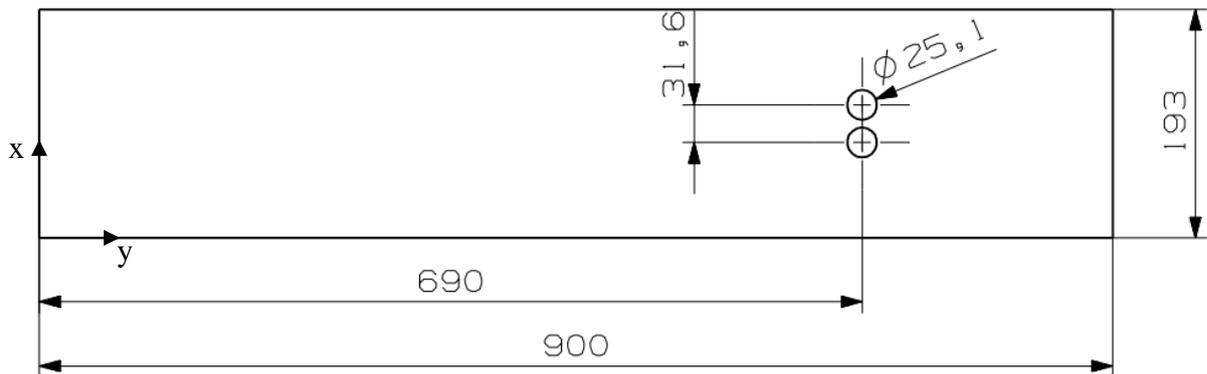


Figura 4.2 – Posicionamento dos tubos na seção de testes experimental.

4.1.2 Anemometria de Fio quente

A anemometria de fio quente é aplicada na medição de velocidades em escoamentos turbulentos em gases. O princípio de funcionamento é baseado no efeito de resfriamento de um escoamento sobre um fio aquecido, ou seja, é possível estabelecer uma relação entre a velocidade do fluido e a taxa de transferência de calor no fio.

Segundo Freire et al., 2002, a anemometria de fio quente é um sistema apropriado para o estudo da turbulência, pois o sistema de medição possui uma resposta em frequência muito alta e precisa, e é apto à medições locais. O elemento sensível de uma sonda de fio quente é um fio de tungstênio e existem sensores com 1, 2 ou 3 elementos sensíveis, sendo que cada fio pode medir uma componente de velocidade num plano com posição perpendicular à ele. Nas medições executadas no presente estudo são aplicadas sondas com um elemento sensível de fio reto modelo DANTEC 55P11.

O equipamento utilizado nas medições é o DANTEC StreamLine 90N10 Frame que opera com o sistema de temperatura constante. Nesse princípio, a alimentação da ponte de

Wheatstone depende do amplificador de saída, que faz com que a inércia térmica do elemento sensível é ajustada conforme a variação do escoamento. Quando a velocidade do escoamento muda, a temperatura e a resistência do fio mudam e uma tensão de equilíbrio na ponte precisa ser aplicada no amplificador, desta forma a corrente é ajustada de forma a restaurar a resistência inicial. A variação de tensão ocasionada na ponte é monitorada e de posse dos valores da calibração é possível indicar a velocidade do escoamento naquele instante.

O esquema de funcionamento do sistema de aquisição de dados na anemometria de fio quente é apresentado na Figura 4.3. Nela se observa que a sonda, o suporte e o cabo são um conjunto ligado ao equipamento DANTEC que contém a ponte de Wheatstone e faz a leitura das variações de tensão. O sinal monitorado é, então, restrito com filtro passa baixa e passa alta, de acordo com a frequência de aquisição escolhida, e com ganho e *offset* para melhor adequação aos limites de abrangência da placa de aquisição de dados. O sinal então é enviado para a placa de conversão analógica digital de 16 bits, modelo NI USB-9162 com quatro canais, e gravado com o programa DANTEC *Streamware*, Versão 3.4, em arquivos de texto para posterior análise.

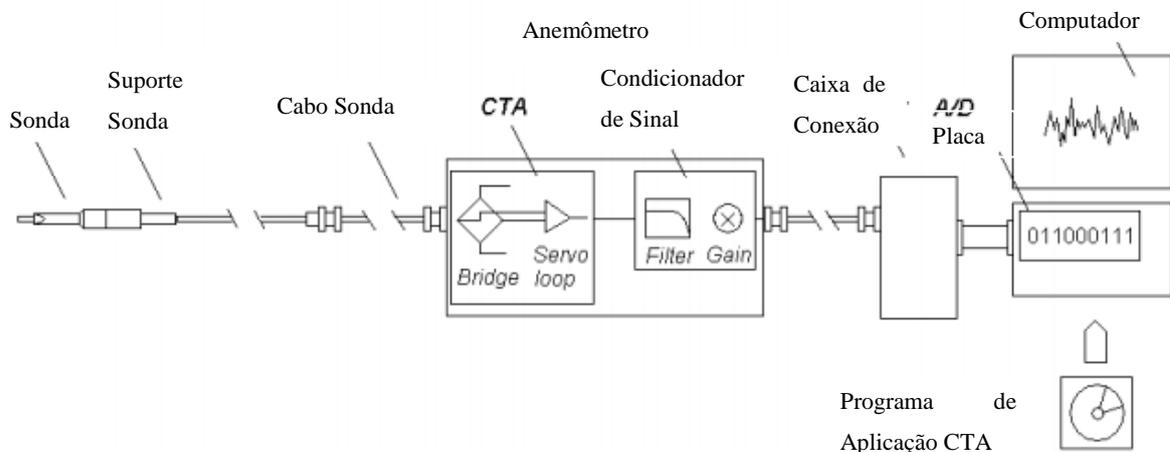


Figura 4.3 – Esquema do sistema de aquisição de dados por anemometria de fio quente, adaptado de Dantec, 2004.

Este sistema de medição é muito sensível à temperatura do escoamento e ambiente, por este motivo é necessário executar a calibração da sonda antes de cada medição. A curva de calibração de um anemômetro de fio-quente é obtida através da medição de uma

velocidade de referência e da tensão fornecida pelo anemômetro. Procura-se uma tensão calculada que ajuste uma função aos pares de pontos de tensão e velocidade medidos. De posse da calibração, é necessário transformar os valores de tensão em velocidade utilizando relações obtidas pelos dados da calibração e descritos detalhadamente no Apêndice B.

As sondas e suportes usados na anemometria de fio quente são posicionadas utilizando os dispositivos apresentados na Figura 4.4 com o posicionador das sondas da Figura 4.4 (a), fixado em uma régua de movimento vertical, Figura 4.4 (b), que está montada em um carro de movimento x e y , Figura 4.4 (c). A leitura das posições das sondas é efetuada com paquímetro, usando como pontos de referência as paredes do canal aerodinâmico e dos cilindros posicionados no interior das seções de teste.

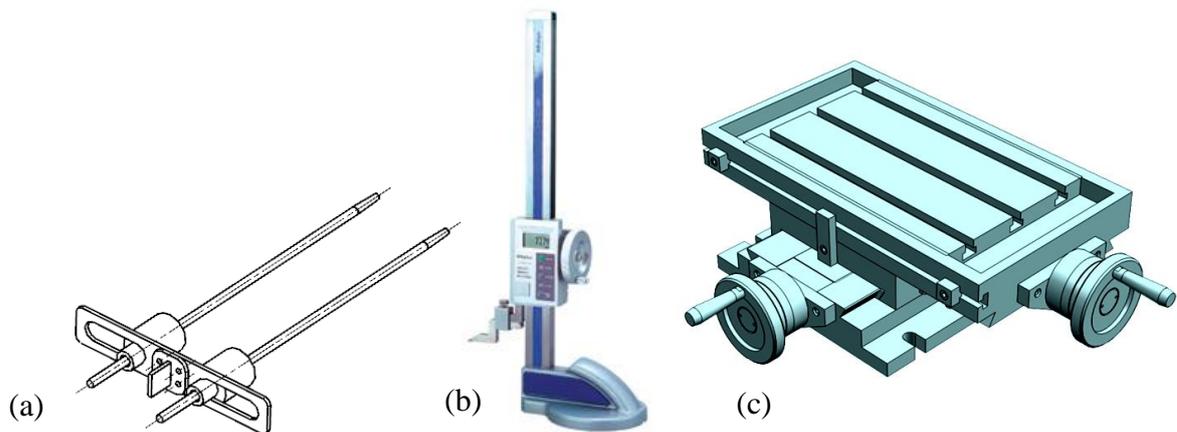


Figura 4.4 – Conjunto de posicionador para as sondas de fio quente a) posicionador do suporte da sonda de fio quente, b) movimentação em z (Traverstool, 2015) e c) mesa x e y (Bazus, 2015).

O conjunto montado apresentando as sondas posicionadas está na Figura 4.5, sendo que a montagem pode ser para sondas alinhadas na vertical, Figura 4.5 (a), ou na horizontal, Figura 4.5 (b). O conjunto também é utilizado nas medições com apenas uma sonda de fio quente por vez.

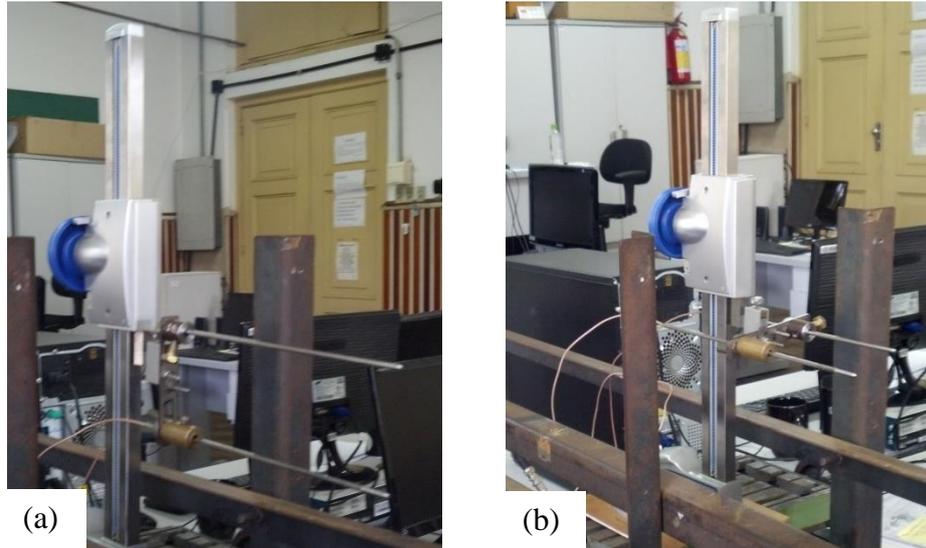


Figura 4.5 – Suporte de posicionamento de duas sondas simultaneamente na posição a) Vertical e b) Horizontal (Neumeister, 2015).

4.1.3 Base de fixação e articulação dos tubos

Para o desenvolvimento dos procedimentos experimentais, construiu-se uma base que posiciona os tubos paralelamente. Sua articulação é por mancais de rolamento fixados junto às placas inferior e superior do túnel de vento, o que permite seu movimento de rotação ao longo de um eixo equidistante a ambos os cilindros. A Figura 4.6 apresenta o desenho da base. A Figura 4.7 apresenta uma vista explodida de todos os componentes utilizados para a montagem dos tubos na bancada de medições.

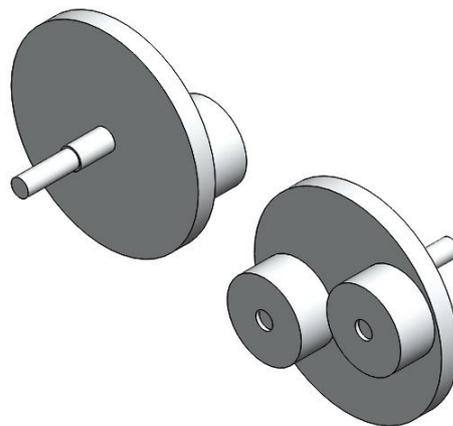


Figura 4.6– Suportes de fixação e articulação dos tubos.

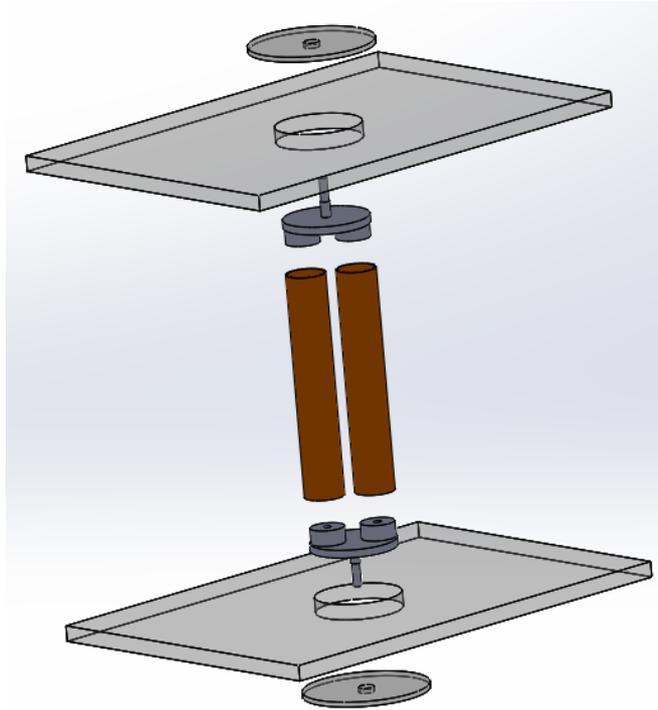


Figura 4.7– Esquema para articulação do experimento.

4.1.4 Célula de carga

Como o experimento trata-se de um fenômeno dinâmico e de determinação analítica complexa, inicialmente acoplou-se ao eixo de rotação um torquímetro estático marca Lutron modelo TQ-8880 com uma amplitude máxima de medição de 147.1 N.cm para avaliar a magnitude desenvolvida pelo experimento. Nestas medições, obteve-se o registro máximo de 1 N.mm que era exatamente a resolução mínima do instrumento. Com esta medição concluiu-se que a amplitude máxima de medição do torque para o experimento deveria ser 1 N.mm. Analisou-se então algumas alternativas de solução para medição de forças para essas magnitudes e como forma de explorar valores intermediários optou-se por instrumentar uma célula de carga com *strain gages* fixada ao eixo de rotação, o que permitiria a medição da deformação dos esforços e consequentes tensões e forças mecânicas. Assim a força máxima desenvolvida pelos cilindros submetidos ao escoamento foi calculada pela seguinte equação.

$$F_{\max} = \frac{T}{r} \quad (4.2)$$

onde F_{\max} é a força tangencial máxima (N), T é o torque estático medido (N.mm) e r é o raio do eixo de rotação (mm).

Com o valor obtido na Equação 4.2 determinou-se a força máxima a qual seria submetida à célula de carga que receberia os sensores com uma alavanca de comprimento estabelecido de 25mm. Para fins de calibração da lâmina (elemento mola do sistema) determinou-se através da primeira lei de Newton a massa que seria necessária para tal através da Equação 4.3.

$$m = \frac{F_{\max}}{g} \quad (4.3)$$

onde m é a massa para calibração (kg) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Para a montagem da balança, foi construído um acoplamento ao eixo e um engaste a estrutura do túnel de vento, entre as extremidades destas duas estruturas foi fixado uma lâmina que sofre a deformação, funcionando como elemento mola do sistema.

Com a utilização de uma simulação para a análise das deformações, foi identificado as áreas na lâmina que sofrem as maiores deformações mecânicas, sendo estas posições utilizadas para a colagem dos extensômetros. Optou-se por ponte completa para que o sistema tivesse maior sensibilidade e requerendo assim menores ganhos nas etapas de condicionamento do sinal. Além de eliminar diferença de resposta a variação de temperatura entre componentes da ponte. A Figura 4.8 esquematiza a ligação e posicionamento dos extensômetros.

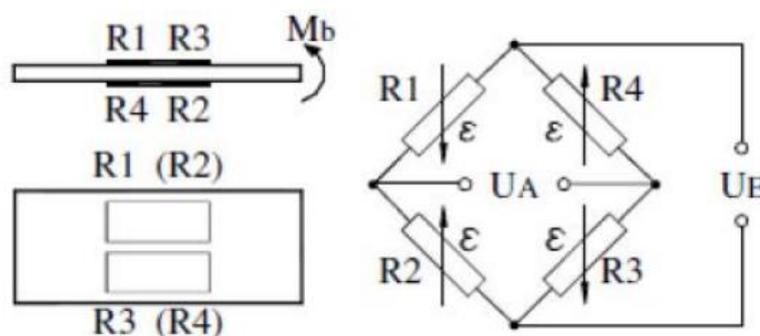


Figura 4.8 – Posicionamento e ligação dos extensômetros (Balbinot e Brussamarello, 2011).

A calibração da célula de carga e o condicionamento de sinal são apresentados no Apêndice C. A Figura 4.9 apresenta a bancada e a montagem do sistema de medições da célula de carga.



Figura 4.9 – Bancada de medições.

Considerando as grandezas de força, que são da ordem de cN, estabeleceu-se uma lâmina como elemento mola. Delimitou-se a região que sofreria maior deformação e realizando-se a colagem dos *strain gages* naquelas áreas. A Figura 4.10 mostra em detalhe como foi realizada a fixação do elemento mola no eixo da base de sustentação dos tubos.



Figura 4.10 – Elemento mola fixado no eixo da base.

Levando em conta as amplitudes de saída de tensão na ponte, foi realizado o planejamento de ganhos do sistema de tratamento do sinal. Como já citado anteriormente, por especificação de projeto, a tensão máxima de saída deve ser de 5 V para a função de calibração. Foi utilizado esse valor para que possíveis variações de sinais na saída da ponte nunca atinjam valores que por ventura venham a danificar o instrumento de aquisição de dados. Fazendo uma simples relação de tensão de saída sobre tensão de entrada do bloco de condicionamento tem-se que o ganho que o circuito deve dar ao sinal é de aproximadamente 1560 vezes. A relação da velocidade do escoamento com as deformações foi obtida através da medição de pressão barométrica e temperatura do laboratório que resultaram respectivamente em 752 mmHg e 26°C, resultando em uma massa específica do ar de 1,1838kg/m³.

4.1.5 Visualização

Visando melhor compreender os fenômenos medidos em laboratório, utilizou da técnica de visualização, para apresentar o comportamento dos tubos quando liberados para rotacionar ou oscilar. Para isso, utilizou uma câmera de alta velocidade (CAV) modelo Phantom V411, da marca Ametek. A câmera utilizada é ilustrada na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Câmera de alta velocidade com lente acoplada e tripé de fixação.

A utilização da CAV se deve ao fato de que é necessária uma alta taxa de aquisição de imagens para um completo mapeamento do comportamento rotacional ou oscilatório resultantes da alta velocidade imposta pelo canal aerodinâmico. A CAV é gerenciada pelo programa Phantom Camera Control, versão 2.3, também desenvolvido pela Ametek sendo conectada a um computador através de um cabo ethernet, que permite realizar as configurações dos parâmetros de captura de imagem, para isso possui um sensor de captura de imagem CMOS monocromático com resolução de 1200 x 800 pixels, onde foi instalada uma lente AF-S VR Micro-Nikkor de 105mm com ajuste da distância de foco manual que permite uma abertura de 23,3° que auxilia em uma menor deformação das imagens capturadas.

Para o posicionamento e alinhamento da CAV junto a bancada, foi utilizado um tripé com uma base (cabeça) de 2 movimentos com trava manual que possibilita regulagem de altura e de nível de acordo com o ângulo de abertura da base que possui três níveis regulados manualmente. Para fornecer a iluminação necessária dentro do canal, uma luminária LED de 100 W modelo MicroBeam 128 é instalada. Com o auxílio de um suporte é possível posicionar e fixa-la na lateral do canal. A luminária é alimentada por uma fonte de 12V e permite o ajuste manual da luminosidade através de um botão posicionado na parte traseira. A luminária pode ser visualizada na Figura 4.12.



Figura 4.12 – Luminária LED.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados de medições de velocidade para dois tubos em canal aerodinâmico, todas realizadas no plano médio longitudinal. A razão de espaçamento estudada foi $p/d = 1,26$, onde “p” é a distância entre os centros de dois tubos quaisquer e “d” é o diâmetro destes. Serão apresentados os resultados das medições de flutuações das forças de arrasto e momento de rolamento as quais são originadas pela interação, fluido (ar) e estrutura (tubos), no canal aerodinâmico com o uso da célula de carga. Também serão apresentados os resultados obtidos através da técnica de visualização dos efeitos da biestabilidade com os tubos livres para rotacionar em um eixo central, com o intuito de auxiliar na interpretação dos resultados das medições realizadas.

Os números de Reynolds em canal aerodinâmico variam de $8,979 \times 10^3$ a $2,763 \times 10^4$, baseados na velocidade média do escoamento não perturbado e no diâmetro dos tubos. As frequências escolhidas para aquisição das séries de velocidade dependem da disponibilidade dos filtros para frequência de corte, atendendo o critério de Nyquist para evitar o dobramento das altas frequências no espectro. Também, devem permitir a identificação das principais características do escoamento. Os tempos de aquisição dos dados dependem do número de elementos da amostra.

5.1 Dois tubos fixos dispostos lado a lado para diferentes números de Reynolds

Esta seção irá apresentar os resultados obtidos para dois tubos fixos dispostos lado a lado. A configuração de posicionamento de sondas para a medição será referenciada pela obra de De Paula, 2008, que utilizou uma relação de espaçamento $p/d = 1,26$, frequência de aquisição de 1000 Hz e 2^{17} (131072) pontos. Os números de Reynolds do experimento variam de $8,979 \times 10^3$ a $2,763 \times 10^4$ e a velocidade de referência de 5,4 m/s a 16,6 m/s respectivamente. A Figura 5.1 ilustra a geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o posicionamento das sondas utilizadas no experimento em questão. O fio da sonda foi posicionado verticalmente.

Segundo Alam et al., 2003, o fenômeno da biestabilidade pode ser verificado em arranjo de dois tubos dispostos lado a lado submetidos a escoamento turbulento cruzado para uma relação de espaçamento entre $1,2 < p/d < 2,2$. Neste caso, a biestabilidade se manifesta

através do desvio da porção de fluido que emerge da fenda entre os dois tubos. Assim, uma maneira de se medir experimentalmente o efeito biestável para esta configuração é se posicionando duas sondas retas de fio quente a jusante dos mesmos, alinhadas às linhas tangentes às geratrizes internas dos tubos.

Os resultados das reconstruções de sinais de velocidade instantânea por transformada discreta de ondaletas, são do tipo Db20 e nível 10 em todas as análises realizadas. Em função da frequência de aquisição, essa reconstrução resulta em um sinal com frequências de até 0,48 Hz, o que elimina as flutuações de frequência mais altas do que esse valor.

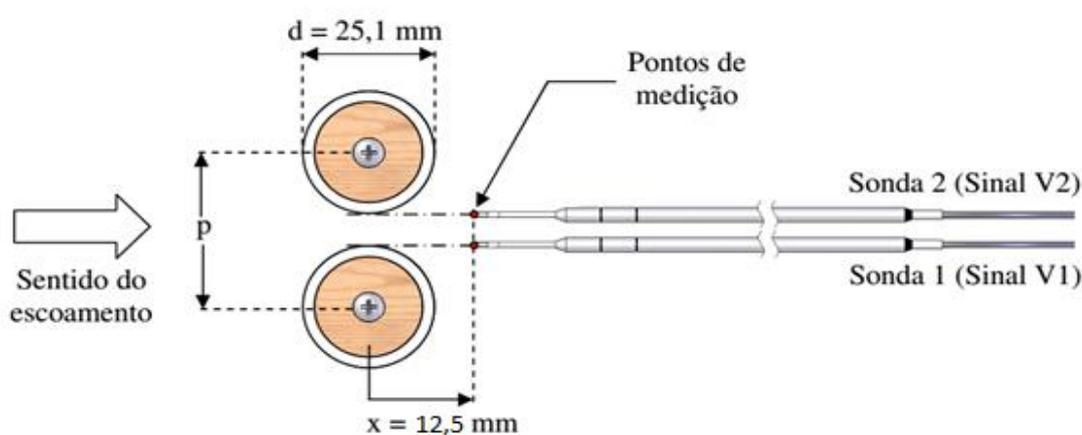


Figura 5.1 – Geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o posicionamento das sondas utilizadas nos experimentos (Adaptado de De Paula, 2008).

A Figura 5.2a mostra os sinais de velocidade instantâneos para número de Reynolds de $8,979 \times 10^3$ e velocidade de referência de 5,4 m/s. A Figura 5.2b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.2a são mostrados na Figura 5.3. Estes espectrogramas mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente, em intervalos de frequência de 4 Hz, na faixa de 20 a 200 Hz. A Figura 5.4 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.2a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

A Figura 5.5a mostra os sinais de velocidade instantânea para número de Reynolds de $1,39 \times 10^4$ e a velocidade de referência de 8,36 m/s. A figura 5.5b, apresenta a reconstrução destes sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados

através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.5a são mostrados na Figura 5.6. A Figura 5.7 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.5a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

A Figura 5.8a mostra os sinais de velocidade instantânea para Reynolds de $1,87 \times 10^4$ e velocidade de referência de 11,24 m/s. A figura 5.8b, apresenta a reconstrução destes sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.8a são mostrados na Figura 5.9. A Figura 5.10 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.8a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

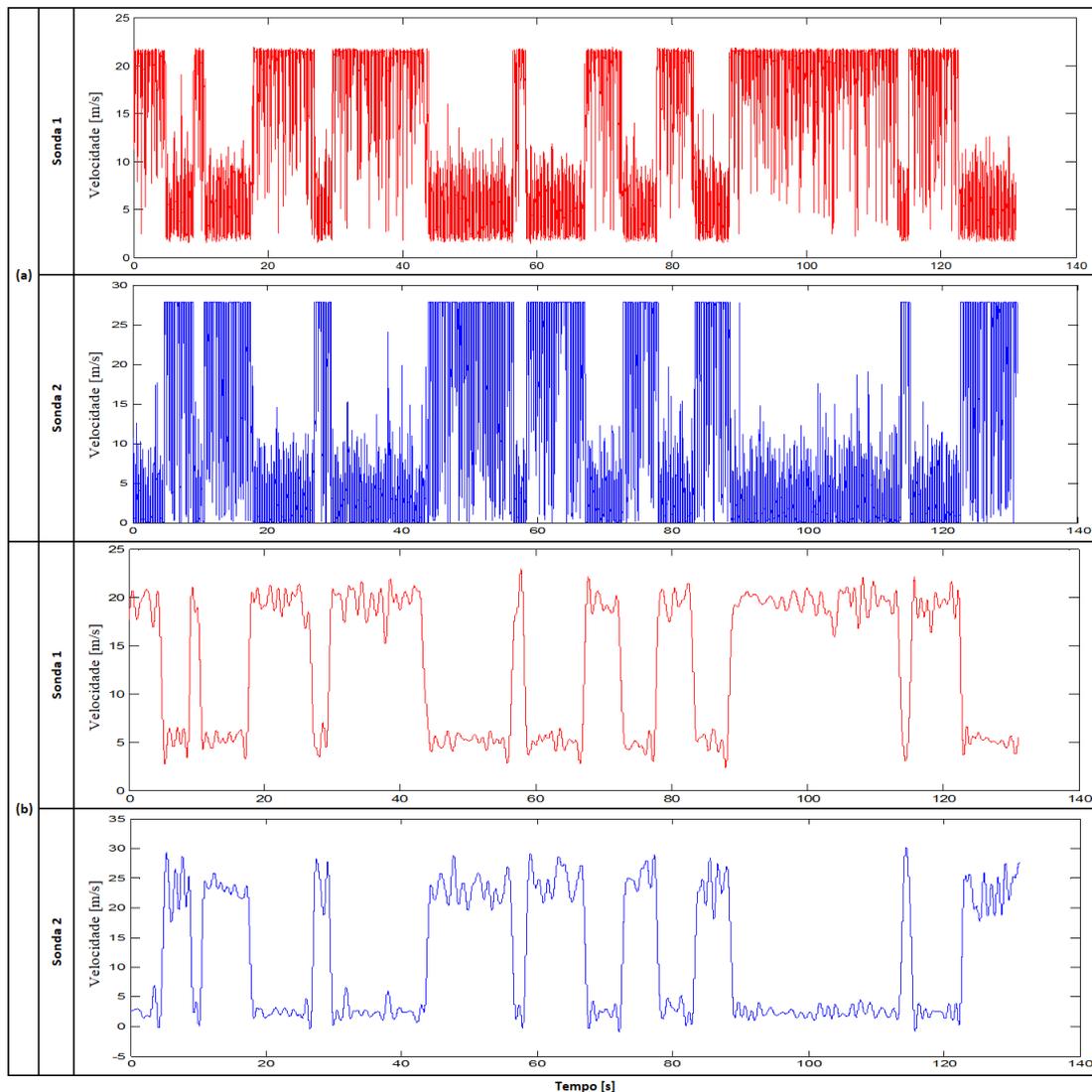


Figura 5.2 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

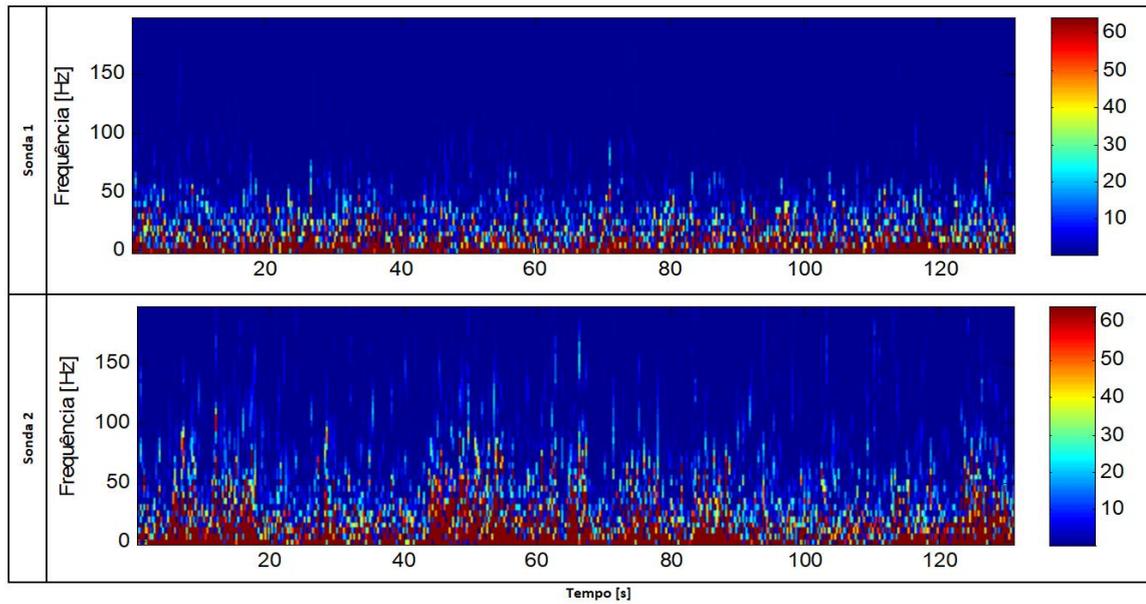


Figura 5.3 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

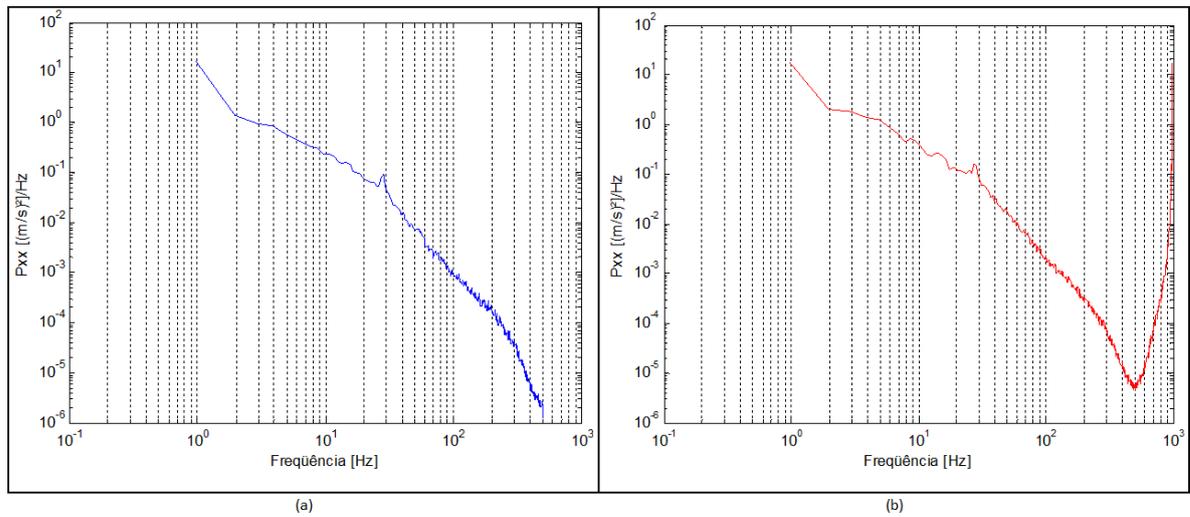


Figura 5.4 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

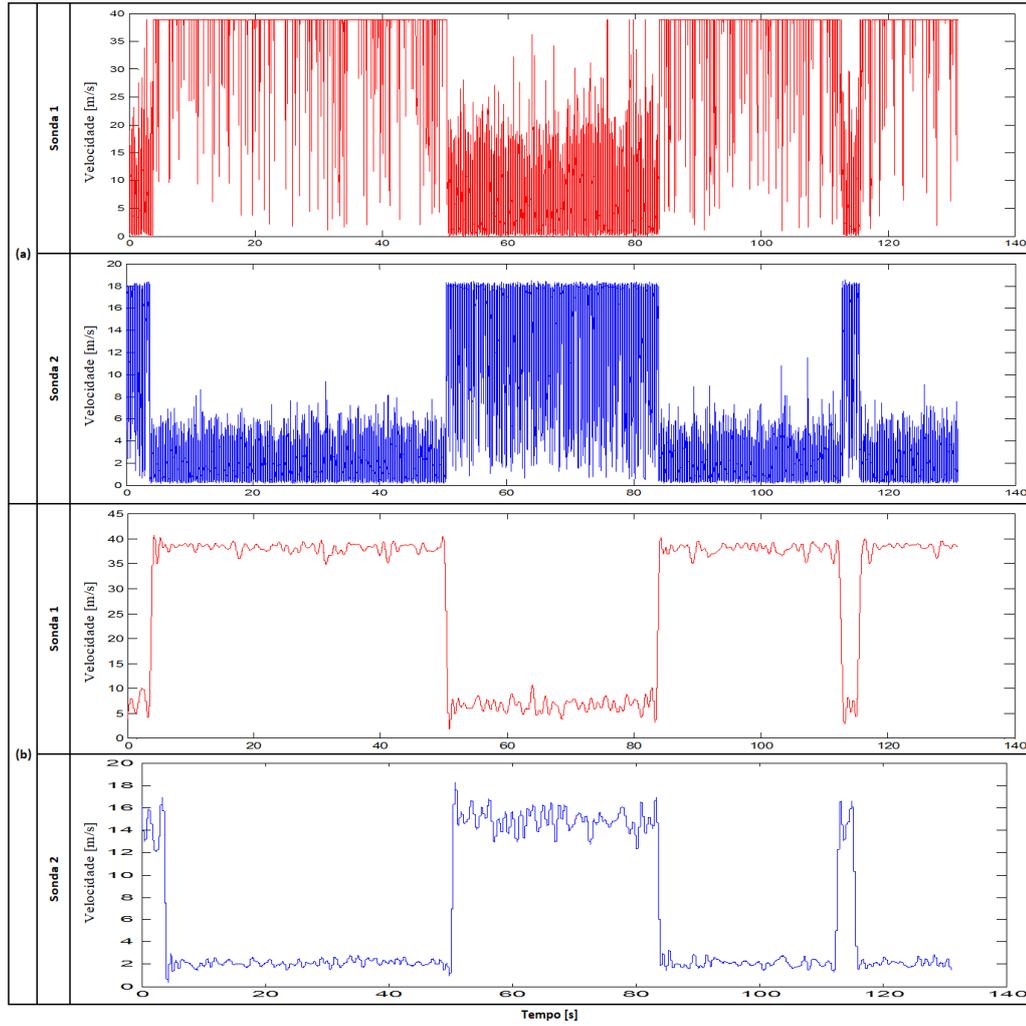


Figura 5.5 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

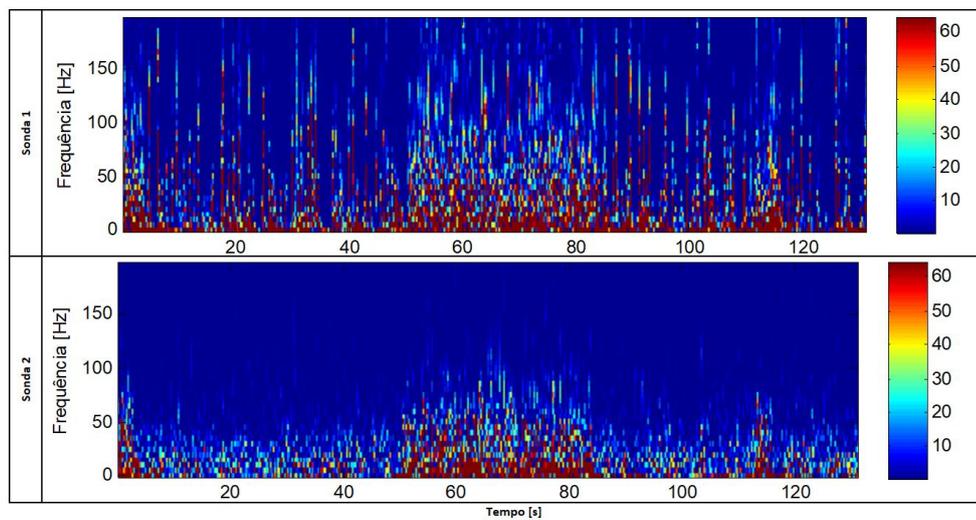


Figura 5.6 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

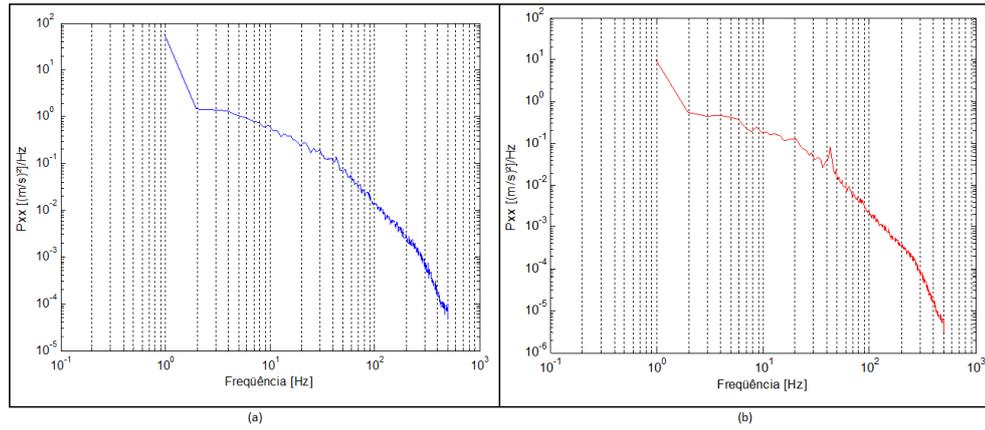


Figura 5.7 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1. (b) Sonda 2.

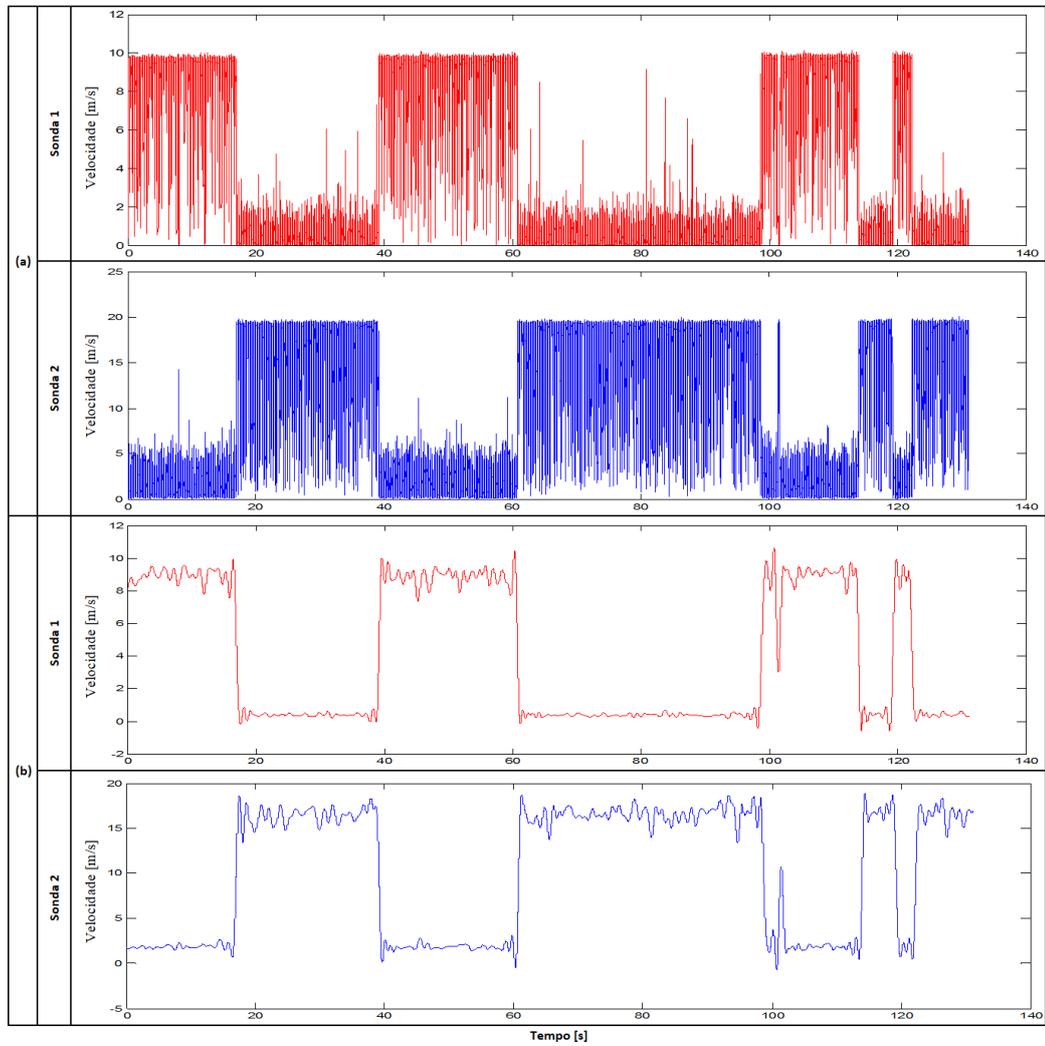


Figura 5.8 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

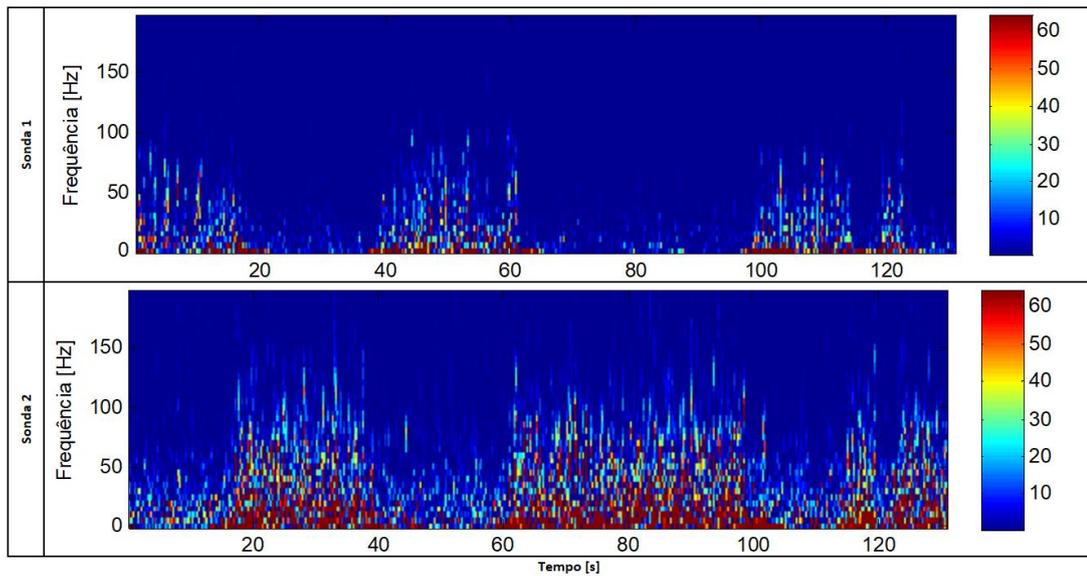


Figura 5.9 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

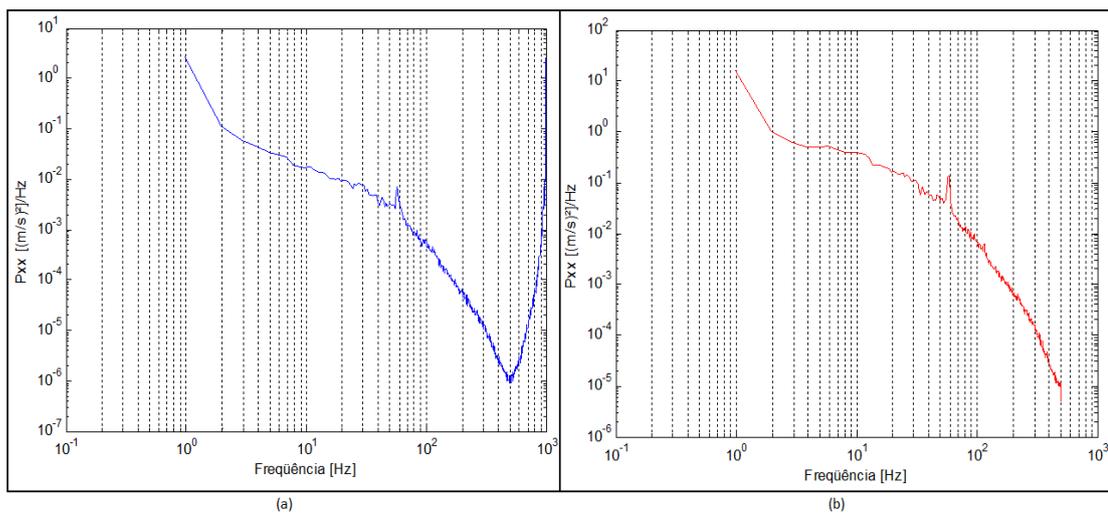


Figura 5.10 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

A Figura 5.11a mostra os sinais de velocidade para Reynolds de $2,763 \times 10^4$ e velocidade de referência de 16,63 m/s. A figura 5.11b, apresenta a reconstrução destes sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.11a são mostrados na Figura 5.12. A Figura 5.13 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.11a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

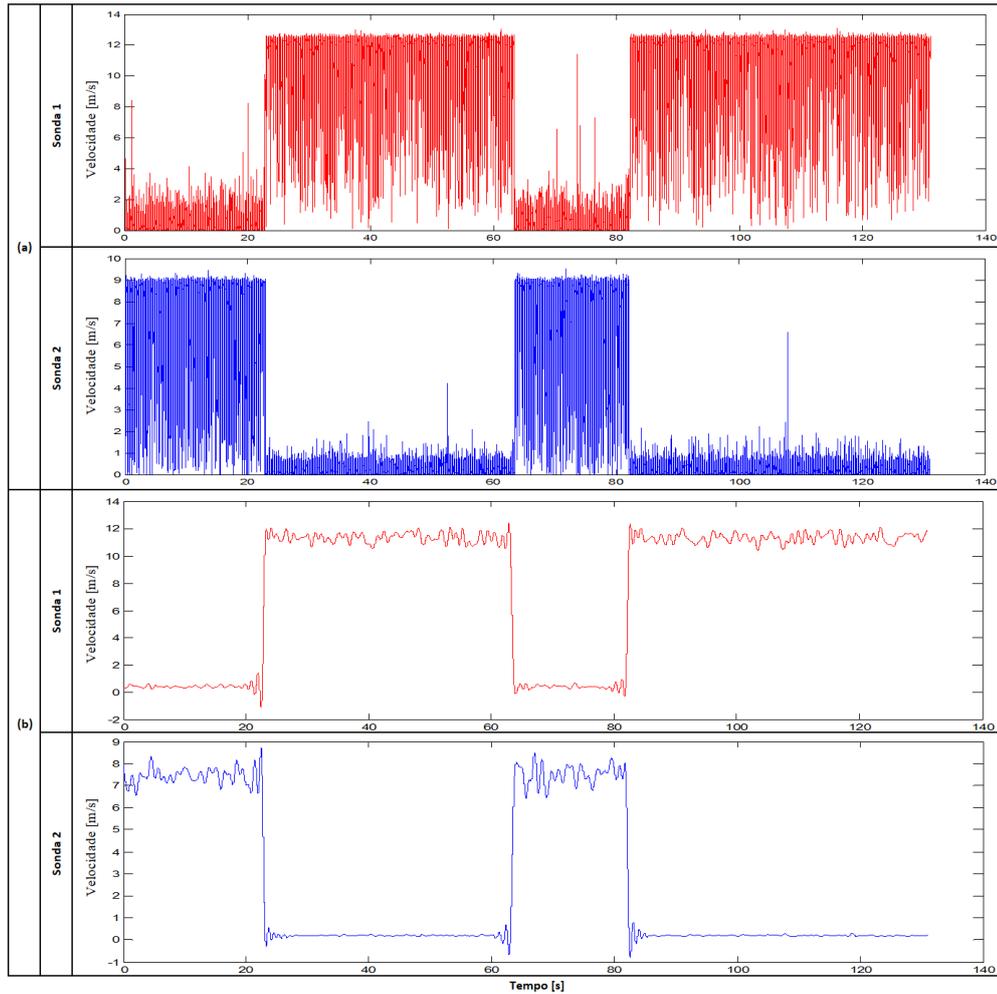


Figura 5.11 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

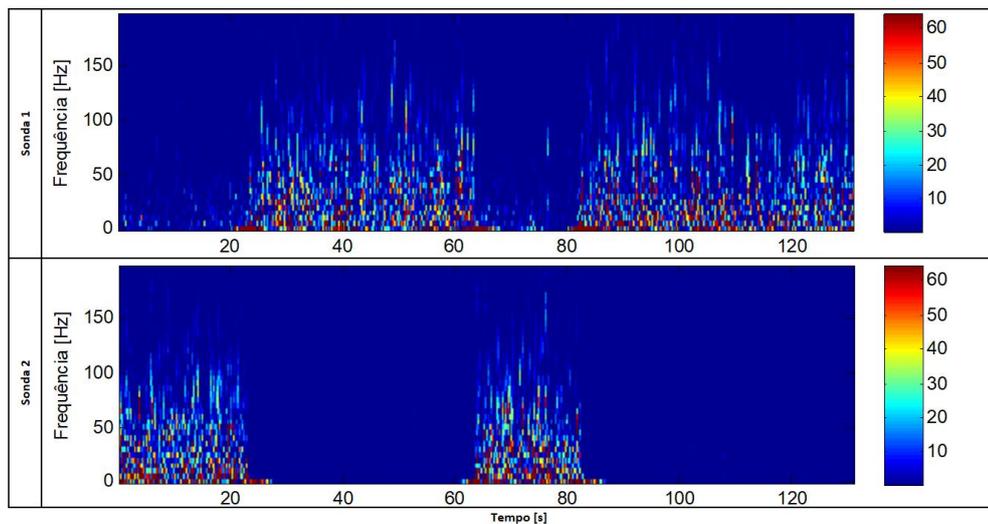


Figura 5.12 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

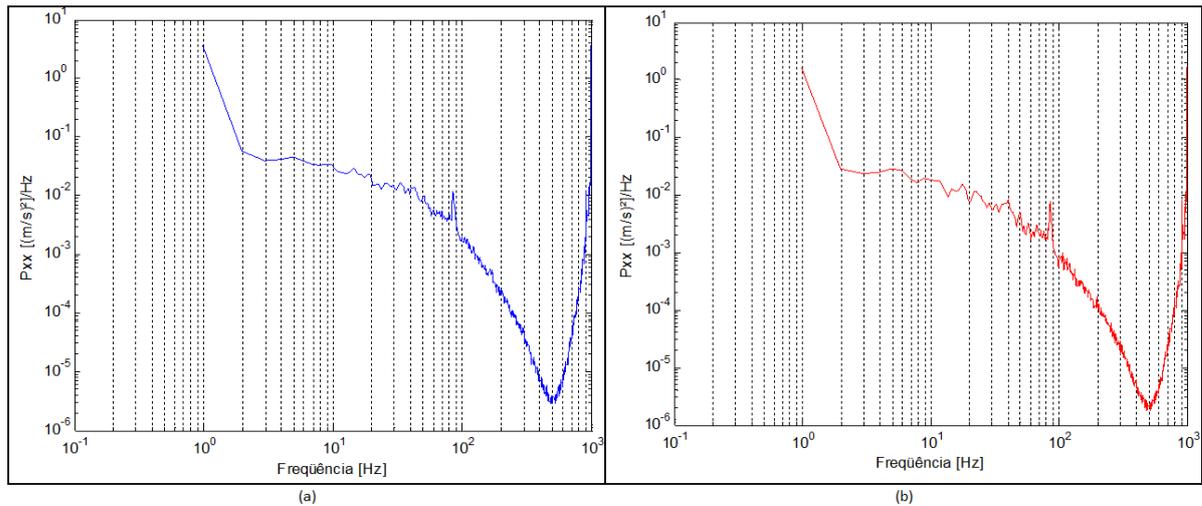


Figura 5.13 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

Para todos os números de Reynolds estudados, é possível observar claramente várias trocas de velocidade durante todo o tempo de aquisição dos dados. Também foi observado diversos patamares de velocidades visíveis, que variaram de 1m/s para até 40m/s em determinados instantes. Outro ponto importante observado, foi as maiores flutuações das velocidades altas do que nas baixas.

A reconstrução dos sinais através de transformada discreta de ondaletas facilitou muito a compreensão dos resultados apresentados. Foi possível contabilizar 18 trocas para Reynolds de $8,979 \times 10^3$ (5,4 m/s), 06 trocas para Reynolds de $1,39 \times 10^4$ (8,36 m/s), 08 trocas para Reynolds de $1,87 \times 10^4$ (11,24 m/s) e 04 trocas para Reynolds de $2,763 \times 10^4$ (16,63 m/s). Porém, se realizado um processo sucessivo de medição de velocidades instantâneas este valor não se mantém constante, mostrando que o fenômeno biestável não possui um período natural definido.

Observa-se que a velocidade obtida pela sonda 1 nem sempre atinge os mesmos patamares das velocidades obtidas pela sonda 2. Neste caso específico, para se atingir os mesmos patamares de velocidade entre os modos do escoamento as sondas devem estar devidamente calibradas, e posicionadas de modo simétrico em relação às esteiras dos cilindros. Uma calibração deficiente não garante que na troca entre os modos do escoamento uma das sondas atinja o patamar de velocidades mais alto. Segundo a bibliografia, quando a velocidade média flutua ao redor de um valor mais alto, o escoamento que sai do interior da

fenda está inclinado na direção da sonda, e quando a velocidade média flutua ao redor de um valor mais baixo, a sonda está medindo a velocidade dentro da esteira larga.

Outra ferramenta que apresentou bons resultados foi análise dos espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade. Estes espectrogramas mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente, em intervalos de frequência de 4 Hz, na faixa de 20 a 200 Hz. É possível observar a variação dos valores de energia, nos mesmos instantes que acontecem as trocas. Quanto menor a velocidade, menores são os valores de energia obtidos. Para uma quantidade menor de trocas, fica muito mais fácil visualizar a diferença de energia nas diferentes velocidades encontradas.

Contudo, são observados saltos de energia em instantes em que não há nenhuma troca aparente. Segundo Alam et al., 2003, a troca entre dois modos do escoamento não se dá de modo instantâneo. Um modo intermediário, com frequência diferente daquelas relativas às esteiras larga e estreita surge, e o escoamento apresenta um aumento das flutuações de velocidade em diversas frequências.

Nos espectros de flutuação, obtidos através da função densidade espectral de potência, observou-se pequenos picos que correspondem sempre a $St = 0,13$. Os valores acima da frequência de corte resultam do fato de as séries dos sinais serem complexas e a causa deste fenômeno não é bem solucionada. A única consequência deste comportamento é que as densidades espectrais têm valores mais baixos que os valores de séries reais.

5.2 Dois tubos fixos com reposicionamento de sondas

Esta seção irá apresentar os resultados obtidos para dois tubos fixos dispostos lado a lado. Porém, uma nova configuração de posicionamento das sondas será empregada. O objetivo deste reposicionamento é primeiramente avaliar o comportamento biestável em diferentes posições da esteira e preparar a bancada para os experimentos que serão desenvolvidos na próxima seção, que irá dar a liberdade rotacional aos dois tubos estudados. A relação de espaçamento continua sendo $p/d = 1,26$, frequência de aquisição de 1000 Hz e 2^{17} (131072) pontos. Os números de Reynolds dos experimentos variam de $8,979 \times 10^3$ a $2,763 \times 10^4$ e a velocidade de referência de 5,4 m/s a 16,6 m/s respectivamente. A Figura 5.14 ilustra a geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o novo posicionamento das sondas

utilizadas para avaliação do experimento em questão. O fio da sonda foi posicionado verticalmente.

Os resultados das reconstruções de sinais de velocidade instantânea por transformada discreta de ondaletas, são do tipo Db20 e nível 10 em todas as análises realizadas. Em função da frequência de aquisição, essa reconstrução resulta em um sinal com frequências de até 0,48 Hz, o que elimina as flutuações de frequência mais altas do que esse valor.

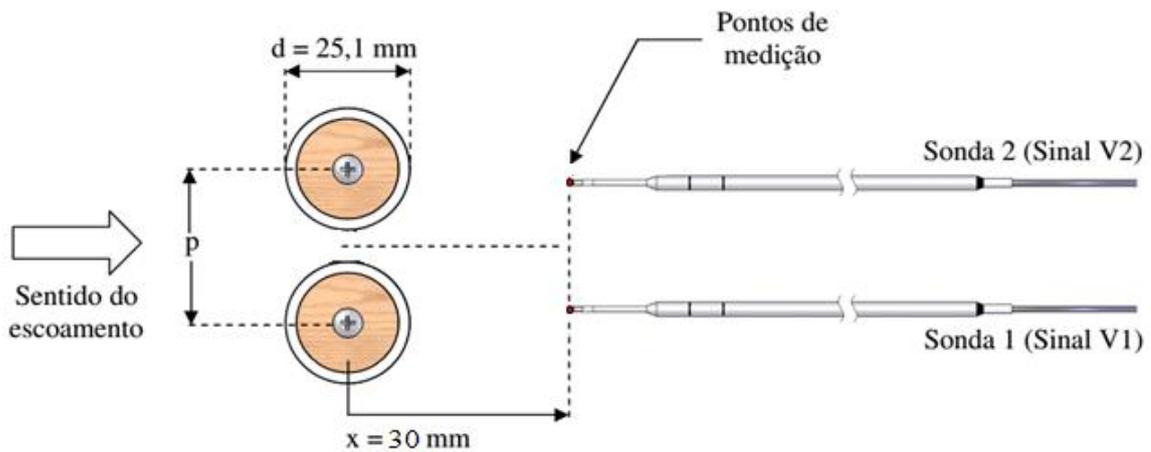


Figura 5.14 – Geometria dos dois tubos dispostos lado a lado e o posicionamento das sondas utilizadas nos experimentos (adaptado de De Paula, 2008).

A Figura 5.15a mostra os sinais de velocidade instantânea Reynolds de $8,979 \times 10^3$ e velocidade de referência é 5,4 m/s. A Figura 5.15b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.15a são mostrados na Figura 5.16. Estes espectrogramas mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente, em intervalos de frequência de 4 Hz, na faixa de 20 a 200 Hz. A Figura 5.17 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.15a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

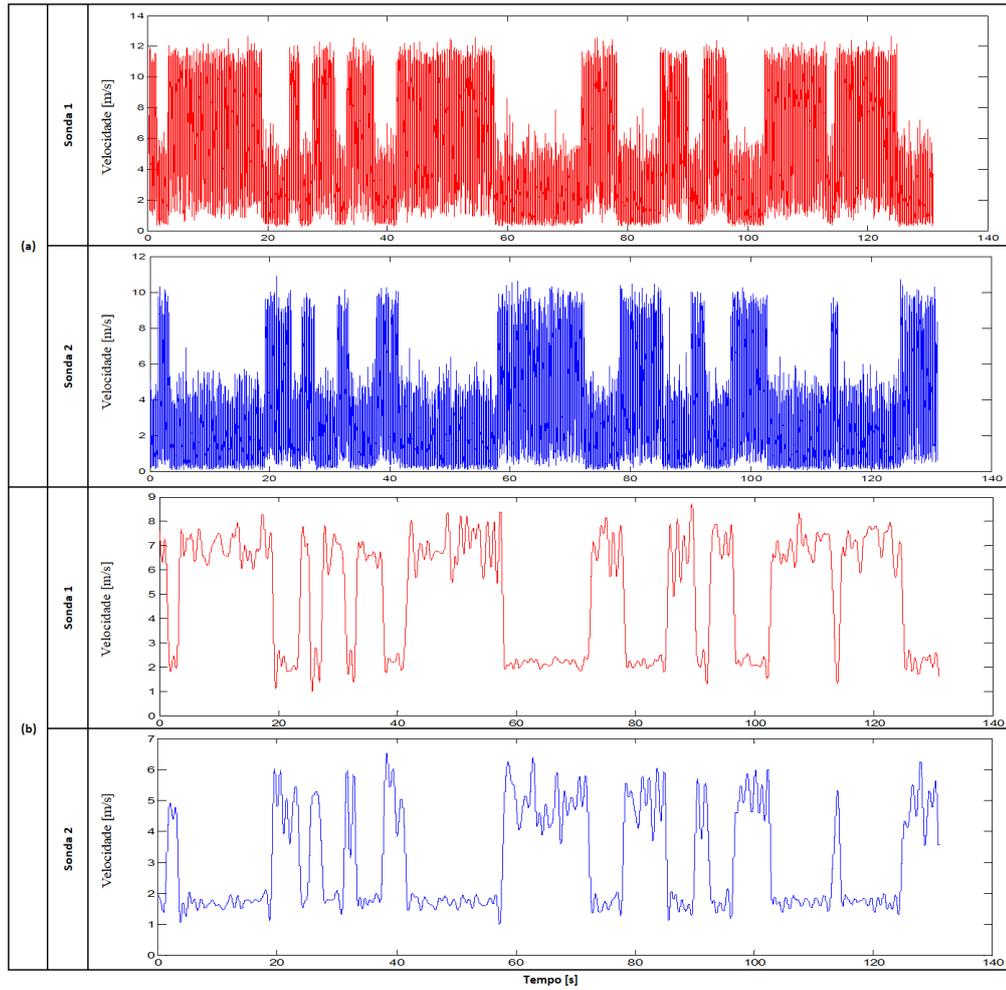


Figura 5.15 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

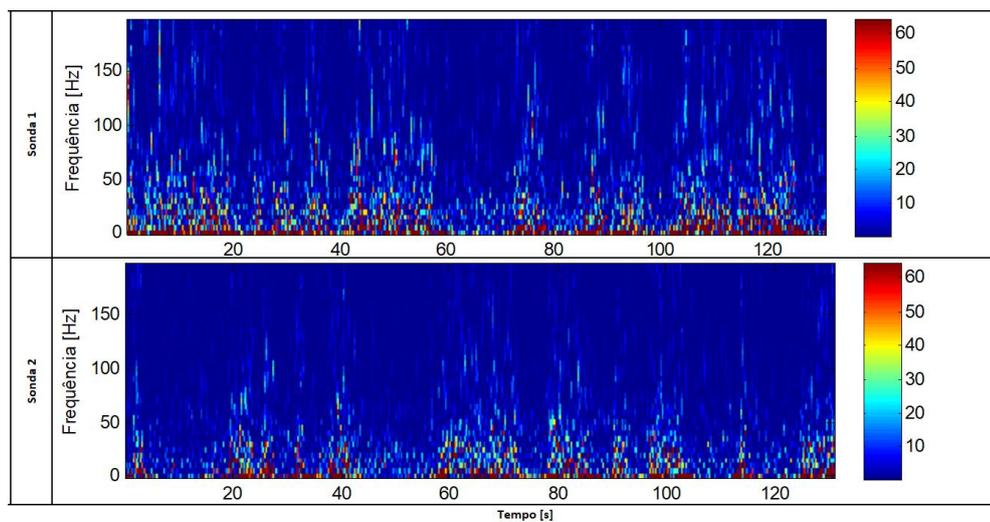


Figura 5.16 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

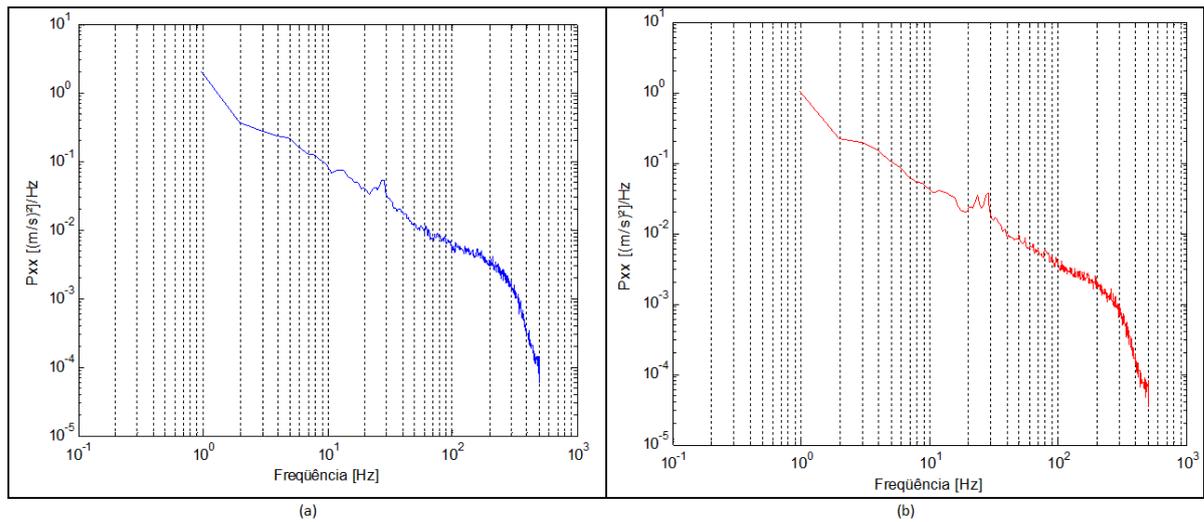


Figura 5.17 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

A Figura 5.18a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos Reynolds de $1,39 \times 10^4$ e velocidade de referência é 8,36 m/s. O resultado da reconstrução destes sinais por transformada discreta de ondaletas é apresentado na Figura 5.18b. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.18a são mostrados na Figura 5.19. A Figura 5.20 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.18a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

A Figura 5.21a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos Reynolds de $1,87 \times 10^4$ e velocidade de referência é 11,24 m/s. A Figura 5.21b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.21a são mostrados na Figura 5.22. A Figura 5.23 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.21a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

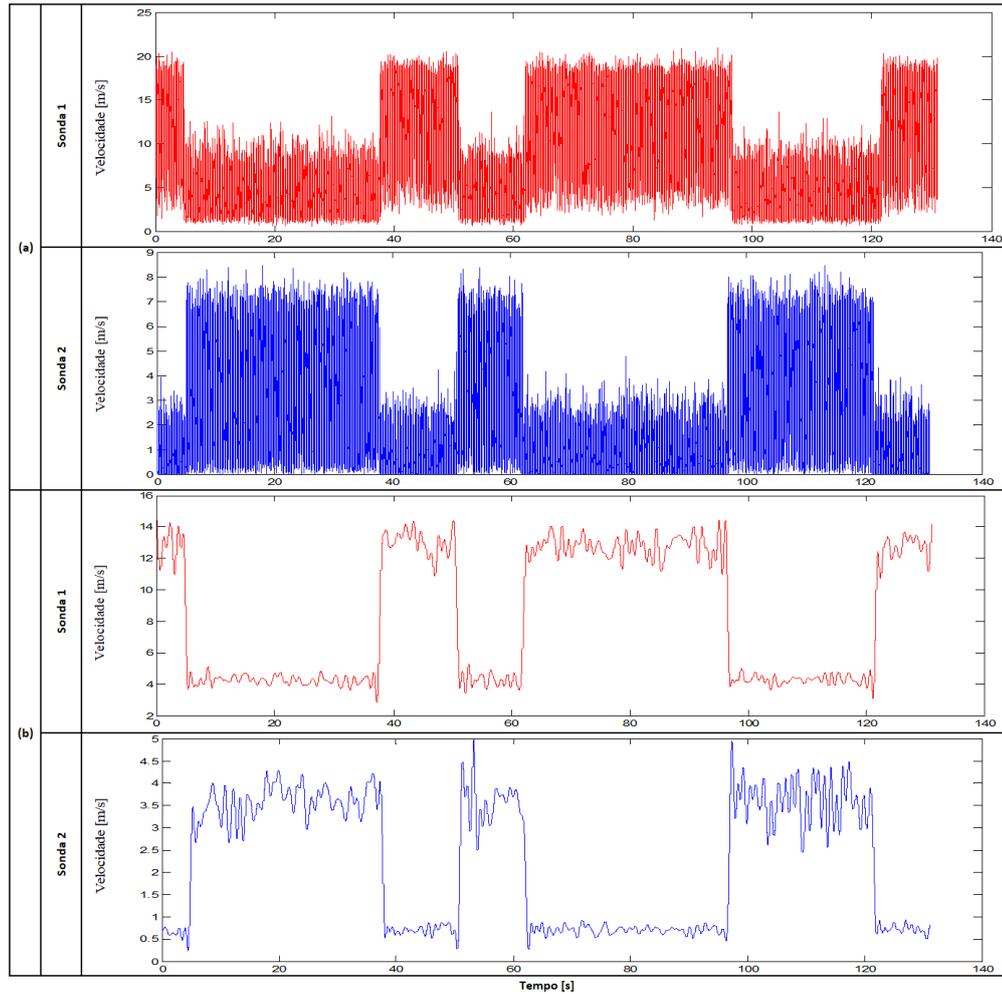


Figura 5.18 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

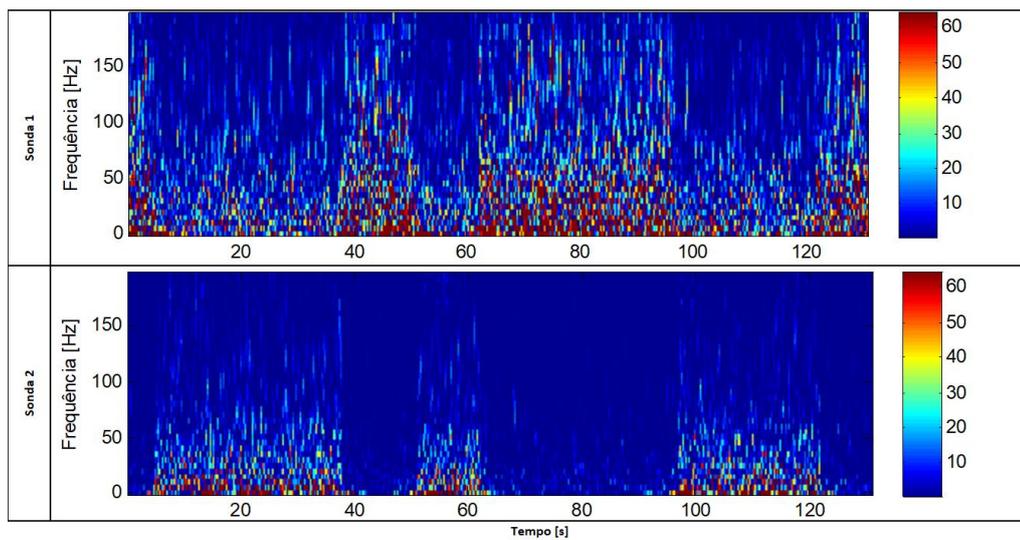


Figura 5.19 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

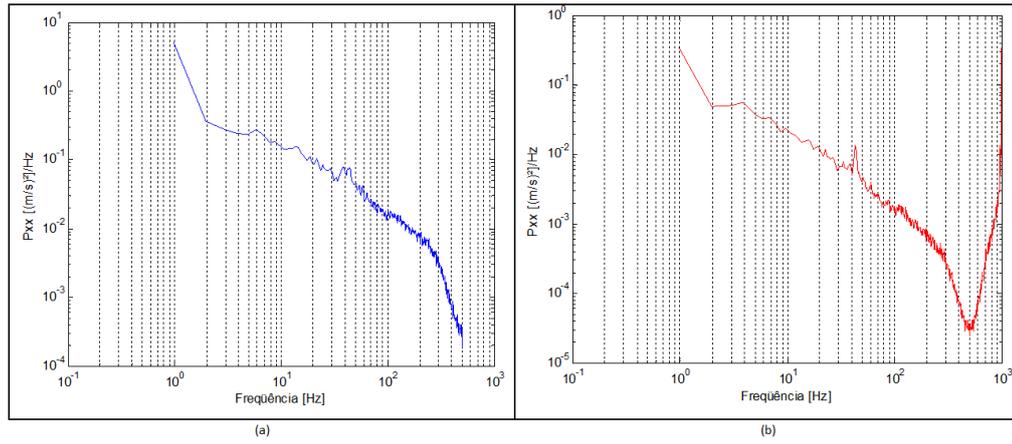


Figura 5.20 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

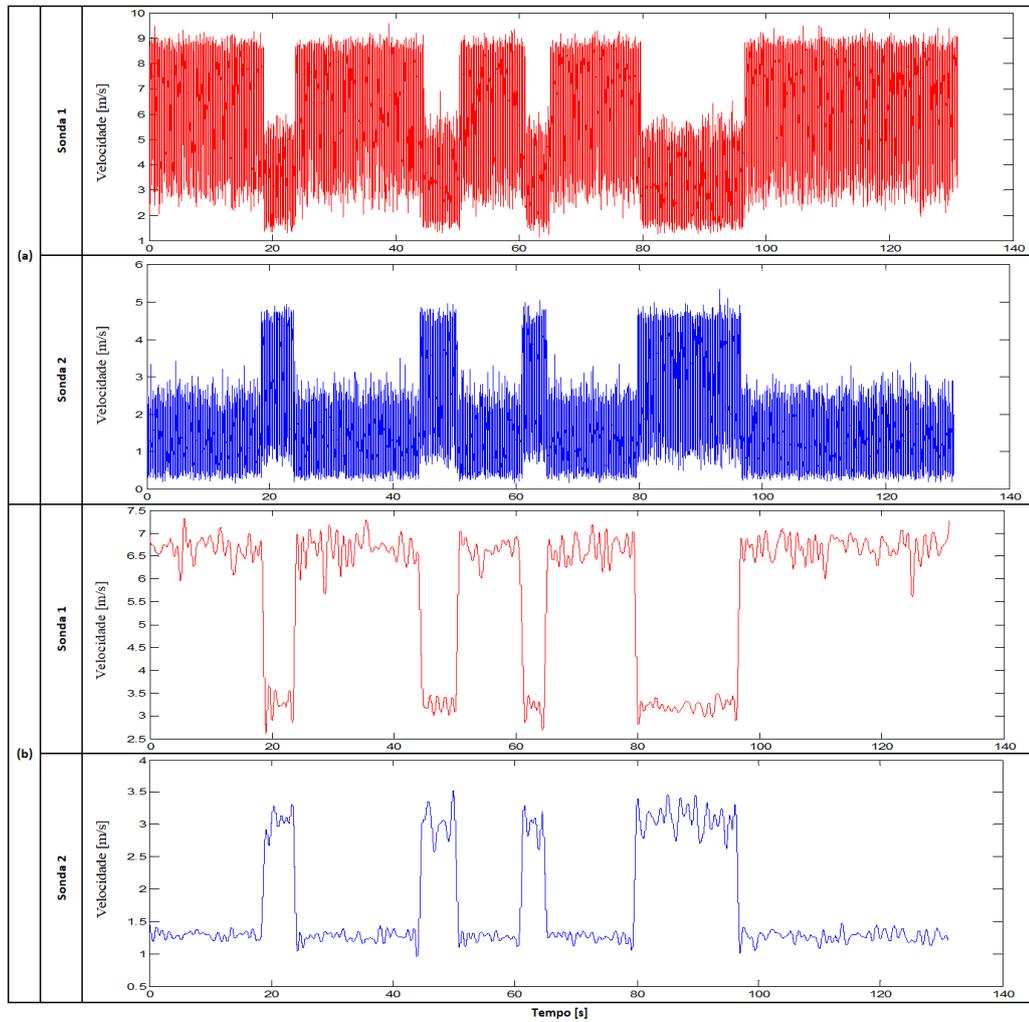


Figura 5.21 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

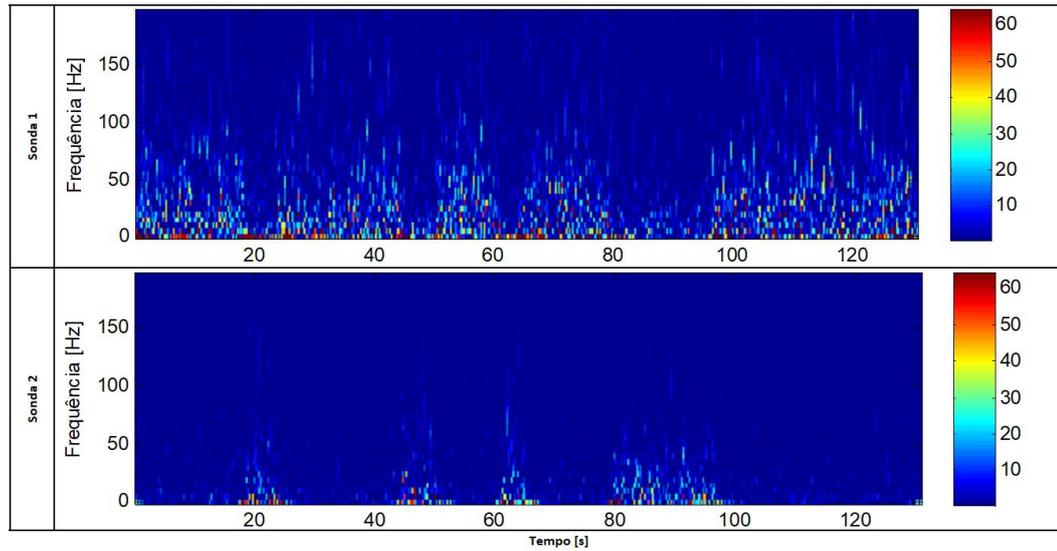


Figura 5.22 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

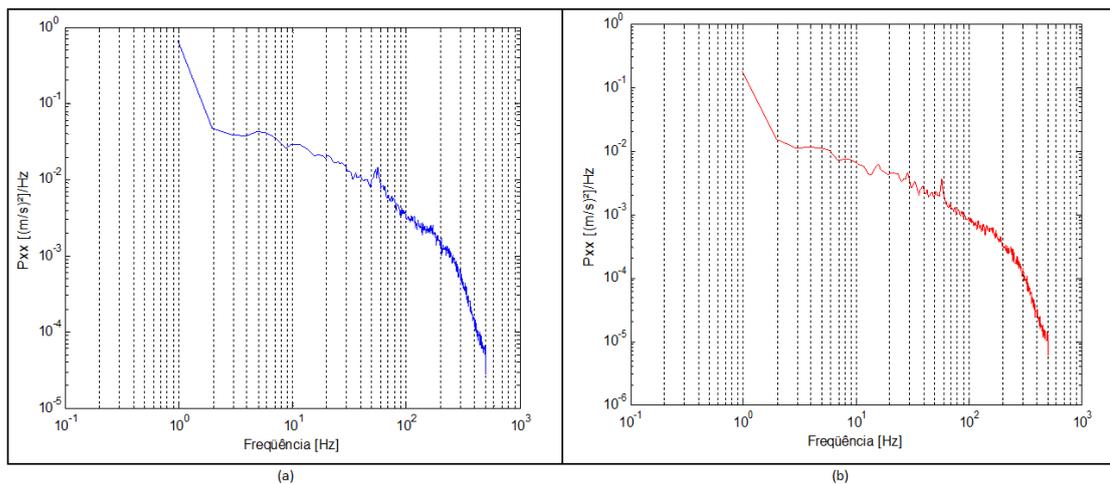


Figura 5.23 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

A Figura 5.24a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para de $2,763 \times 10^4$ e velocidade de referência é 16,63 m/s. A Figura 5.24b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.24a são mostrados na Figura 5.25. A Figura 5.26 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.24a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

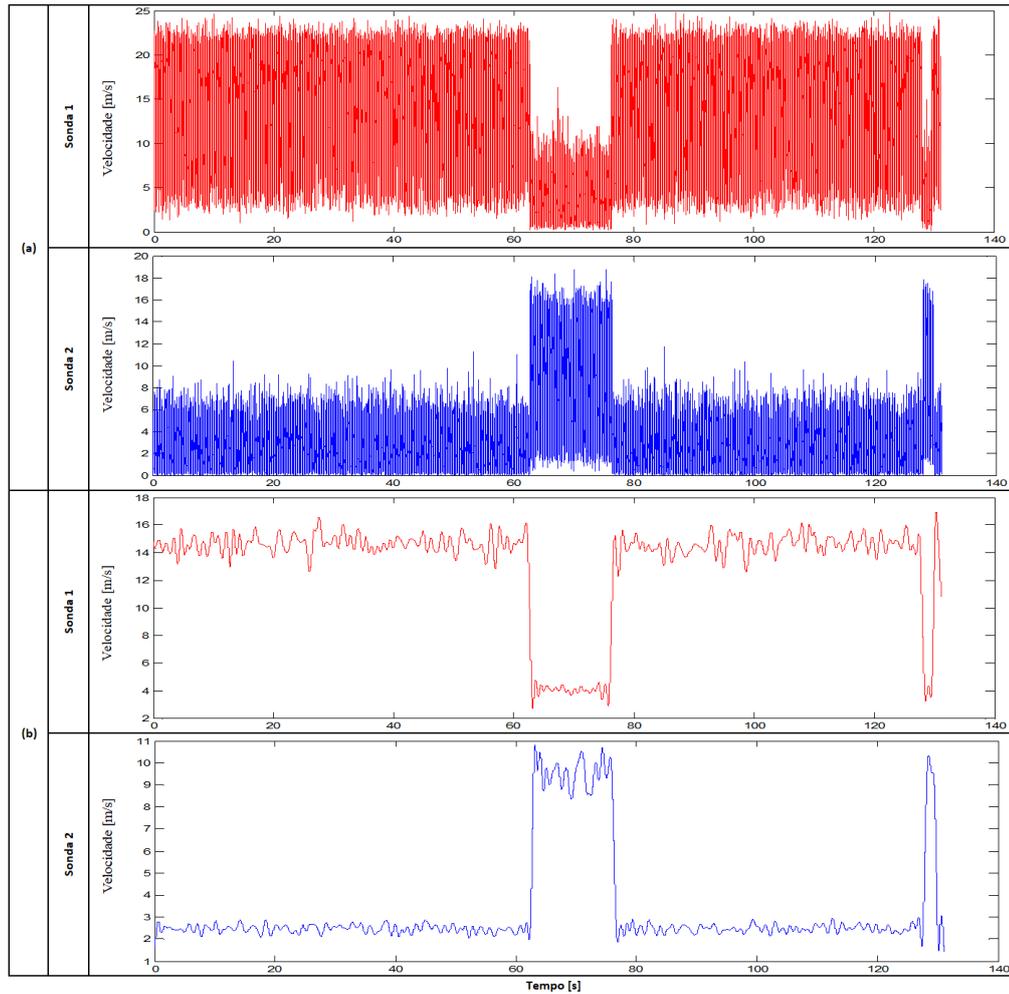


Figura 5.24 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

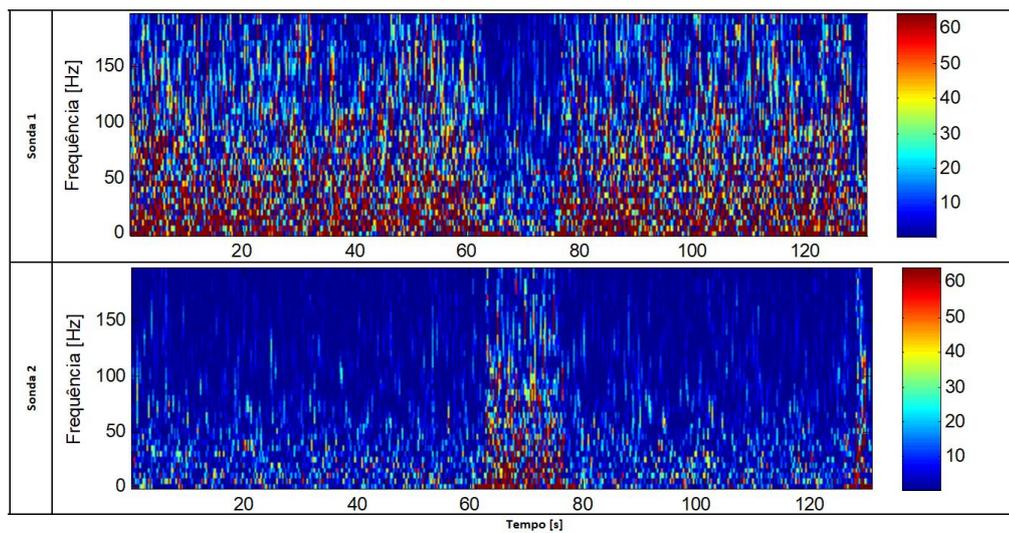


Figura 5.25 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

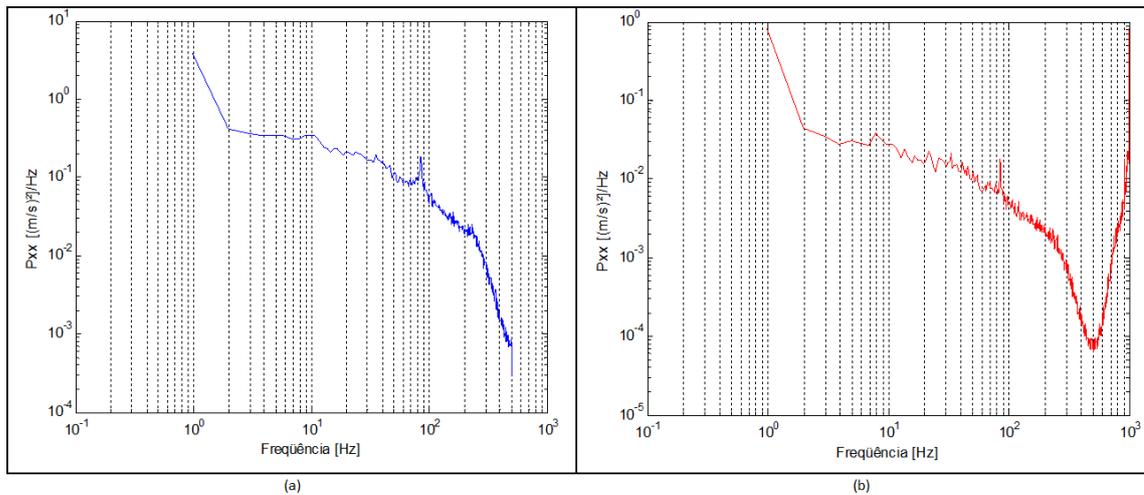


Figura 5.26 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

Como no experimento anterior, para todos os números de Reynolds estudados, é possível observar claramente várias trocas de velocidade durante todo o tempo de aquisição dos dados. Os patamares de velocidade variaram de 1m/s para até 25m/s em determinados instantes. Outro ponto importante observado, foi as maiores flutuações das velocidades altas do que nas baixas.

A reconstrução dos sinais através de transformada discreta de ondaletas facilitou muito a compreensão dos resultados apresentados. Foi possível contabilizar 22 trocas para Reynolds de $8,979 \times 10^3$ (5,4 m/s), 07 trocas para Reynolds de $1,39 \times 10^4$ (8,36 m/s), 09 trocas para Reynolds de $1,87 \times 10^4$ (11,24 m/s) e 04 trocas para Reynolds de $2,763 \times 10^4$ (16,63 m/s). Porém, se realizado um processo sucessivo de medição de velocidades instantâneas este valor não se mantém constante, mostrando que o fenômeno biestável não possui um período natural definido.

Novamente as velocidades obtida pela sonda 1 não atingiram os mesmos patamares das velocidades obtidas pela sonda 2. Diferente do que foi encontrado para as avaliações anteriores com a diferente posição das sondas. Isto ocorre devido o posicionamento das sondas estarem mais simétricas uma à outra. Segundo Neumeister, 2015, quando a velocidade média flutua ao redor de um valor mais alto, o escoamento que sai do interior da fenda está inclinado na direção da sonda, e quando a velocidade média flutua ao redor de um valor mais baixo, a sonda está medindo a velocidade dentro da esteira larga.

Novamente, encontramos bons resultados na análise dos espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade, onde foi observado a variação dos valores de energia, nos mesmos instantes que acontecem as trocas.

Nos espectros de flutuação, obtidos através da função densidade espectral de potência, observou-se novamente pequenos picos que correspondem sempre a $St = 0,13$. Os valores acima da frequência de corte resultam do fato de as séries dos sinais serem complexas e a causa deste fenômeno não é bem solucionada. A única consequência deste comportamento é que as densidades espectrais têm valores mais baixos que os valores de séries reais.

5.3 Tubos livres para rotacionar

Esta seção irá apresentar os resultados obtidos para uma condição, até então, nunca estudada. Dois tubos foram dispostos lado a lado com $p/d = 1,26$ e liberados para rotacionar ou oscilar em relação ao eixo central entre eles. Lembrando que uma base de fixação foi desenvolvida especialmente para este fim, conforme seção 4.1.3. O objetivo deste experimento é primeiramente avaliar se a biestabilidade atua sobre o mecanismo proposto e relacionar este comportamento com as análises de tubos fixos.

O procedimento seguido nesta avaliação foi manter os tubos fixos em uma posição perpendicular ao escoamento, até que o escoamento no canal estabiliza-se. Após atingir esta condição, o mecanismo de rotação é liberado para movimentar.

A relação de espaçamento continua sendo $p/d = 1,26$, frequência de aquisição de 1000 Hz e 2^{17} (131072) pontos. Os números de Reynolds dos experimentos variam de $8,979 \times 10^3$ a $2,763 \times 10^4$ e a velocidade de referência de 5,4 m/s a 16,6 m/s respectivamente. Utilizando da mesma configuração de posicionamento de sondas do experimento anterior, foi adquirido os sinais de velocidade instantânea, reconstrução destes sinais por ondaletas discretas e espectrogramas.

Os resultados das reconstruções de sinais de velocidade instantânea por transformada discreta de ondaletas, são do tipo Db20 e nível 10 em todas as análises realizadas. Em função da frequência de aquisição, essa reconstrução resulta em um sinal com frequências de até 0,48 Hz, o que elimina as flutuações de frequência mais altas do que esse valor.

A Figura 5.27a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para Reynolds de $8,979 \times 10^3$ e velocidade de referência é 5,4 m/s. É possível observar um grande pico de

velocidade inicial seguido por uma série de oscilações. Da metade do experimento em diante, a velocidade curiosamente se estabiliza em um patamar mais alto do que o apresentado quando oscilava. Este comportamento ainda não é claramente entendido, tendo relação com a diferença das velocidades tangenciais dos cilindros em relação à velocidade do escoamento incidente.

A Figura 5.27b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. É possível observar de uma forma mais clara os patamares de velocidade e o perfil desenvolvido durante a janela de avaliação.

Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.27a são mostrados na Figura 5.28. Estes espectrogramas mostram a distribuição da energia das flutuações de velocidade nos domínios do tempo e da frequência simultaneamente, em intervalos de frequência de 4 Hz, na faixa de 20 a 200 Hz.

A Figura 5.29 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.27a, obtidos através da função densidade espectral de potência. O resultado apresenta um pico bem definido e uma série de harmônicos em sequência. Os valores acima da frequência de corte resultam do fato de as séries dos sinais serem complexas e a causa deste fenômeno não é bem solucionada. A única consequência deste comportamento é que as densidades espectrais têm valores mais baixos que os valores de séries reais.

A Figura 5.30a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos Reynolds de $1,39 \times 10^4$ e velocidade de referência é 8,36 m/s. A Figura 5.30b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.30a são mostrados na Figura 5.31.

A Figura 5.32 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.30a, obtidos através da função densidade espectral de potência. Uma grande quantidade de harmônicos é visualizada nestes resultados.

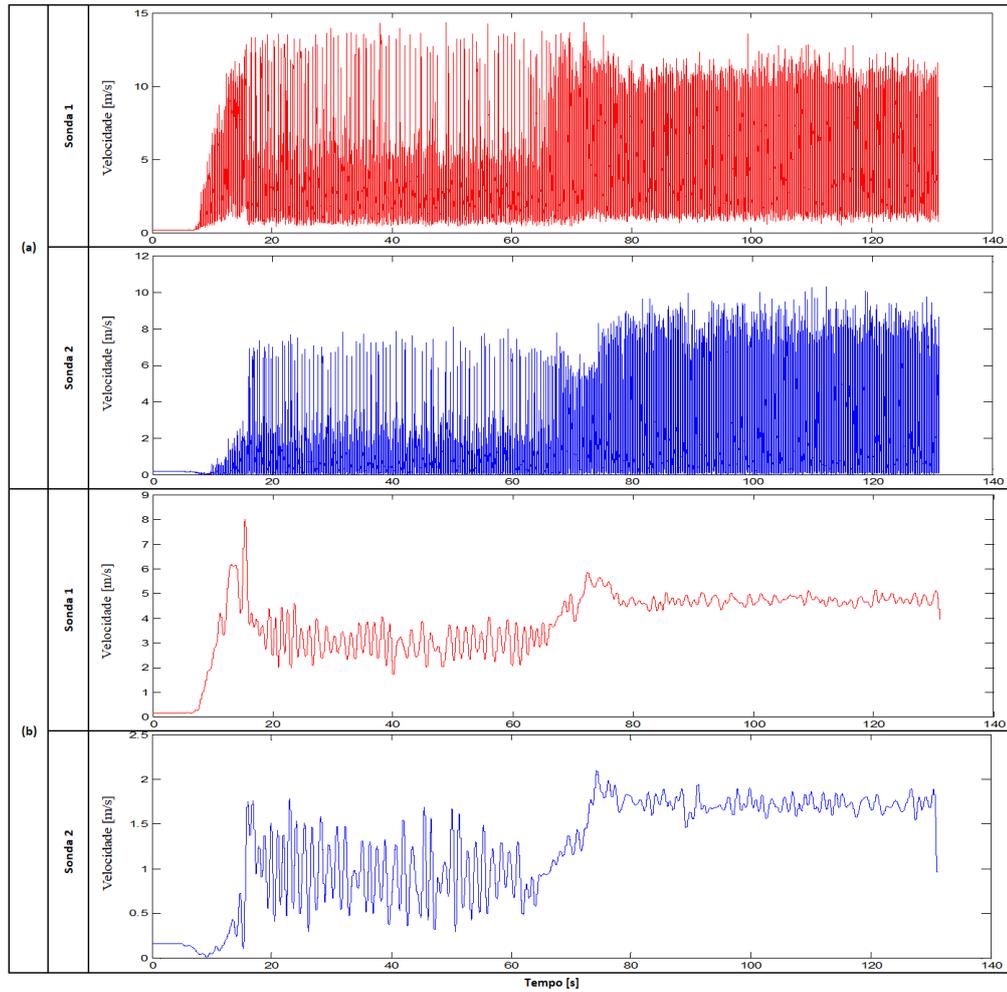


Figura 5. 27 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

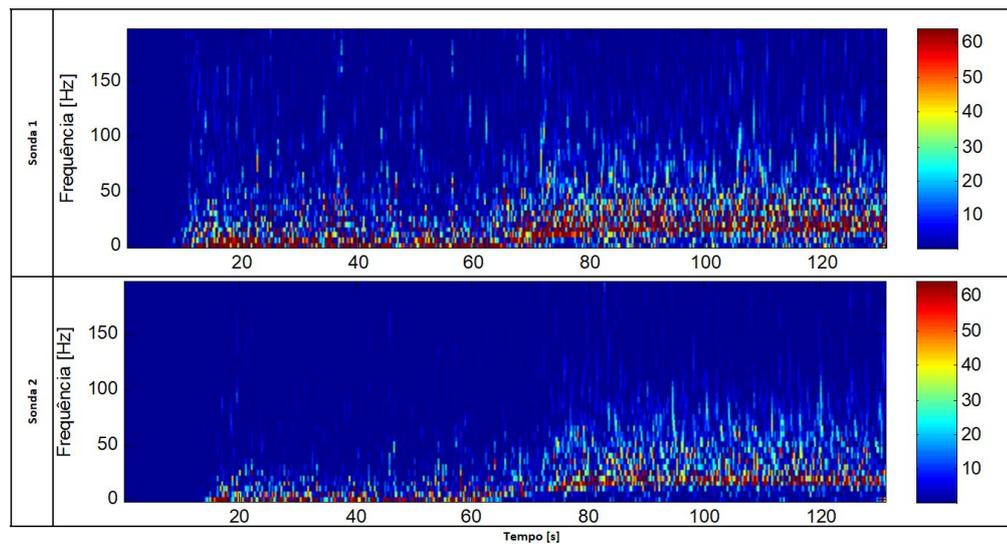


Figura 5. 28 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

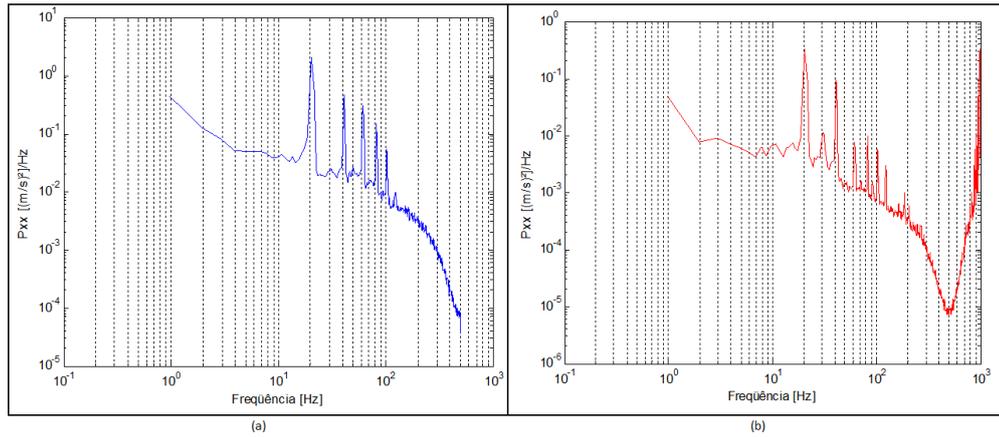


Figura 5.29 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

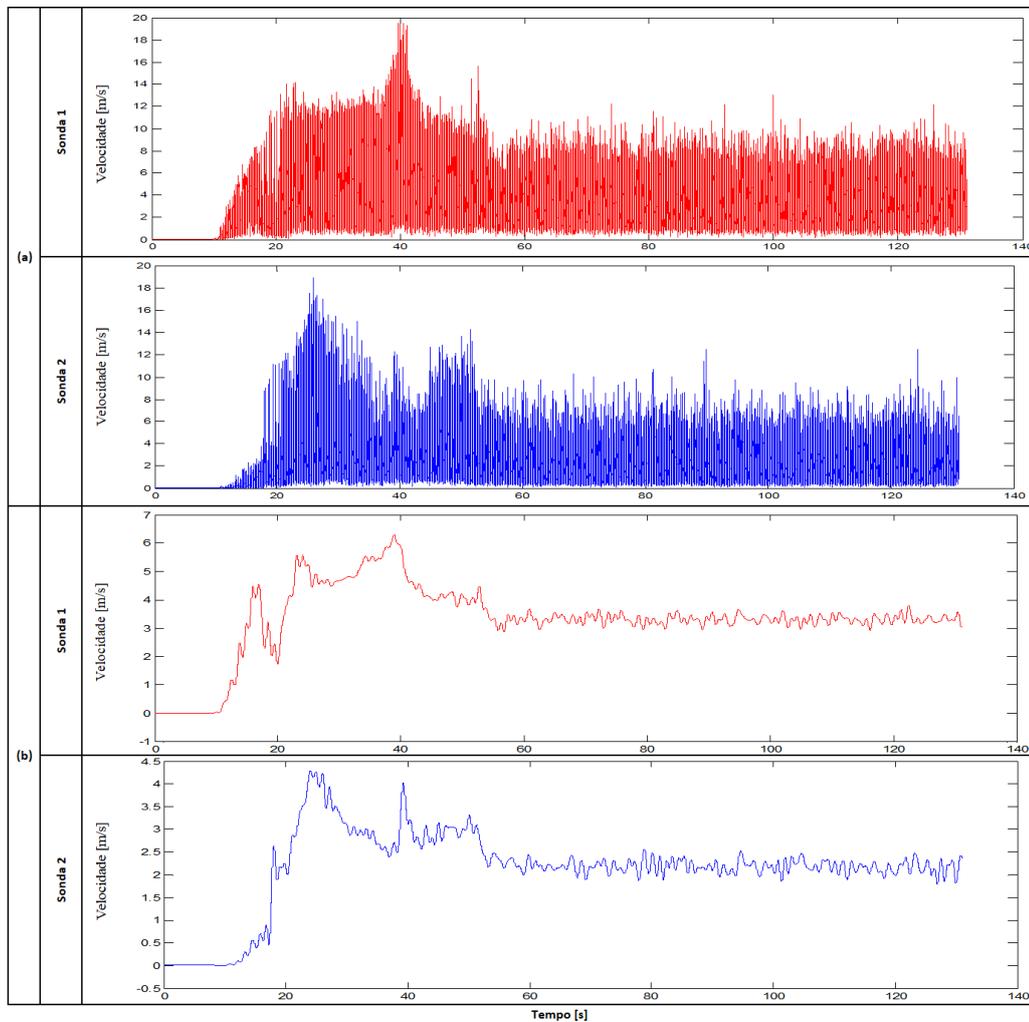


Figura 5.30 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

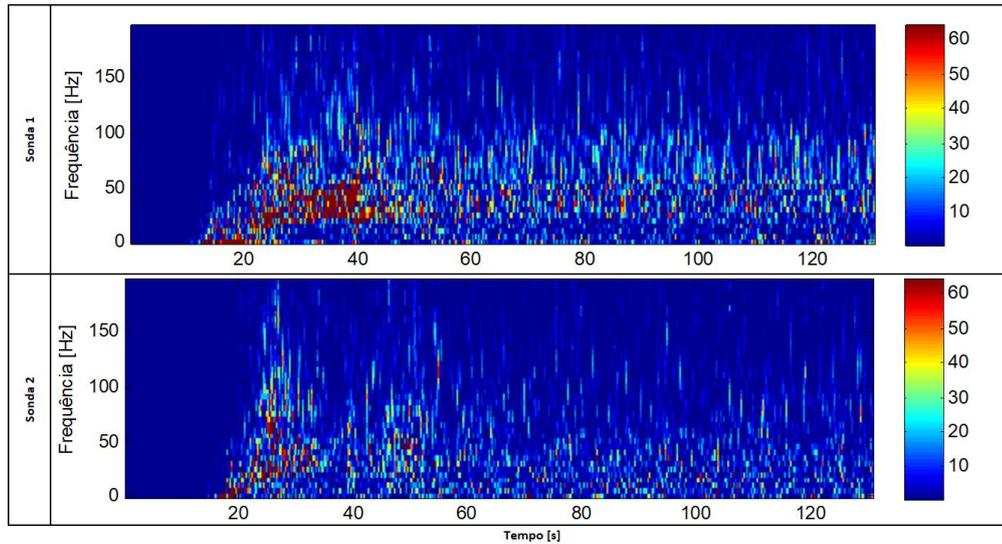


Figura 5. 31 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

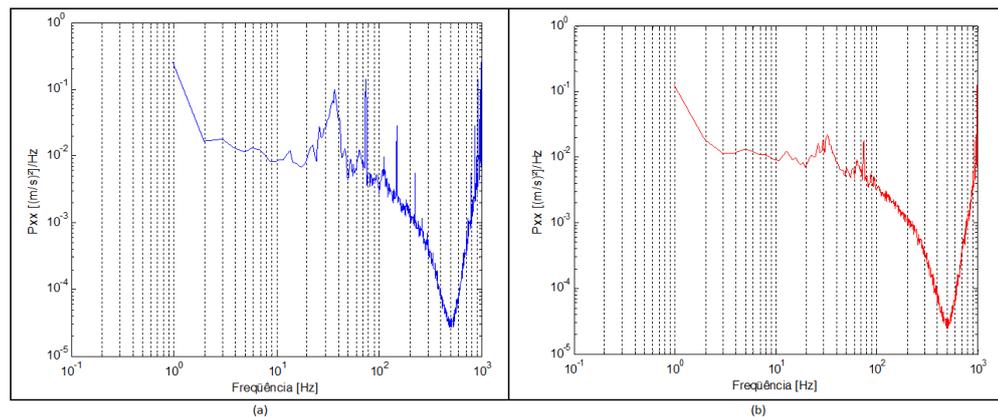


Figura 5. 32 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

A Figura 5.33a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para Reynolds de $1,87 \times 10^4$ e velocidade de referência é 11,24 m/s. A Figura 5.33b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas.

Novamente observamos um grande pico de velocidade inicial seguido por uma série de oscilações. Mas, diferentemente da avaliação anterior, até a metade do experimento podemos visualizar oscilações com altas velocidades e quando o perfil de velocidades se estabiliza, da metade para o final, as velocidades reduzem.

Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.33a são mostrados na Figura 5.34. A Figura 5.35 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.33a, obtidos através da função densidade espectral de potência. O resultado apresenta um pico bem definido e uma série de harmônicos em sequência

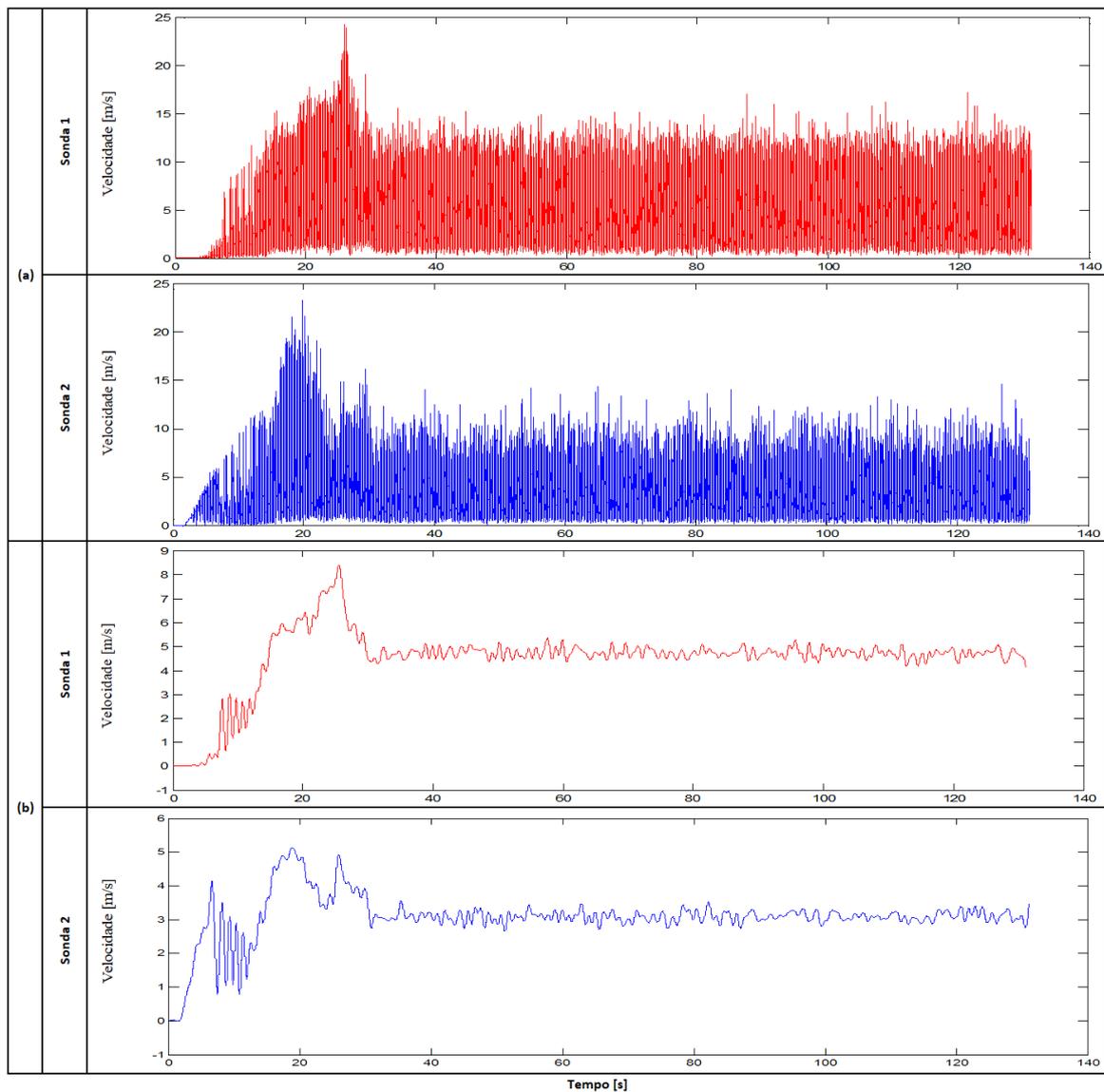


Figura 5. 33 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

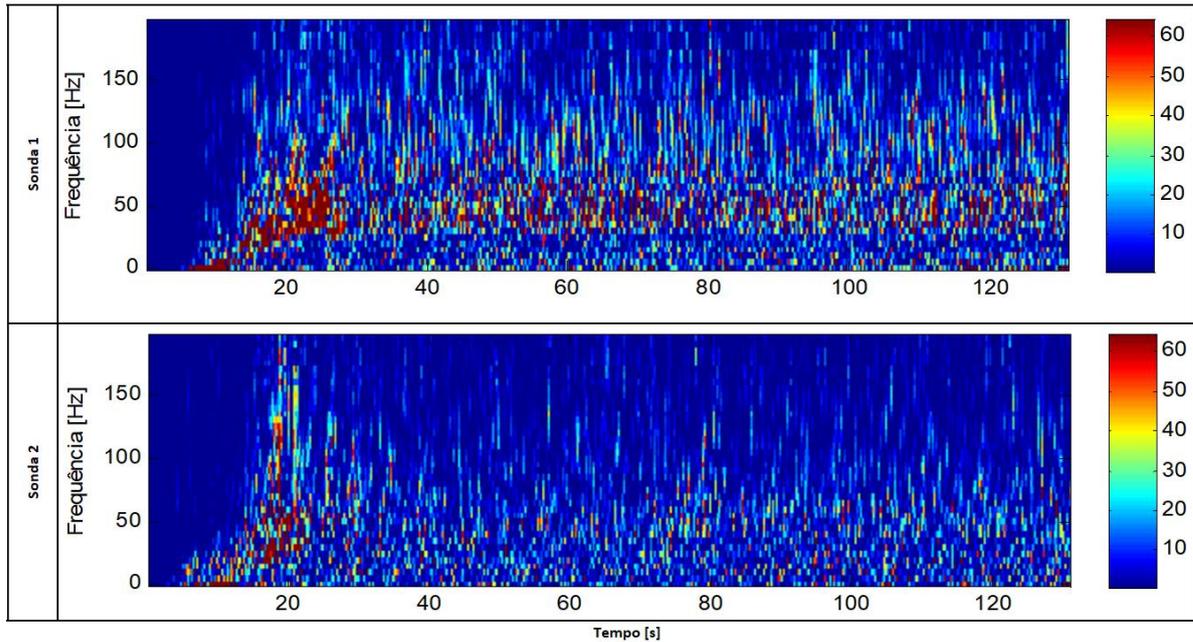


Figura 5. 34 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

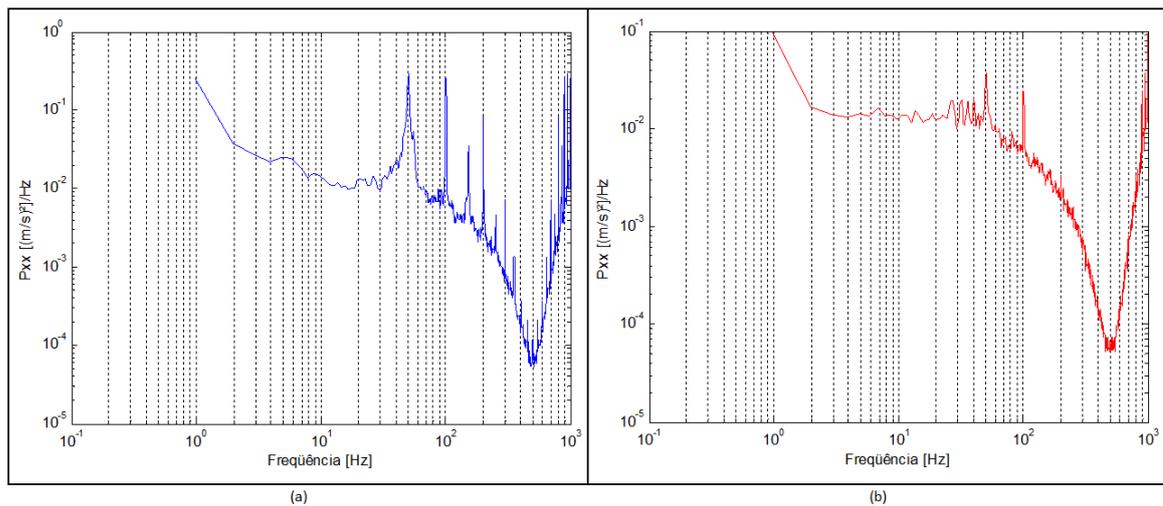


Figura 5. 35 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

A Figura 5.36a mostra os sinais de velocidade instantânea obtidos para Reynolds de $2,763 \times 10^4$ e velocidade de referência é 16,63 m/s. A Figura 5.36b, apresenta a reconstrução deste sinais através de transformada discreta de ondaletas. Nesta ultima condição avaliada, novamente encontramos um pico de velocidade inicial, mas logo em seguida a velocidade estabiliza sem apresentar grandes oscilações.

Os espectrogramas gerados através de transformada contínua de ondaletas dos sinais de velocidade da Figura 5.36a são mostrados na Figura 5.37. A Figura 5.38 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.36a, obtidos através da função densidade espectral de potência.

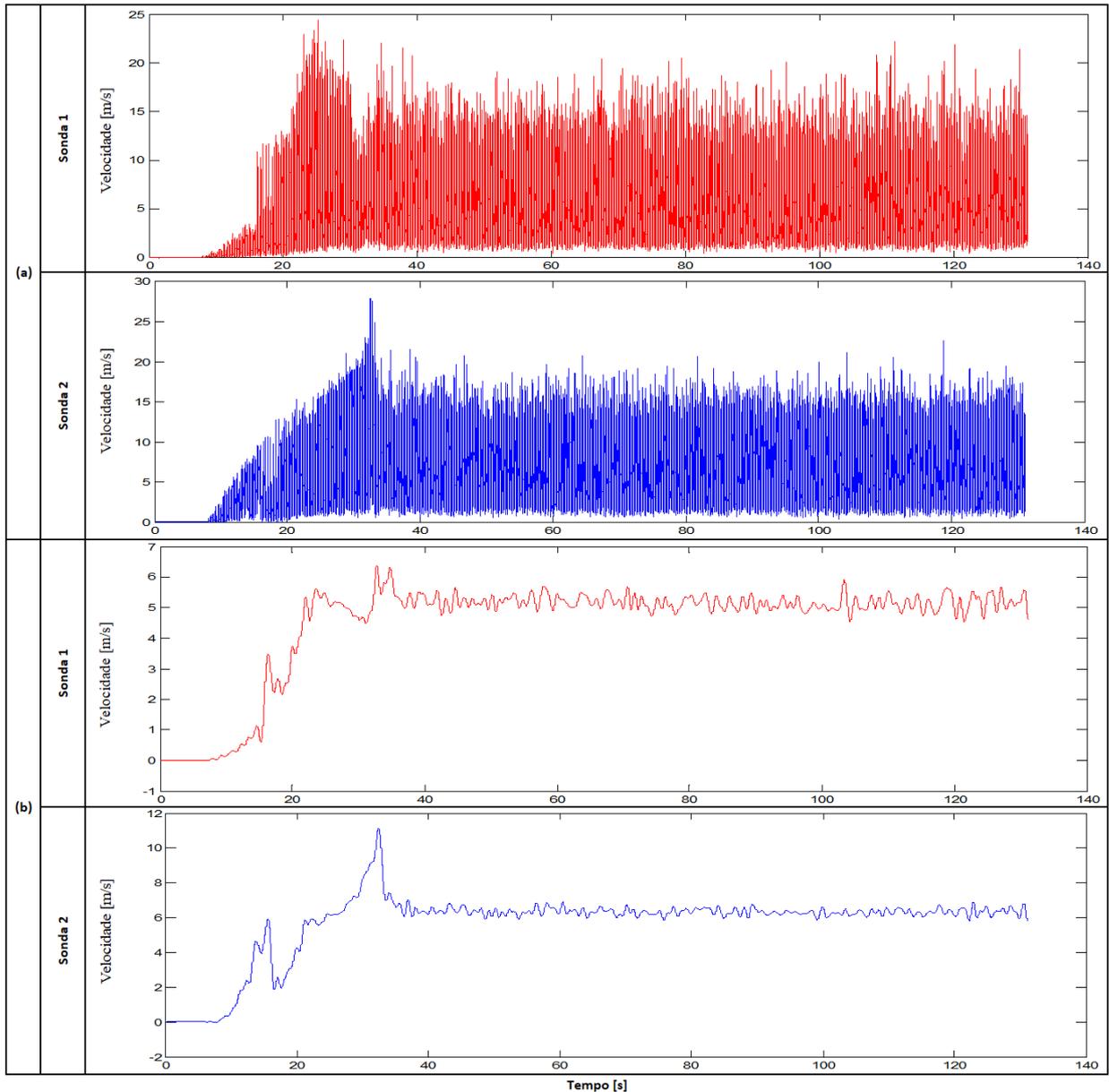


Figura 5. 36 – (a) Sinais de velocidades instantâneas. (b) Reconstrução dos sinais de velocidades instantâneas através de transformada discreta de ondaletas.

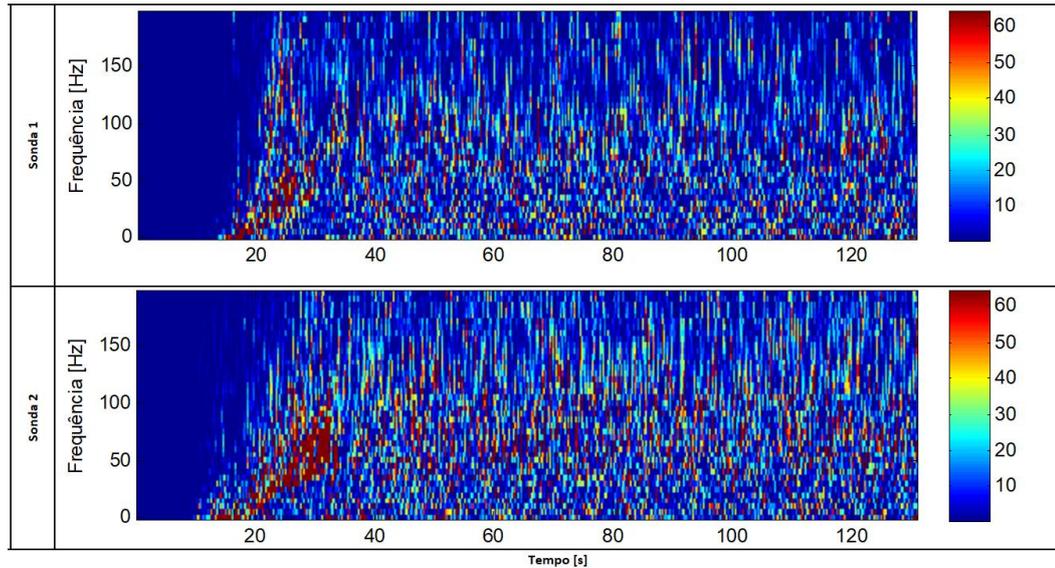


Figura 5. 37 – Espectrogramas dos sinais de velocidades instantâneas.

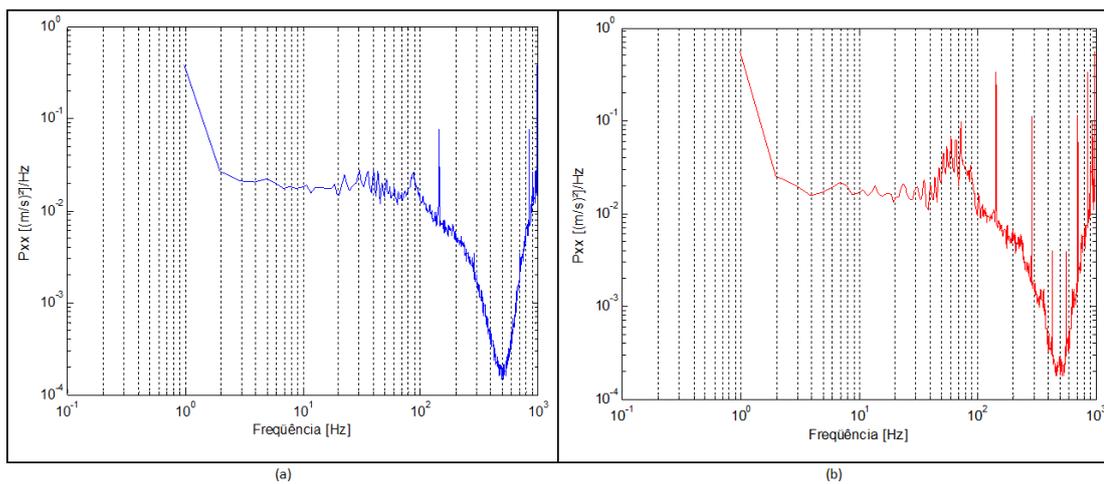


Figura 5. 38 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade. (a) Sonda 1, (b) Sonda 2.

5.4 Força de arrasto e momento de rolamento

Nesta seção serão apresentadas as medições de flutuações das forças de arrasto e momento de rolamento as quais são originadas pela interação, fluido (ar) e estrutura (tubos), no canal aerodinâmico. Os dados obtidos da medição no túnel foram tratados com o uso de ferramentas matemáticas. A investigação experimental consiste de ensaios de cilindros rígidos montados em uma base, submetidos ao escoamento permanente de ar no canal. No momento

do experimento, as base esta livre para rotacionar. Esta base tem um eixo parte superior e inferior, com mancais de rolamentos que possibilitam o movimento rotacional ou oscilatório dos tubos. O objetivo é correlacionar os modos de desprendimento de vórtices do fenômeno da biestabilidade de tubos rígidos com aqueles que apresentam movimento rotacional e consequentemente geram momento torçor na estrutura elaborada.

Mantém-se a relação de espaçamento de $p/d = 1,26$, frequência de aquisição de 1000 Hz e 2^{17} (131072) pontos. Os números de Reynolds dos experimentos variam de $8,979 \times 10^3$ a $2,763 \times 10^4$ e a velocidade de referência de 5,4 m/s a 16,6 m/s respectivamente. Para a aquisição dos resultados, para cada Reynolds utilizado, aguardou-se 2 minutos até a homogeneização do escoamento.

A Figura 5.39 apresenta os resultados de força em função de tempo e a reconstrução destes sinais através de transformada discreta de ondaletas para os dois tubos livres para rotacionar acoplados na célula de carga. Sendo: Figura 5.39a para Reynolds $1,80 \times 10^4$ e velocidade igual a 10,8 m/s; Figura 5.39b para $Re = 2,30 \times 10^4$ e velocidade igual a 13,86 m/s; Fig. 5.39c para $Re = 2,74 \times 10^4$ e velocidade igual a 16,48 m/s;

É possível observar que para os dois menores números de Reynolds, o escoamento aparenta não ter força suficiente para apresentar o comportamento biestável. O comportamento não é oscilatório. Já para $Re = 2,74 \times 10^4$ o comportamento biestável é notado não variação de força. Muito similar ao apresentado nos resultados com anemometria.

A Figura 5.40 mostra os espectros de flutuação dos dois sinais de velocidades da Figura 5.25a, obtidos através da função densidade espectral de potência. Sendo: Figura 5.40a para Reynolds $1,80 \times 10^4$ e velocidade igual a 10,8 m/s; Figura 5.40b para $Re = 2,30 \times 10^4$ e velocidade igual a 13,86 m/s; Figura 5.40c para $Re = 2,74 \times 10^4$ e velocidade igual a 16,48 m/s;

Igualmente ao apresentado nos resultados para força, o ultimo resultado, que representa o maior número de Reynolds, é mais claro em relação aos dois anteriores. Apresentando picos de energia mais claros.

Com a necessidade de avaliar a força solicitada para cada frequência de rotação, aplica-se a Equação (5.1).

$$F = (75,1 + 35,58f - 1,354f^2) \cdot 10^{-3} \cdot g \quad (5.1)$$

O comprimento da alavanca (medida entre centro de giração a linha média dos extensômetros) é 32,5mm logo o torque é dado pela Equação (5.2).

$$T = 75,1 \cdot 10^{-3} + 35,58 \cdot 10^{-3}f - 1,354 \cdot 10^{-3} f^2 \quad (5.2)$$

Usualmente em estudos de escoamentos usa-se o número de Reynolds para ter um valor de referência e possibilitar que demais ensaios análogos possam ser comparados, além é claro de caracterizar o regime de escoamento. Assim realizou-se a medição da pressão atmosférica, temperatura no laboratório e diferencial de pressão no tubo de Pitot. Com estas medições, os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1– Medições de Pressão, Velocidade, Reynolds, Força e Torque.

f	Pd[pa]	V[m/s]	Re	F[cN]	T[N.mm]
40	1.38	10,81	17964,62	-0,65807	-21,387
50	1.0	13,86	23038,39	-1,50446	-48,895
60	0.4	16,48	27384,08	-2,61387	-84,9509

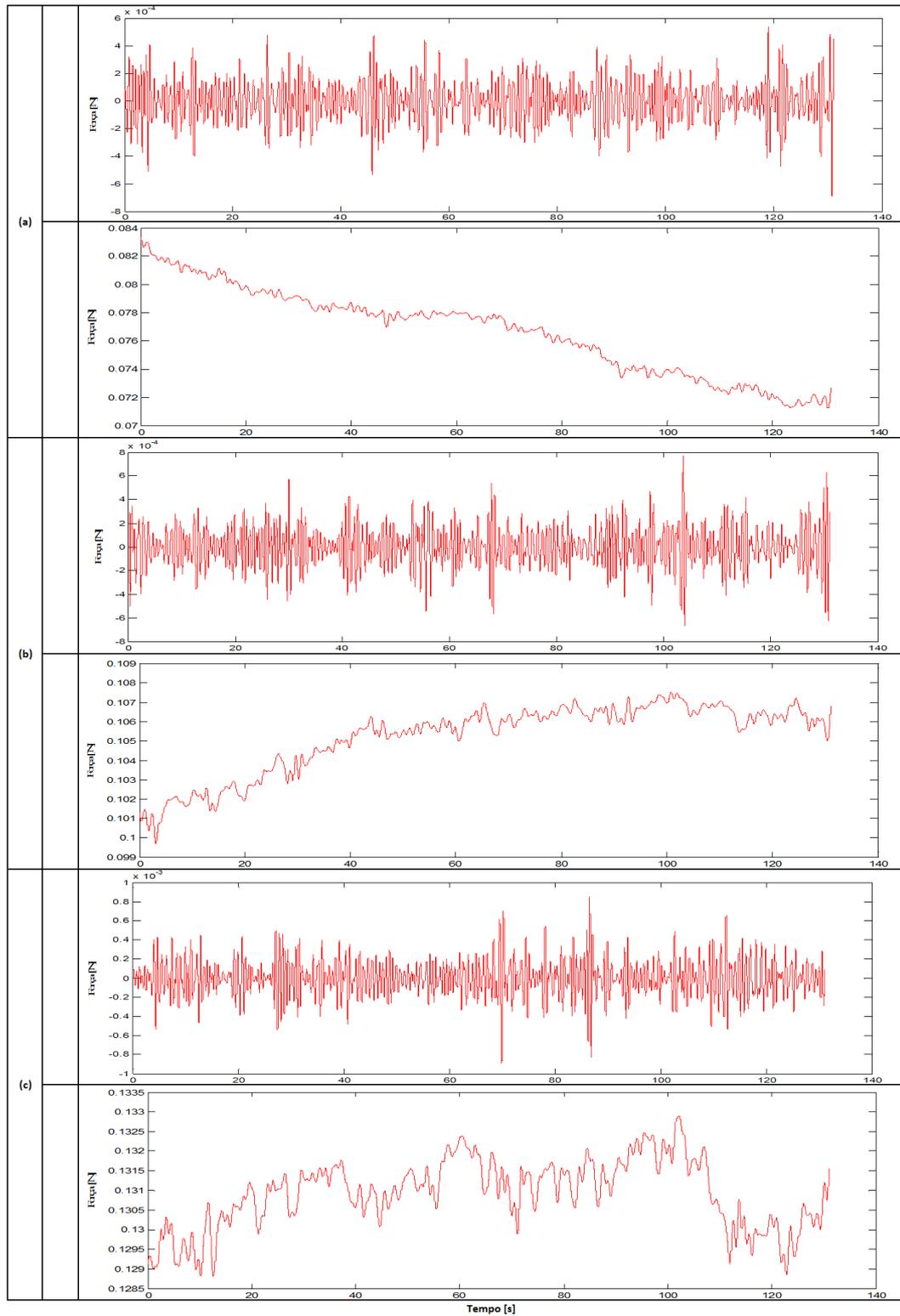


Figura 5.39 – Sinais de Força e a reconstrução dos sinais através de transformada discreta de ondaletas. (a) $\text{Re}: 1,80 \times 10^4$, (b) $\text{Re}: 2,30 \times 10^4$, (c) $\text{Re}: 2,74 \times 10^4$.

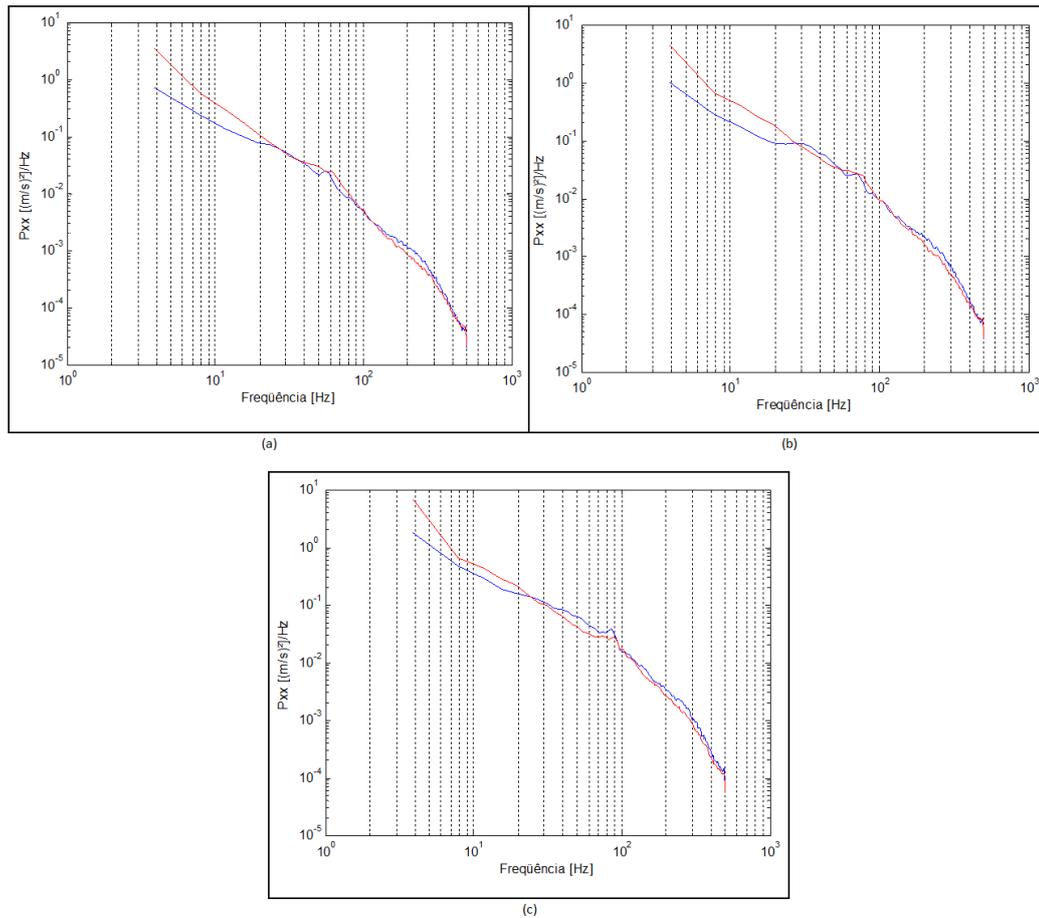


Figura 5.40 – Densidades espectrais de potência das flutuações de velocidade.

(a) $Re: 1,80 \times 10^4$, (b) $Re: 2,30 \times 10^4$, (c) $Re: 2,74 \times 10^4$.

5.5 Visualização

Visando melhor compreender os fenômenos medidos em laboratório, utilizou-se da técnica de visualização, para demonstrar o comportamento dos tubos quando liberados para rotacionar ou oscilar. Para esse estudo no programa Phantom Camera Control, versão 2.3, a resolução do sensor de imagem da câmara é ajustado para 128x400 pixels, que permite uma taxa de aquisição de 40.000 imagens por segundo (tempo entre imagem de 0,025 ms). A câmara foi posicionada a 45° em relação ao eixo do canal aerodinâmico. Isso é necessário para que a câmara não seja movimentada ou danificada pelo escoamento do canal.

As visualizações foram desenvolvidas com número de Reynolds variando de $8,79 \times 10^4$ a $2,76 \times 10^4$. Sendo que para números de Reynolds menores que $1,39 \times 10^4$, o escoamento não teve força suficiente para ocasionar movimento oscilatório ou rotacional no dispositivo. O

dispositivo é mantido estático durante dois minutos para que o escoamento seja estabilizando. Posteriormente é liberado e inicia-se a visualização.

A Figura 5.41 apresenta as imagens capturadas pela câmera para $Re = 1,39 \times 10^4$ e o resultado desta interação fluido estrutura no dispositivo montado com os dois tubos. A velocidade atingida para este número de Reynolds é de 8,36 m/s. O dispositivo inicia uma rotação em sentido anti-horário até atingir 20° com tempo 00:04 segundos. Após atingir esta posição, o dispositivo muda sua direção, tornando a girar em sentido horário até atingir -35° com tempo 00:06s e novamente muda seu sentido até atingir 45° . Esta oscilação se repete em mais um ciclo até atingir 60° com tempo 01:06min. A partir deste instante, a força imposta pelo escoamento não permite que ela novamente mude de sentido de rotação, causando uma leve redução de velocidade de rotação seguida pelo atingimento de 90° de rotação com tempo 01:34min e posterior início de rotação em sentido horário.

A Figura 5.42 apresenta as imagens capturadas pela câmera para $Re = 2,76 \times 10^4$ com velocidade de 8,36 m/s. O dispositivo também inicia uma rotação em sentido anti-horário como na avaliação anterior, mas atinge 30° com tempo 00:06 segundos. O sentido do início da oscilação é algo que varia de visualização para visualização, sem manter um padrão sequencial. Este desestabilização e rotação horária ou anti-horária de forma aleatória é algo ainda desconhecido, mas que pode ser ocasionado por alguns fatores como desalinhamento entre os tubos, não perpendicularidade do dispositivo com o escoamento ou alguma formação desconhecida do escoamento no interior do canal aerodinâmico. De todo o modo, a biestabilidade não tem, também um padrão de desvio do escoamento, o que deve ser levado em consideração na análise do sentido de rotação.

Após atingir a primeira posição de oscilação, o dispositivo muda sua direção, tornando a girar em sentido horário até atingir -35° com tempo 00:13s e novamente muda seu sentido até atingir 46° . Neste instante, inicia-se a rotação em sentido horário até atingir 55° em 00:31s. Posteriormente, a força imposta pelo escoamento não permite que ela novamente mude de sentido de rotação, causando uma leve redução de velocidade de rotação seguida pelo atingimento de 90° de rotação com tempo 00:53s e novamente inicia-se a rotação em sentido horário, mantendo-se neste sentido de forma inalterada.

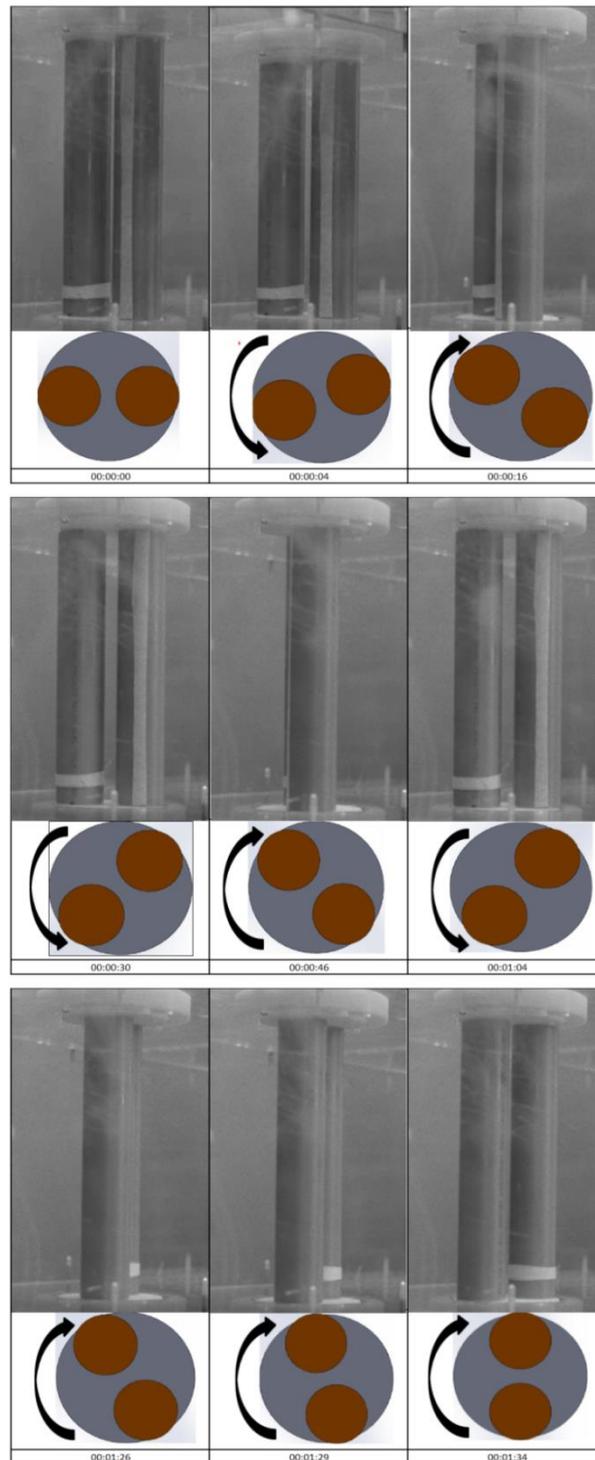


Figura 5.41 – Visualização com $Re = 1,39 \times 10^4$.

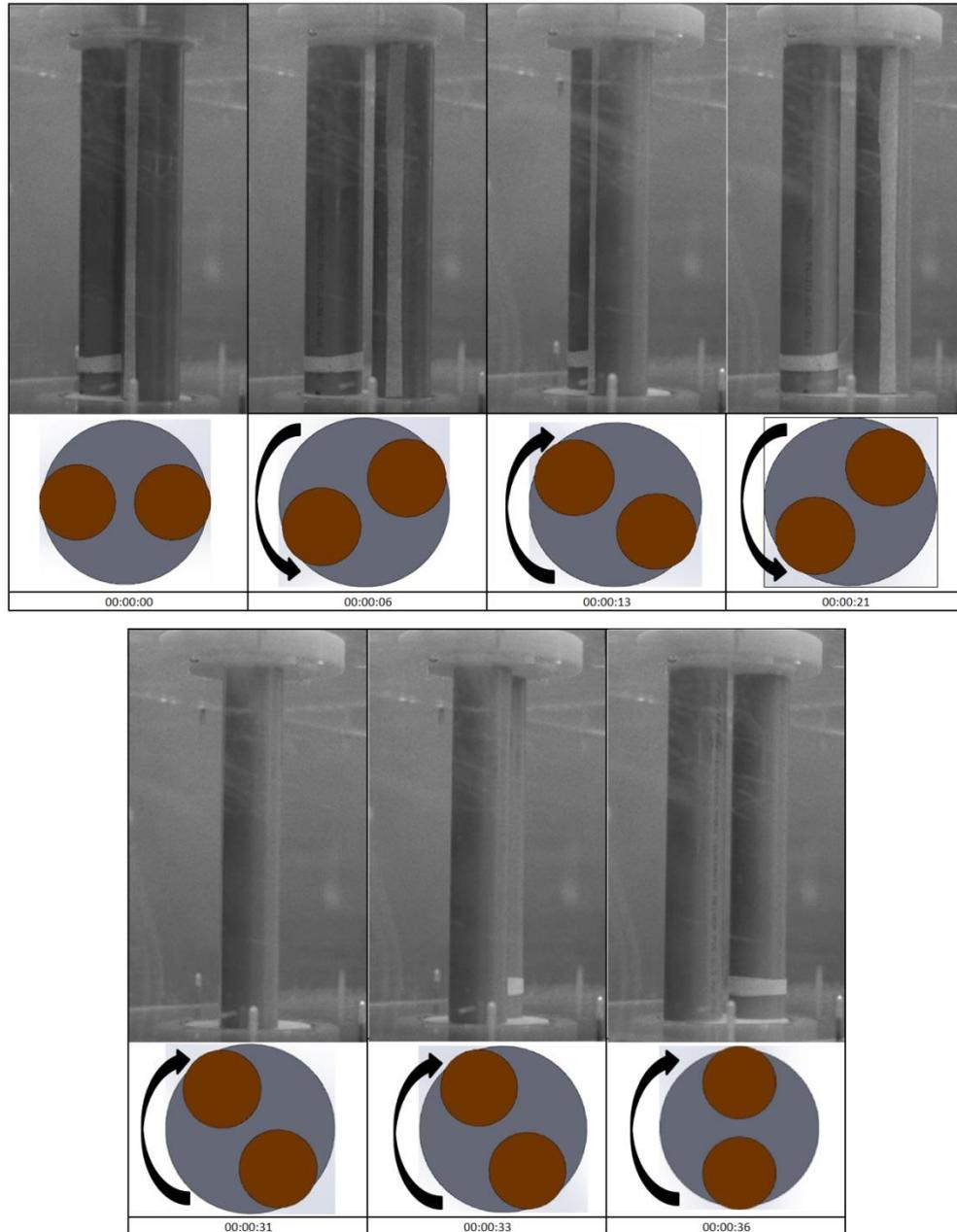


Figura 5.42 – Visualização com $Re = 2,76 \times 10^4$

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, diferentes técnicas são empregadas na análise de séries temporais experimentais oriundas de um fenômeno altamente não-estacionário: a biestabilidade. Foi investigado os comportamentos do escoamento sobre dois cilindros paralelos com razão de espaçamento de 1,26. Foram avaliados os mecanismos de troca de modos de esteiras nas ocorrências de biestabilidade, a formação assimétrica das esteiras e o comportamento das flutuações de velocidade. As diferentes técnicas empregadas visam obter condições para melhor entender o comportamento não-estacionário do fenômeno, onde as abordagens clássicas não permitem uma descrição completa da biestabilidade.

A variação dos patamares de velocidade observados no ponto de monitoramento entre cilindros, durante a troca biestável, foi verificada experimentalmente. Os resultados da análise das séries experimentais estudadas mostram que o escoamento, quando se estabelece em um de seus modos, apresenta características probabilísticas bem preservadas ao longo do tempo em que este modo está estabelecido. Este comportamento é visível na série contendo as médias e flutuações de velocidade. A variação da velocidade é apenas influenciada pelo comportamento das esteiras que mudam o ponto de desprendimento dos vórtices e isto altera a velocidade da fenda.

As transformadas de ondaletas se mostram ferramentas úteis na análise deste fenômeno não-estacionário. O uso da transformada discreta de ondaletas auxilia na análise dos dados por intermédio da reconstrução até uma banda específica de frequência, servindo como filtro passa-baixa. Através da transformada contínua de ondaletas o conteúdo de energia dos sinais pode ser analisado. Os resultados mostram um aumento da energia das séries de velocidade nos instantes de tempo em que a velocidade média é mais alta, com um relativo espalhamento das frequências. Quando o escoamento da fenda muda de direção, para o patamar de velocidade média mais baixa, há uma diminuição do conteúdo de energia do sinal acompanhado por uma maior concentração da faixa de frequências e também menores valores de flutuação. Este comportamento indica que a esteira larga de vórtices possui uma concentração maior em frequência, porém com menor energia total. Na análise dos espectros, um ponto importante observado, foi que em todas as avaliações foi encontrado pequenos picos que sempre correspondiam a Strouhal 0,13.

Os dados levantados pelo sistema de medição de força, demonstram uma frequência de elevada amplitude próxima a 8Hz para escoamentos com alto número de Reynolds pode ser comparada com as frequências de desprendimento de vórtices. O mecanismo foi eficaz na medição das forças originadas pelos desprendimentos de vórtices e possibilitará o desenvolvimento de demais estudos para comparação e otimização do sistema bem como a medição simultânea das velocidades com anemometria de fio quente.

Na técnica de visualização, foi possível observar um fenômeno, até então, desconhecido. Um comportamento oscilatório é desenvolvido até que a força para iniciar a rotação seja atingida. Este comportamento é totalmente aleatório, podendo o dispositivo oscilar e rotacionar em diferentes direções sem um padrão pré-determinado. Este movimento oscilatório pode ser relacionado à biestabilidade, pois não apresenta nenhum padrão de início e um perfil oscilatório (trocas de modo) durante o movimento.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

O fenômeno da biestabilidade ainda possui muitos detalhes que precisam ser entendidos e esclarecidos, desta forma para trabalhos futuros sugere-se:

- O estudo numérico e experimental do processo rotacional (interação cilindro girante e escoamento).
- Análise para diferentes p/d para apresentar melhores detalhes do fenômeno oscilatório. Visto que, observou-se, para um p/d um pouco maior, uma maior oscilação do dispositivo e um paralelismo dos tubos com o escoamento, sem acontecer a rotação.
- Estudo experimental da influência da parede do canal no desprendimento de vórtices dos cilindros utilizando flutuações de pressão e velocidade.
- Análise da possibilidade de extração de energia de um dispositivo similar ao desenvolvido, podendo até ser realizada uma comparação com um projeto de turbina eólica.

7 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**, v. 18, n. 3–4, p. 325–346, 2003.

Alam, M. M.; Zhou, Y. Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. **Journal of Fluids and Structures**, v. 23, n. 5, p. 799–805, 2007.

Alam, M. M.; Zhou, Y. Intrinsic features of flow around two side-by-side square cylinders. **Physics of Fluids**, v. 25, n. 8, p. 085106, 2013.

Alam, M. M.; Zhou, Y.; Wang, X. W. The wake of two side-by-side square cylinders. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 669, p. 432-471, 2011.

ANSYS; **ANSYS Fluent Theory Guide**, Release 15.0, 2013, ANSYS, Inc.

Bazus. mf drill xy Tables for drilling machines. Acesso em: 12 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.bazus.com/fixed-crosstable/mf-drill-xy-tables-for-drilling-machines/>>.

Blevins, R. D. **Flow-Induced Vibration**. Second Edition, Van Nostrand Reinhold, Nova Iorque, 1990.

DANTEC. **Basic Guide DANTEC**. , 2004.

de Paula, A. V. **Estudo sobre o fenômeno da biestabilidade de escoamentos turbulentos em bancos de tubos de arranjo triangular**, Dissertação de Mestrado, PROMEC – UFRGS, 2008.

de Paula, A. V. **Determinação de parâmetros que caracterizam o fenômeno da biestabilidade em escoamentos turbulentos**, Tese de Doutorado, PROMEC – UFRGS, 2013.

de Paula, A. V.; Endres, L. A. M.; Möller, S. V. Bistable features of the turbulent flow in tube banks of triangular arrangement. **Nuclear Engineering and Design**, v. 249, p. 379-387, 2012.

de Paula, A. V.; Möller, S. V. Finite mixture model applied in the analysis of a turbulent bistable flow on two parallel circular cylinders. **Nuclear Engineering and Design**, v. 264, p. 203–213, 2013.

Endres, L. A.; Möller, S. V. Looking for correct dimensionless parameters for tube-bank flow analysis. **Journal of Fluids and Structures**, v. 15, p. 737-750, 2001.

Freire, A. P. S.; Menut, P. P. M.; Su, J. **Turbulência**, v. 7 p. 1-25 e 36-49, Rio de Janeiro, Brasil: ABCM, 2002.

Gao, Y.; Yu, D.; Tan, S.; Wang, X.; Hao, Z. Experimental study on the near wake behind two side-by-side cylinders of unequal diameters. **Fluid Dynamics Research**, v. 42, n. 13, p. 055509, 2010.

Gerrard, J. H. The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 25, n. 02, p. 401–413, 1966.

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.

Holman, J. P. **Experimental methods for engineers**. Mc Graw Hill Book Company, Nova Iorque, 8o ed., 2012.

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, n. 17–19, p. 1875–1887, 2005.

Indrusiak, M. L. S.; Möller, S. V. Wavelet analysis of experimental turbulence time series. **IV Escola Primavera de Transição e Turbulência**, 2004.

Ishigai, S.; Nichikawa, E. Experimental Study of Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow Part II. **The Japan Society of Mechanical Engineering**, v. 18, n. 119, p. 528–535, 1975.

Ishigai, S.; Nichikawa, E.; Nishimura, K.; Cho, K. Experimental Study on Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow. Part I. **The Japan Society of Mechanical Engineering**, v. 15, n. 86, p. 949–956, 1972.

Keogh, D.; 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, p. 98-108, 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.

Klein, M.; Meyers, J.; Geurts, B. J. Assessment of LES quality measures using the error landscape approach. **Quality and Reliability of Large-Eddy Simulations**, v. 12, p. 131-142, 2008.

Lam, K.; Zou, L. Experimental study and large eddy simulations. **Heat and fluid flow**, v. 30, p. 276-285, 2009.

Maliska, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, 2ª edição, Rio de Janeiro, 1995.

Mansur, S.; Silveira Neto, A. **Turbulência**, v. 7, ABCM, Rio de Janeiro, 2010.

Meneghini, J. R. Mecânica da geração e desprendimento de vórtices no escoamento ao redor de cilindros. **Anais III Escola de Primavera Transição e Turbulência**, 2002.

Menter, F.; Egorov, Y. Revisiting the Turbulent Scale Equation. **Symposium on one hundred years of boundary layers research**, p. 279–290, 2005.

Moffat, R. J. Describing the uncertainties in Experimental Results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 1, p. 3-17, 1988.

Möller, S. V. Experimentação em Turbulência. **Anais II Escola de Primavera Transição e Turbulência**, 2000.

NASA – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço. Examining Spatial (Grid) Convergence. Acesso em: 18 de junho de 2015. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>>

Neumeister, R. B. **Análise numérica e experimental turbulenta no escoamento transversal sobre cilindros paralelos com razão de espaçamento 1,26**, Dissertação de Mestrado, PROMEC – UFRGS, 2015.

Olinto, C.; Indrusiak, M. L. S.; Endres, L. A.; 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.

Olinto, C.; Möller, S. V.; Indrusiak, M. L. S. Experimental Study of the Bistable Flow in Tube Arrays. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering**, v. XXVIII, n. 2, p. 234-241, 2006.

Oruç, V.; Atakan Akar, M.; Akilli, H.; Sahin, B. Suppression of asymmetric flow behavior downstream of two side-by-side circular cylinders with a splitter plate in shallow water. **Measurement**, v. 46, n. 1, p. 442–455, 2013.

Roache, P. J. Perspective: A method for uniform reforming of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, p. 405-413, 1994.

Silvestrini, J. H.; Möller, S. V. **Turbulência Vol:4**, p. 5-26, ABCM, Rio de Janeiro, 2004.

Souza, J. F. A.; Oliveira, L. R.; Azevedo, J. L. L.; Soares, I. D.; Mata, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011.

Sumner, D. Two circular cylinders in cross-flow: A review. **Journal of Fluids and Structures**, v. 26, n. 6, p. 849–899, 2010.

Sumner, D.; Wong, S. S. T.; Price, S. J.; Paidoussis, 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**. MIT Press, Massachusetts, 1972.

Traverstool. Medidor de alturas Mitutoyo. Acesso em: 12 de setembro de 2015. Disponível em: <http://www.traverstool.com.mx/hp_169/57-015-881.html>.

Wang, Z. J.; Zhou, Y. Vortex interactions in a two side-by-side cylinder near-wake. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 26, n. 3, p. 362–377, 2005.

Williamson, C. H. K. Evolution of a single wake behind a pair of bluff bodies. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 159, p. 1-18, 1985.

Xu, S. J.; Zhou, Y.; So, R. M. C. Reynolds number effects on the flow structure behind two side-by-side cylinders. **Physics of Fluids**, v. 15, n. 5, p. 1214-1219, 2003.

Zdravkovich, M. M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements. **Journal of Fluids Engineering**, p. 618-633, 1977.

Zdravkovich, M. M. **Flow Around Circular Cylinders Vol 2: Applications**. Oxford University Press, Nova Iorque, 1997.

APÊNDICE A - Incerteza de Medição

A análise de incertezas é muito importante na avaliação experimental e existem vários métodos disponíveis, mas segundo Holman (2012) o método desenvolvido por Kline e McClintock é o mais preciso, pois é baseado na especificação das incertezas das medições primárias envolvidas no experimento, das quais a variável final é dependente como apresenta-se na relação:

$$R_i = R_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{A.1})$$

A representação das incertezas dependentes de várias variáveis é descrito por Moffat (1988) e nesta abordagem gera a incerteza propagada no valor medido, conforme descrito em:

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

Onde δx_i é a incerteza da variável x_i .

Para a aplicação do cálculo de incertezas das variáveis resolvidas executa-se a solução das derivadas utilizando o programa EES[®], que permite a entrada das variáveis e obtenção dos erros relacionados. Os equipamentos utilizados nas medições e as resoluções são indicados na Tabela A1.

Tabela A.1– Equipamentos e resoluções

Equipamento	Resolução	Unidade
Sensor de Temperatura	±0,1	°C
Barômetro	±0,5	mmHg
Paquímetro	±0,05	mm
Trena	±0,5	mm
Micromanômetro de coluna	±0,02	mmH ₂ O
Manômetro de coluna d'água	±1	mmH ₂ O
Transdutor de pressão no manômetro eletrônico	1%	mA
Multímetro digital de mão	±0,5%+4D	mA
Multímetro de Bancada	±0,3%+10d	mA

O erro associado na leitura de tensão por anemometria de fio quente é dado por:

$$iu = \left(\frac{\text{offset}}{1000} + 0,0005 \right) mV \quad (\text{A.3})$$

sendo que o offset é relativo ao acréscimo de tensão executado pelo sistema para ajustes no limite da placa de aquisição e varia em cada medição.

As medições de corrente do transdutor de pressão são executadas com manômetro de bancada ligado pela entrada Serial 232 do computador e com o uso do programa Multimeters-RS232 fornecido pelo fabricante Politerm. São executadas 1024 leituras para cada medição e desta série, obtém-se o valor médio utilizado no cálculo de pressão e o desvio padrão que é somado ao erro de medição calculado.

Para exemplificar o cálculo executado da propagação de incertezas apresenta-se a sequência de análises para a velocidade de referência obtida com o tubo de Pitot. Para o seu cálculo aplica-se a Equação (A.4), onde são necessários os valores de P_d e ρ , que por sua vez também são calculados a partir de variáveis primárias, conforme apresentado nas Equações (A5) e (A6).

$$u = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad (\text{A.4})$$

$$P_d = 25I - 100 \quad (\text{A.5})$$

$$\rho = \frac{P}{R_{ar} T_{ar}} \quad (\text{A.6})$$

Para o cálculo dos erros associados à u , é necessário obter primeiramente os erros de P_d e ρ então para a massa específica temos:

$$\delta\rho = \left\{ \left(\frac{\partial\rho}{\partial P} \delta P \right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T_{ar}} \delta T_{ar} \right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial R_{ar}} \delta R_{ar} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{A.7})$$

onde δP e δT são as resoluções dos instrumentos apresentadas na Tabela A1, δR é um valor tabelado e não há indicação de resolução e ao executarmos este cálculo chegamos ao valor de $\delta\rho$ que é associado ao valor de ρ .

Para o cálculo do erro associado ao valor de P_d a avaliação com as derivadas é a mesma, necessitando apenas da resolução na medida da corrente. Para obter a resolução é necessário associar dois instrumentos: o manômetro eletrônico e multímetro. O manômetro eletrônico possui um erro associado de 1% do valor lido, então se o valor lido é 9,408 mA o erro do manômetro fica 0,094 mA. O erro do multímetro é 0,5% + 4D, obtendo-se então (0,047 + 0,004) mA resultando em 0,051 mA. Associando as duas incertezas chega-se a: $\pm 0,145$ mA ou $\pm 1,54$ % de erro na medida de corrente elétrica e é esta a imprecisão inserida na equação:

$$\delta P_d = \left\{ \left(\frac{\partial P_d}{\partial i} \delta i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{A.8})$$

Desta forma permite-se o cálculo da incerteza na medição da velocidade

$$\delta u = \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial P_d} \delta P_d \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} \delta \rho \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

Aplicando as relações de derivadas das variáveis envolvidas e suas incertezas apresentada na Equação (A.2) de Re, St, velocidade referência, velocidade pelo anemômetro de fio quente, flutuações de velocidade e demais variáveis calculadas envolvidas obtém-se os erros apresentados no Quadro (A.1).

Quadro A-1– Erros associados aos dados experimentais.

Variável		Erro (%)
Massa específica	ρ	0,1
Viscosidade cinemática	ν	0,1
Pressão dinâmica	Pd	2-4
Número de Reynolds	Re	1 - 2
Número de Strouhal	St	8-10
Velocidade média (Pitot)	V	1 - 2
Tensão na velocidade 0 corrigido	$E0corr$	0,05
Tensão corrigida	$Ecorr$	0,05
Relação logarítmica das tensões	j	1,5
Logaritmo de Ureal	l	1,5
Coeficiente B	B	2
Coeficiente n	n	2
Velocidade obtida Anemometro	U	4 - 7
Flutuação de Velocidade	u'	6 - 9
Intensidade turbulenta	IT	2 - 4
Energia cinética turbulenta	k	12 - 15
Flutuações de pressão*	p'	2 - 4

*Incerteza de medição vinculada apenas à placa de aquisição, pois não foram encontrados parâmetros dos fabricantes que relacionavam a incerteza da leitura do equipamento.

O erro de posicionamento é obtido relacionando ao instrumento de medida utilizado. Para as medições maiores que 120 mm utiliza-se a trena de fita graduada curva para as medições sendo que a relação de erro é dada por:

$$em = \left(0,6 + \frac{L_m}{5000} \right) m \quad (\text{A.10})$$

Para as dimensões menores que 120 mm o paquímetro é aplicado e sua resolução é $\pm 0,05$ mm.

APÊNDICE B - Calibração de Sondas de Fio Quente

A sonda de fio quente não é um equipamento de medição primário e por este motivo é necessário calibrar a mesma antes de cada utilização. Segundo a Dantec (2004) a relação entre a velocidade e a tensão de correção da ponte de Wheatstone é exponencial e para criar a curva relativa às condições ambientais e do conjunto da sonda varia-se a velocidade do escoamento entre 0 m/s e 45 m/s em um bocal convergente, sendo que a sonda de fio quente está localizada no centro do bocal, conforme indicado na Figura B1. As velocidades são monitoradas por um tubo de Pitot aplicando 11 variações de velocidade, com o auxílio do inversor de frequências, e para cada valor de velocidade são obtidos os valores de pressão, da tensão gerada pela sonda de fio quente e da temperatura no canal aerodinâmico. Na medição da pressão utiliza-se o micro manômetro de coluna inclinada para valores de velocidades abaixo de 8 m/s, o manômetro eletrônico para a faixa entre 8 m/s e 20 m/s e o manômetro de coluna d'água aplicado na faixa entre 21 m/s e 45 m/s.

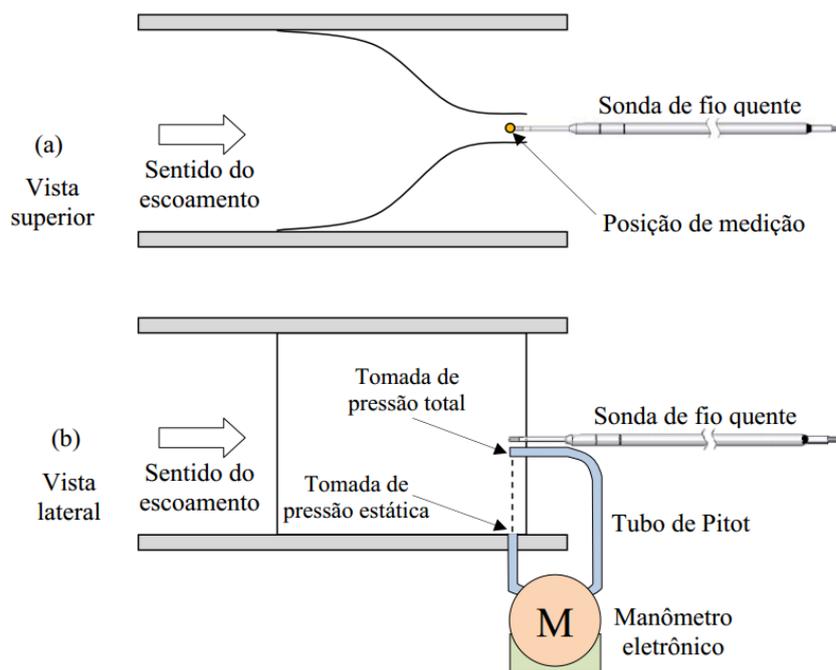


Figura B.1 - Dispositivo de calibração da sonda de fio quente, adaptado de Paula, 2013.

Antes da coleta das informações para a calibração executa-se a leitura da pressão no ambiente, com barômetro, e a temperatura no ambiente com o sensor de temperaturas. Os dados são coletados e aplicados nas relações abaixo para obtenção dos coeficientes, n e B , de conversão de tensão em velocidade. Inicialmente calcula-se a velocidade real aplicando:

$$u_{real} = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}} \quad (\text{B.1})$$

Onde P_d é a pressão dinâmica em Pa e ρ é massa específica do ar em kg/m³. Com u_{real} para cada uma das 12 velocidades, aplica-se os resultados em:

$$o = \ln(u_{real}) \quad (\text{B.2})$$

Depois disto, trabalha-se com os dados de tensão coletados em cada velocidade e executa-se a correção da tensão com a equação:

$$E_{corr} = E \left(\frac{1}{1 - 0,00245(T_m - T_c)} \right) \quad (\text{B.3})$$

com E é a tensão coletada em cada velocidade durante a calibração em V, T_m é a temperatura do meio no início da medição em °C e T_c é a temperatura média em todas as medições da calibração em °C. Calcula-se então a relação entre a tensão obtida em cada velocidade e a tensão na velocidade zero.

$$j = \ln(E_{corr}^2 - E_0^2) \quad (\text{B.4})$$

onde E_0 é a tensão na sonda com velocidade zero.

De posse das duas curvas de logarítmicos, o e j executa-se a análise da inclinação entre elas, que resulta no coeficiente n , e da exponencial da intercepção que indica o coeficiente B . De posse dos coeficientes e com o valor corrigido de E_0 , dado por:

$$E_{0corr} = E_0 \left(\frac{1}{1 - 0,00211(T_0 - T_c)} \right) \quad (\text{B.5})$$

pode-se executar o cálculo da velocidade para todos os pontos das séries de dados adquiridos com anemometria de fio quente.

$$U = \left(\frac{E_{corr}^2 - E_{0corr}^2}{B} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{B.6})$$

Uma planilha característica de calibração é apresentada no Quadro B.1, onde observam-se valores de T_m , T_0 e E_0 que são obtidos no início da medição, o valor de E_{0corr} calculado com a Equação (B.5). Os valores das 11 velocidades e suas respectivas pressões, tensões e temperaturas, juntamente com os resultados de E_{corr} , o , j e u_{real} .

Quadro B-1– Planilha padrão de calibração

Dados de entrada		Pressão [Pa]	E _{med} pela sonda [V]	T _c [°C]	E _{corr} [V]	U _{real} [m/s]	ln (E ² -E ₀ ²)	ln (U _{real})
Patm [mmHg]	754	5,88	1,807	19,25	1,8035	3,1354	0,1502	1,1427
TM [°C]	19,15	14,71	1,899	19,25	1,8954	4,9575	0,4066	1,6009
T0 [°C]	19,25	29,42	1,975	19,25	1,9712	7,0109	0,5850	1,9475
E0 [V]	1,448	60,5	2,071	19,35	2,0670	10,0622	0,7802	2,3088
E _{0corr} [V]	1,446	135,25	2,186	19,55	2,1818	15,0446	0,9820	2,7110
		238,25	2,274	19,65	2,2697	19,9678	1,1186	2,9941
		402,07	2,359	20,15	2,3545	25,9182	1,2392	3,2549
		519,75	2,406	20,35	2,4014	29,4680	1,3018	3,3833
		715,88	2,464	20,65	2,4593	34,5839	1,3756	3,5434
		941,43	2,509	20,95	2,5042	39,6596	1,4304	3,6803
		1245,44	2,565	20,85	2,5601	45,6158	1,4959	3,8203

Ao aplicar os valores de u_{real} em função de E_{corr} obtém-se a curva de calibração característica apresentada na Figura B.2, com formato exponencial

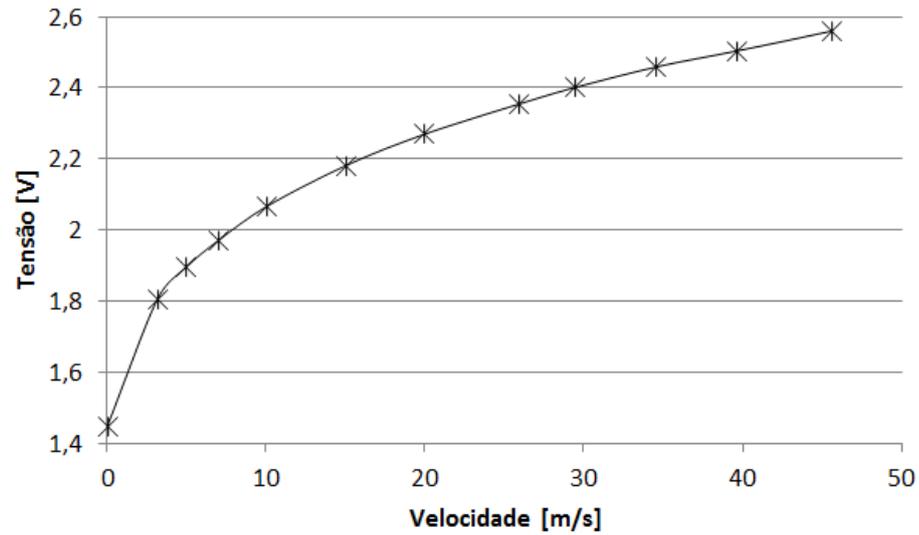


Figura B.2 – Curva característica de calibração.

Ao comparar os valores obtidos com a Equação (B.6) com os valores medidos com o tubo de Pitot e resultado da relação apresentada na Equação (B.1), calcula-se o erro entre os valores utilizando para cada ponto, resultando no erro em cada faixa de velocidades apresentado na Figura B.3.

$$Erro = \left(\frac{u_{real} - U}{u_{real}} \right) * 100 \quad (B.6)$$

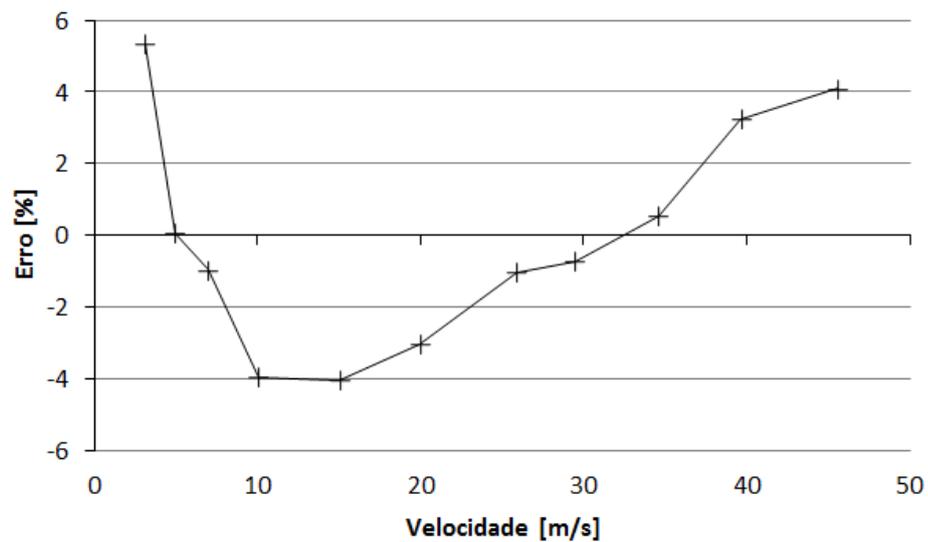


Figura B.3 – Curva característica de erro na calibração.

APÊNDICE C - Calibração da Célula de Carga

A calibração foi realizada com massas padrão com resolução de 1 grama e faixa de 0 a 10 gramas. A Figura 3.4 ilustra esta etapa do projeto. A Figura C.1 apresenta o método utilizado. As deformações obtidas para cada massa foram plotadas e são apresentadas na figura C.2.

O erro de linearidade calculado foi de 3,01% e a função de transferência resultou na Equação (C.1).

$$def = -25,13 + 54,01 \cdot m \quad (C.1)$$

onde def é a deformação aparente [μd] e m é a massa [g]

A sensibilidade da célula de carga é $54,01 \mu d/g$ com uma incerteza de medição tipo a de $\pm 0,04 \mu d$ e resolução de saída de $51,497 \mu d$. A calibração das resistências elétricas é apresentada na Figura C.3.



Figura C.1 – Calibração do elemento mola.

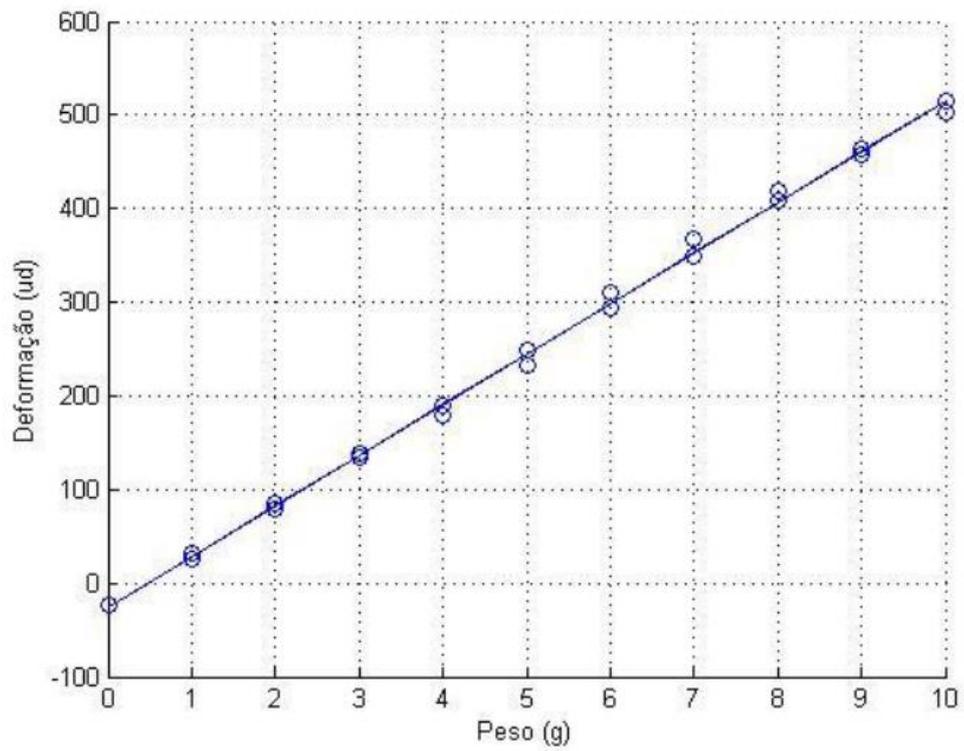


Figura C.2 – Calibração do elemento mola.

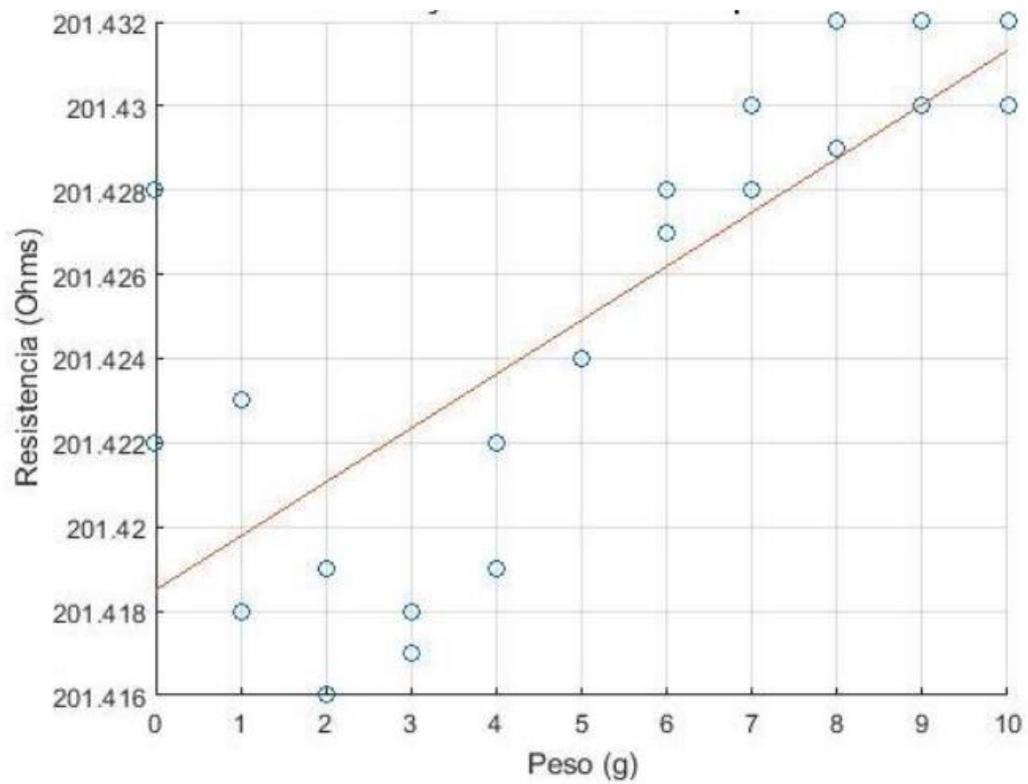


Figura C.3 – Medição da variação de resistências elétricas.

Obteve-se como erro de linearidade 0,005%, e função de transferência dada pela Equação (C.2).

$$R = 201,418 + 0,0013 \cdot m \quad (C.3)$$

onde R é a resistência elétrica [Ω].

A sensibilidade desta etapa foi de $0,0013 \Omega/g$, resolução de saída de $1,4m\Omega$ e incerteza de medição $\pm 30,14m\Omega$. A calibração do sistema de condicionamento da ponte é apresentada na figura C.4, com erro de linearidade de 6% e uma função de transferência dada pela equação C.3. A incerteza de medição desta etapa é de $\pm 30,14\mu V$, resolução de saída é de $315,3\mu V$ e sensibilidade de $38,3mV/g$.

$$V_p = -6,77 \cdot 10^{-4} + 3,83 \cdot 10^{-4} \cdot m \quad (C.3)$$

onde V_p é a tensão elétrica na saída da ponte [V].

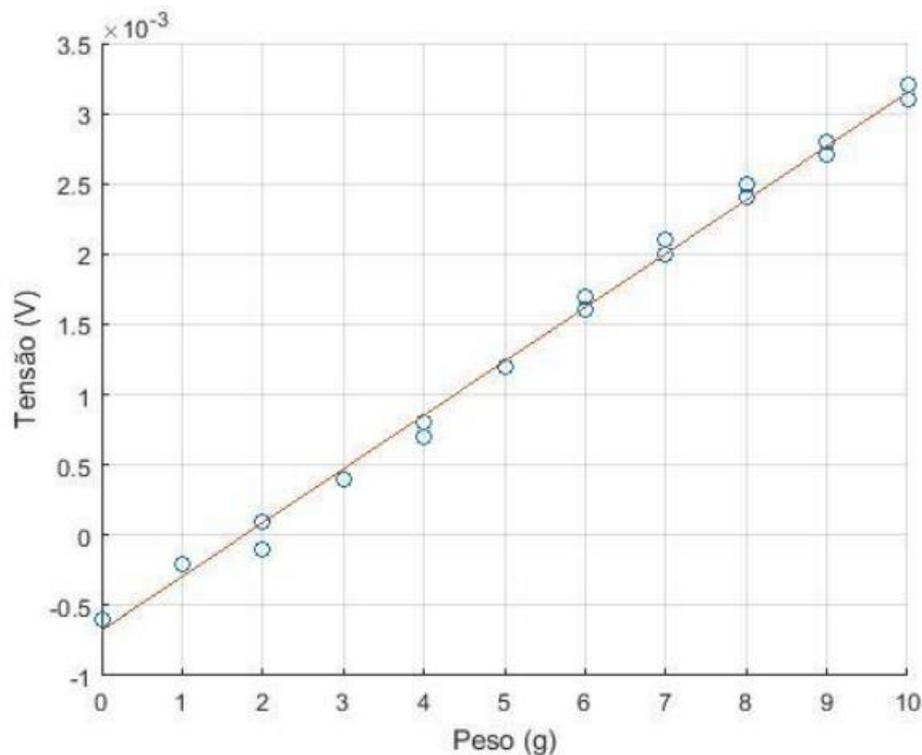


Figura C.4 – Medição da tensão elétrica na saída da ponte.