

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A DINÂMICA DE
UM PAR DE CILINDROS SUBMETIDOS A UM FLUXO
TRANSVERSAL UNIFORME EM ARRANJO ARBITRÁRIO**

JESUS DE ALENCAR MORAIS DE ALVARENGA

Dissertação apresentada à comissão do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Prof. Waldr Terra Pinto, Ph.D.

Rio Grande, Agosto de 2014

**UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A DINÂMICA
DE UM PAR DE CILINDROS SUBMETIDOS A UM FLUXO
TRANSVERSAL UNIFORME EM ARRANJO ARBITRÁRIO**

À minha esposa Maria Solete pelo amor,
companheirismo e dedicação e aos meus filhos Bruno e
Murilo, todos fundamentais em mais esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Waldir Terra Pinto pela orientação neste trabalho e pelo apoio e confiança depositados;

À Dra. Debora Martins Machado e a Jairo Fernando de Lima Coelho pela cooperação e auxílio na realização deste trabalho;

A todos da Prefeitura Universitária, representados por Jaci Alfredo Carvalho Alves que, devido a confiança, cooperação e apoio depositados, tornaram possível a realização desta dissertação;

Ao Laboratório de Termo Fluídico da Escola de Engenharia pelo suporte dado em equipamentos;

À minha esposa e filhos pela compreensão e apoio;

A todos que, de alguma maneira, com sugestões, críticas e incentivos, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Trabalhar com sustentabilidade é plantar um presente que garanta a subsistência das novas gerações num planeta que pede socorro e se aquece a cada dia. Pois melhor que plantar árvores, despoluir rios, proteger animais, é semear a consciência de que a garantia da vida é respeitar as fronteiras da natureza”.

Nildo Lage

RESUMO

Fenômenos de vibrações induzidas pelo escoamento tem atraído o interesse de inúmeros pesquisadores no campo da interação fluido-estrutura. Em geral, as pesquisas buscam o entendimento dos mecanismos que controlam essas vibrações visando à adoção de medidas mitigatórias dos seus efeitos sobre a integridade das estruturas. Porém, mais recentemente, a busca por fontes alternativas de energia limpas, abriu um novo foco das pesquisas que consiste na exploração dos mecanismos de transferência de energia do escoamento para a estrutura a fim de converter a energia mecânica em energia elétrica. A viabilidade desta situação foi atestada por pesquisadores da Universidade de Michigan com o desenvolvimento de um dispositivo chamado VIVACE, que explora as vibrações induzidas por vórtices para fins de geração de energia elétrica. A obtenção de rendimento ótimo em dispositivos deste tipo depende fundamentalmente do entendimento dos mecanismos presentes na interação entre o fluido e a estrutura. Na busca deste entendimento, esta dissertação apresenta um estudo experimental do escoamento transversal sobre um par de cilindros, arranjados de forma arbitrária, com o cilindro de montante fixo e o cilindro de jusante montado elasticamente. O estudo experimental foi realizado em um pequeno túnel de vento com o objetivo de identificar a faixa de velocidades do escoamento na seção de teste e o arranjo com cilindros que produz a máxima amplitude e espectro de frequência de vibração do cilindro de jusante. Essas variáveis foram obtidas a partir da instalação de um sensor de posição ótico para medição dos deslocamentos do cilindro elasticamente montado. A partir da análise das séries temporais de deslocamentos obtidas para diferentes velocidades do escoamento, foi possível identificar a frequência e a velocidade correspondentes à máxima amplitude de oscilação do cilindro. Nos experimentos realizados o ângulo formado entre os cilindros e o escoamento incidente no cilindro analisado variou entre $0^{\circ} \leq \alpha \leq 45^{\circ}$, o espaçamento entre cilindros em $1,50 \leq S/D \leq 3,35$ e o número de Reynolds em $1.400 < Re < 6.200$. Os resultados discutidos e comparados aos obtidos no cilindro analisado instalado isoladamente no túnel de vento indicaram um aumento na amplitude de oscilação em oito dos dezesseis arranjos feitos com dois cilindros. A faixa de oscilação se apresentou maior em seis destes arranjos. Em todas as análises feitas as oscilações ocorreram a 11,41 Hz, praticamente o mesmo valor da frequência natural da estrutura.

Palavras-chave: Energia elétrica, estudo experimental, correntes oceânicas, escoamento sobre cilindros, Vibrações Induzidas por Escoamento.

ABSTRACT

Flow induced vibration phenomena has attracted the interest of many researchers in the field of fluid-structure interaction. In general, the research goals consist of reaching an understanding of the mechanisms that control such vibrations, aiming to the adoption of measures that mitigate the vibration effects on the integrity of the structures. However, more recently, as a result of the search for alternative sources of clean energy, a new trend of research has been established in which the main focus is to exploit the mechanisms that drive the transfer of mechanical energy from the flow to the structure and the consequent conversion of the mechanical energy of the structure to electrical power. The feasibility of this has been demonstrated by research from Michigan University with the proposition of device called VIVACE, whose working principle is based vortex induced vibrations of a group of cylinders. The efficiency of such a device depends very much on the understanding of the driven mechanisms of the fluid structure interaction. Aiming to contribute to this understanding, this dissertation presents an experimental investigation of the transverse flow over a pair of cylinders, in tandem arrangement, with the upstream cylinder fixed and the downstream cylinder elastically mounted with springs. The experimental study was conducted in a small wind tunnel aiming to identify the range of flow velocity at the test section and the configuration of the cylinders that lead to the maximum vibration of the downstream cylinder. Another relevant parameter was identification of spectrum of the vibration. These variables were obtained from the installation of an optical position sensor for measuring the displacement of the cylinder elastically mounted. From the analysis of the time series of displacements obtained for different rates of flow, it was possible to identify the frequency and the velocity corresponding to the maximum amplitude of oscillation of the cylinder. In the experiments the angle formed between the cylinders and the incident flow in the cylinder analyzed ranged between $0^{\circ} \leq \alpha \leq 45^{\circ}$, the spacing between cylinders in $1,50 \leq S/D \leq 3,35$ and the Reynolds number in $1400 < Re < 6,200$. The results discussed and compared with the obtained in the cylinder analyzed singly installed in the wind tunnel showed an increase in amplitude of oscillation in eight of the sixteen arrangements made with two cylinders. The range of oscillation is presented greater in six of these arrangements. In all analyzes the oscillations occurred at 11.41 Hz, practically the same value of the natural frequency of the structure.

Keywords: Electric energy, experimental study, ocean currents, flow over cylinders, Flow Induced Vibrations.

SUMÁRIO

LISTA DE SIMBOLOS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE FIGURAS	13
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo geral	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	21
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
2.2 ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE.....	21
2.3 FONTES ALTERNATIVAS	25
2.3.1 Energia eólica	25
2.3.2 Energia solar fotovoltaica.....	27
2.4 ENERGIA OCEÂNICA	28
2.4.1 Energia das Ondas	29
2.4.2 Energia das Marés e Correntes Oceânicas	34
2.5 PROJETO VIVACE	36
3. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ESCOAMENTO EM CORPOS ROMBUDOS..	39
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	39
3.2 CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DO ESCOAMENTO.....	39
3.2.1 Número de Reynolds	40

3.2.2 Força de arrasto e força de sustentação	42
3.2.3 Número de Strouhal.....	44
3.2.4 Vibrações Induzidas por Escoamento (VIE).....	45
3.2.5 Velocidade Reduzida.....	47
3.2.6 Amplitude de resposta adimensional.....	47
3.2.7 Lock-in	47
3.3 ARRANJOS EXPERIMENTAIS COM CILINDROS	48
4. INSTALAÇÃO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL	58
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	58
4.2 PREPARAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO	58
4.3 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	62
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
5.2 PARÂMETROS AVALIADOS	65
5.3 FREQUÊNCIA NATURAL DA ESTRUTURA.....	69
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	70
5.4.1 Cilindro fixo nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY	71
5.4.2 Cilindro fixo nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY	75
5.4.3 Cilindro fixo nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY	77
5.4.4 Cilindro fixo nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY	79
6. CONCLUSÕES	86
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	86
6.2 AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO	86
6.3 FAIXA DE OSCILAÇÃO DO CILINDRO	87
6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE SIMBOLOS

A	<i>Amplitude de oscilação</i>
C_D	<i>Coefficiente de arrasto</i>
C_L	<i>Coefficiente de sustentação</i>
D	<i>Diâmetro do cilindro</i>
d	<i>Profundidade</i>
E_K	<i>Energia Cinética</i>
E_P	<i>Energia Potencial</i>
E_W	<i>Energia da Onda Oceânica</i>
f	<i>Frequência ou ciclo por unidade de tempo</i>
F_D	<i>Força de arrasto</i>
f_{inv}	<i>Frequência do inversor</i>
F_L	<i>Força de sustentação</i>
f_n	<i>Frequência natural de vibração da estrutura</i>
f_{osc}	<i>Frequência de oscilação</i>
f_s	<i>Taxa ou frequência de amostragem</i>
f_{st}	<i>Frequência de Strouhal</i>
f_{vs}	<i>Frequência de desprendimento de vórtices</i>
g	<i>Aceleração da Gravidade</i>
GW	<i>Potência Total Instalada em gigawatt</i>
H	<i>Altura da Onda Oceânica</i>
kW	<i>Potência Total Instalada em quilowatt</i>
MWh	<i>Potência Total Líquida de Geração em megawatt-hora</i>
PSD	<i>Power Spectral Density (Densidade Espectral de Potência)</i>
Re	<i>Número de Reynolds</i>
S	<i>Espaçamento entre centros de cilindros</i>
St	<i>Número de Strouhal</i>
t	<i>Tempo</i>
TWh	<i>Potência Total Líquida de Geração em terawatt-hora</i>
U	<i>Velocidade de escoamento</i>
U_r	<i>Velocidade reduzida</i>
α	<i>Ângulo de ataque do escoamento incidente</i>
ν	<i>Viscosidade cinemática</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>BEN</i>	<i>Balanco Energético Nacional</i>
<i>CAO</i>	<i>Coluna de Água Oscilante</i>
<i>CRESESEB</i>	<i>Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Salvo de Brito</i>
<i>DCO</i>	<i>Dispositivo de Corpo Oscilante</i>
<i>EE</i>	<i>Escola de Engenharia</i>
<i>ELETOBRAS</i>	<i>Centrais Elétricas Brasileiras S.A</i>
<i>EPE</i>	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
<i>EPIA</i>	<i>European Photovoltaic Industry Association (Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica)</i>
<i>EWEA</i>	<i>European Wind Energy Association (Associação Europeia de Energia Eólica)</i>
<i>FURG</i>	<i>Universidade Federal do Rio Grande</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases de Efeito Estufa</i>
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)</i>
<i>LIFE</i>	<i>Laboratório de Interação Fluido-Estrutura</i>
<i>LVDT</i>	<i>Linear Variable Displacement Transducers (Transdutor de Deslocamentos de Variação Linear)</i>
<i>ONS</i>	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
<i>OTEC</i>	<i>Ocean Thermal Energy Conversion (Conversão de Energia Térmica Oceânica)</i>
<i>Ppm</i>	<i>Partes por milhão</i>
<i>tCO₂e</i>	<i>Toneladas de CO₂ equivalente</i>
<i>VIE</i>	<i>Vibrações Induzidas por Escoamento</i>
<i>VIV</i>	<i>Vortex Induced Vibrations (Vibrações Induzidas por Vórtices)</i>
<i>VIVACE</i>	<i>Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy (Vibrações Induzidas por Vórtices para Energia Aquática Limpa)</i>
<i>WavEC</i>	<i>Wave Energy Centre (Centro de Energia das Ondas)</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Emissões de GEE das empresas Eletrobras no ano de 2012.....	24
Tabela 4.1 - Características dos componentes utilizados na montagem.	61
Tabela 5.1 – Espaçamentos (S ou S/D) e ângulos (α) para as diversas posições do cilindro fixo.	68
Tabela 5.2 - Resultados obtidos com a realização dos experimentos.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Percentual da geração de energia elétrica mundial por fonte, em 2011.	22
Figura 2.2 - Matriz elétrica brasileira.	22
Figura 2.3 - Cenário atual e futuro da geração por fonte com as políticas atuais.....	23
Figura 2.4 - Evolução da matriz elétrica mundial a partir de fontes eólicas.	26
Figura 2.5 - Evolução da matriz solar fotovoltaica mundial.	28
Figura 2.6 - Esquema mostrando a variação no espectro de energia em função do período para os diversos tipos de ondas oceânicas.....	29
Figura 2.7 - Distribuição do fluxo médio anual de energia das ondas em kW por metro de crista de onda. Estima-se que o aproveitamento desta energia seja economicamente viável em níveis acima de 15 kW/m.....	30
Figura 2.8 - Tipologias em equipamentos para conversão da energia oceânica.....	31
Figura 2.9 - Princípio de funcionamento de uma Coluna de Água Oscilante.	32
Figura 2.10 - Atuação da onda em sistemas de corpo oscilante.....	33
Figura 2.11 - Dispositivo de galgamento.....	34
Figura 2.12 - Tipologias para conversão de energia de correntes oceânicas.....	35
Figura 2.13 - Esquema básico do VIVACE.	37
Figura 2.14 - Canal de testes com o dispositivo VIVACE instalado.	38
Figura 3.1 - escoamento viscoso ao redor de um corpo cilíndrico. Nota-se na figura a camada limite (a), a zona de separação (b) e a formação da esteira de vórtices (c).....	40
Figura 3.2 - Regime de escoamento ao redor de um cilindro circular fixo.	41
Figura 3.3 - Forças de arrasto e sustentação devido a distribuição da pressão em torno um cilindro fixo.	43
Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds.	44
Figura 3.5 - Desprendimento de vórtices ao redor de um cilindro circular.....	45
Figura 3.6 - Fluxo de ar em torno de um cilindro semicircular.....	46
Figura 3.7 - Fenômeno de lock-in no ar e na água.	48
Figura 3.8 - Experimento para demonstração do galloping.....	48
Figura 3.9 - Vibrações induzidas por fluxo transversal em um cilindro circular.....	49
Figura 3.10 - Experimento de Feng (1968).	49
Figura 3.11 - Gráficos obtidos com as análises de Feng (1968).	50
Figura 3.12 - Montagem para análise de VIV.	51
Figura 3.13 - Resultado dos experimentos com cilindros rígidos em pêndulo.....	52

Figura 3.14 - Experimento para estudo sobre VIV com controle de amortecimento.....	53
Figura 3.15 - Aparato utilizado nos experimento para estudos de VIV transversal.....	53
Figura 3.16 - Aparato montado em cilindro rígido não estacionário para análise e controle de VIV	54
Figura 3.17 - Montagem para a condução dos experimentos com cilindros	55
Figura 3.18 - Montagem realizada para a condução dos experimentos.....	56
Figura 4.1 - Conjunto motor-hélice (esquerda) e colmeia(direita) do túnel de vento. ...	58
Figura 4.2 - Diversas posições para o cilindro fixo no túnel de vento.	59
Figura 4.3 - Vistas frontal e lateral da seção de testes do túnel de vento com os pontos onde foram feitas as medições nas velocidades do escoamento.....	60
Figura 4.4 - Perfil de velocidades no interior do túnel de vento	60
Figura 4.5 - Modificações feitas no túnel de vento para a realização dos experimentos.	61
Figura 4.6 - Instrumentos e dispositivos utilizados nas análises.	62
Figura 4.7 - Interface do programa de aquisição de dados do sensor óptico de posição desenvolvida para este trabalho.....	63
Figura 4.8 - Rotina em ambiente Labview desenvolvida para este trabalho.....	63
Figura 4.9 - Foto do túnel de vento com os equipamentos utilizados nos experimentos.	64
Figura 5.1 – Definição da amplitude de oscilação.....	66
Figura 5.2 - Identificação dos ramos de excitação inicial e final em uma curva de evolução da amplitude de oscilação em função de Re	67
Figura 5.3 - Faixa de Re onde o cilindro apresenta oscilações.....	68
Figura 5.4 – Identificação do espaçamento (S) e do ângulo (α).	69
Figura 5.5 - Sinal filtrado (esquerda), amostra de 1 segundo do mesmo sinal (centro) e densidade espectral de potência (direita) do impulso aplicado ao cilindro sob análise no túnel de vento do LIFE com frequência de amostragem de 1000 Hz.....	69
Figura 5.6 - Amostragem de 1 s (esquerda) e densidade espectral de potência-PSD (direita) para o sinal adquirido com o cilindro analisado instalado isoladamente no interior do túnel de vento.....	70
Figura 5.7 - Evolução do PSD em função de Re sem a presença do cilindro à montante.	70
Figura 5.8 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e	

4RX0RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.	71
Figura 5.9 - Evolução da PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY.....	72
Figura 5.10 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY.	73
Figura 5.11 - Regiões de Re em que o cilindro apresenta comportamentos distintos. ...	74
Figura 5.12 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.	75
Figura 5.13 - Evolução do PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY.	76
Figura 5.14 - Comparações na evolução da PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY.....	77
Figura 5.15 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.	78
Figura 5.16 - Evolução do PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY.	79
Figura 5.17 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY.	79
Figura 5.18 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado unicamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.	80
Figura 5.19 - Evolução da PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY.	81
Figura 5.20 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY.	81

Figura 5.21 - Amplitude adimensional em função de Re dos registros onde ocorreram os maiores deslocamentos no cilindro analisado para todas as posições do cilindro a montante.	82
Figura 5.22 - Posições para o cilindro fixo em que obteve ganho de resposta em termos de amplitude de oscilação.	83
Figura 5.23 - Comparativos entre todas as curvas obtidas pela evolução na densidade espectral de potência em função dos incrementos dados a velocidade do escoamento para as diversas configurações analisadas.	83
Figura 5.24 - Comparativo entre as curvas de evolução do PSD nas posições para o cilindro fixo onde a faixa de oscilação significativa foi superior à obtida com somente o cilindro analisado instalado no túnel de vento.	84

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo trata dos motivos e justificativas que levaram a realização desta dissertação, quais os objetivos que se pretende alcançar ao final desta e como a mesma foi estruturada para que tais objetivos sejam atendidos.

1.2 MOTIVAÇÃO

A eletricidade tem se tornado nos últimos anos a energia mais consumida pela humanidade e, conseqüentemente, a de que ela mais depende. Através da eletricidade, outras formas de energia puderam se transformar com muito mais eficiência. Foi esta energia que possibilitou que muitas das tecnologias existentes hoje em dia surgissem, tecnologias estas que permitiram, inclusive, a conquista do espaço.

Embora de vital importância para a humanidade, a eletricidade para ser produzida depende da conversão de outras fontes de energia, sendo as mais comuns a hidráulica ou a térmica. O alto preço pago pela obtenção desta energia se traduz em degradação e desrespeito ao meio ambiente e sua resposta a tudo isso são as mudanças climáticas que estão ocorrendo devido ao aumento no efeito estufa provocado pelas altas concentrações de CO₂ (dióxido de carbono) e de outros GEE (Gases de Efeito Estufa) na atmosfera.

Outro fator que tem sido motivo de preocupação diz respeito às reservas das principais fontes primárias utilizadas para a geração como carvão mineral, petróleo bruto, gás natural e urânio. Todas estas matérias primas estão presentes na natureza em quantidades limitadas, uma vez que é necessário muito tempo para serem repostas naturalmente. Além disso, sua distribuição geográfica é bastante heterogênea.

O uso de fontes renováveis como a hidráulica traz menos prejuízos ao ambiente. Porém nem toda parte do planeta dispõe de recursos hídricos favoráveis à construção de

hidroelétricas. Quando este recurso pode ser aproveitado, na maioria dos casos, altera completamente o curso de rios ou quedas d'água para a construção de represas e reservatórios, obrigando as pessoas a deixarem suas casas, forçando a retirada de animais, acabando com florestas ou sítios históricos, alterando completamente estes locais de maneira, quase sempre, irreversível.

Formas alternativas e ambientalmente corretas de geração, como a eólica e a solar fotovoltaica, embora possam contribuir para complementar o sistema de geração atual, ainda não possuem capacidade de substituí-lo totalmente.

Sabe-se que o potencial energético dos oceanos é enorme. Porém, todos os processos e equipamentos até então utilizados para a conversão desta energia em eletricidade tem se mostrado pouco eficientes ou pouco resistentes às intempéries marinhas.

Porém, estudos recentes realizados por pesquisadores da Universidade de Michigan (EUA) apresentam uma nova forma de produzir energia elétrica a partir de correntes oceânicas ou fluviais. O projeto denominado VIVACE (Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy) é capaz de gerar eletricidade em correntes com velocidades a partir 0,8 m/s e vem se apresentando como um sistema mais eficiente e, devido a sua simplicidade, mais resistente.

O funcionamento se baseia no estímulo das VIE (Vibrações Induzidas por Escoamento) resultantes do escoamento de um fluido sobre cilindros colocados perpendicularmente ao fluxo. Este fenômeno provoca a movimentação alternada do cilindro que, estando acoplado a geradores, produzem eletricidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Considerando que o VIVACE tem seu funcionamento baseado no estímulo das VIE e que havendo um ganho na amplitude de oscilação, bem como na faixa de velocidades para o escoamento onde estas oscilações ocorrem de maneira significativa, haverá também um ganho de rendimento em um dispositivo como este, o objetivo geral

deste trabalho visa a avaliação experimental, em túnel de vento, da interferência que um cilindro fixo e colocado sob diversas posições, possa exercer em outro cilindro livre para oscilar colocado à jusante deste.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação visam:

- Uma maior compreensão sobre as VIE, mais especificamente Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) e galloping;
- Entender melhor e avaliar algumas das grandezas hidrodinâmicas envolvidas na interação fluido estrutura;
- Avaliar e mensurar a influência que o escoamento sobre um cilindro fixo, colocado em diversas posições, exerce sobre outro cilindro colocado a jusante;
- Comparar e identificar nas diversas análises, quais as posições para o cilindro fixo onde se tem maior ganho na amplitude de oscilação, na faixa velocidades do escoamento onde ocorrem estas oscilações ou na frequência de oscilação do cilindro à jusante;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de atender os objetivos propostos na presente dissertação o trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

- Este primeiro capítulo faz considerações sobre a motivação, as justificativas, os objetivos e a estruturação do trabalho;
- O segundo capítulo apresenta uma revisão sobre as fontes geradoras de energia elétrica, principalmente as renováveis. Com isso questões relacionadas a crescente demanda mundial por energia elétrica e as tecnologias existentes para a produção desta energia, sejam as afirmadas, sejam as em fase de testes são abordadas. Neste segundo capítulo também é apresentada algumas características do VIVACE;

- No terceiro capítulo são apresentados alguns fundamentos da interação fluido estrutura, principalmente como ocorrem as VIE em corpos cilíndricos circulares. Neste capítulo também é feita uma pequena revisão sobre alguns trabalhos experimentais já realizados com cilindros, visando a avaliação de diversos parâmetros da interação fluido estrutura;
- O quarto capítulo apresenta a metodologia empregada e como foram executadas as configurações iniciais para a condução dos experimentos;
- No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos;
- No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO ENERGIAS RENOVÁVEIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conhecimento sobre a situação da energia elétrica mundial é de extrema importância para que se entenda a necessidade em se buscar novas formas de obter esta energia. Com base nestas considerações preliminares, este capítulo apresenta alguns números sobre a situação atual e futura da geração de energia elétrica, bem como algumas tecnologias alternativas existentes ou em estudo para a produção desta energia.

2.2 ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE

A geração de energia elétrica tem sido um dos grandes responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e seus impactos negativos sobre as mudanças climáticas. Mas segundo o último Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2012) os maiores danos ao clima ainda podem ser evitados se forem utilizadas formas alternativas de produzir esta energia.

Atualmente são utilizadas diversas fontes para gerar energia elétrica. Dependendo do tipo, são classificadas em não renováveis ou renováveis. As principais fontes de energias não renováveis são os combustíveis nucleares (urânio é o principal), os derivados de petróleo, o carvão mineral e o gás natural. Embora se saiba que este tipo de energia se esgotará no futuro e que seja responsável por grandes impactos ambientais, a flexibilidade dos sistemas bem como o elevado rendimento energético destas fontes fazem com que sejam as mais utilizadas para a geração de energia elétrica.

Considera-se que uma fonte de energia é renovável quando não se consegue estabelecer um fim temporal para sua utilização. É o caso da radiação solar, dos ventos, das marés e das ondas e correntes oceânicas. Energias renováveis são virtualmente inesgotáveis, mas limitadas em termos da quantidade de energia que se pode utilizar a cada instante. Com exceção das hidroelétricas, os principais fatores que ainda servem de

entrave para um aproveitamento mais amplo de fontes renováveis são as poucas tecnologias e o baixo rendimento dos sistemas existentes. Embora já se tenha uma melhora neste quadro, a utilização de fontes renováveis ainda está muito aquém dos sistemas que utilizam fontes não renováveis.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2013), o percentual de utilização de cada uma destas fontes em 2011 se apresenta como mostra a Figura 2.1.

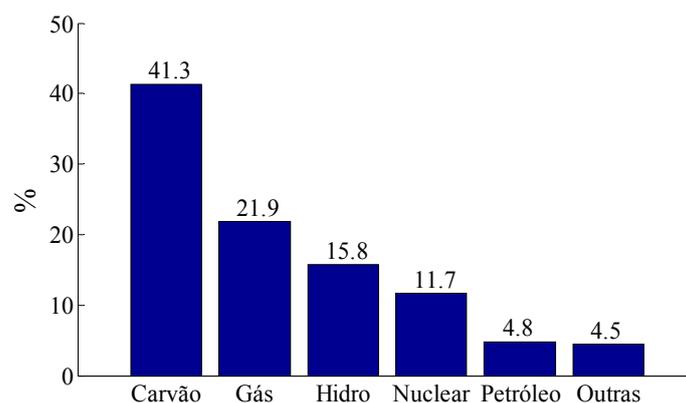


Figura 2.1 - Percentual da geração de energia elétrica mundial por fonte, em 2011.

Fonte: IEA (2013).

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014), a matriz elétrica para o Brasil, atualmente se apresenta como mostra a Figura 2.2.

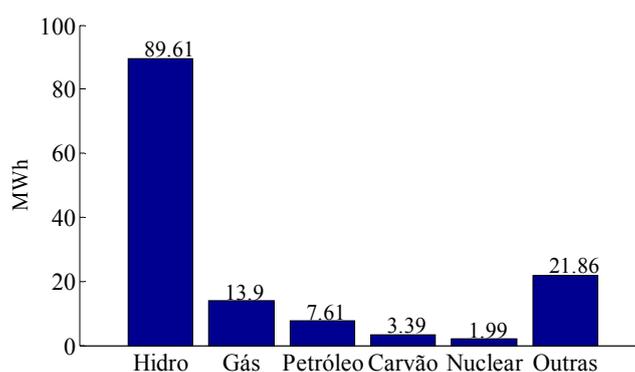


Figura 2.2 - Matriz elétrica brasileira.

Fonte: ANEEL (2014).

A geografia do território brasileiro favorece o uso de recursos hídricos na geração de energia elétrica, fazendo com que o país seja um dos líderes no uso de energias renováveis no cenário mundial. Mesmo assim este recurso é bastante variável, pois depende muito de um ciclo regular de chuvas, muitas vezes, obrigando o uso de

sistemas de compensação como geração térmica, por exemplo, a fim de atender a demanda.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2013) apesar do aumento de 1.835 MW na potência instalada do parque hidroelétrico, a oferta de energia hidráulica reduziu-se em 1,9% devido às condições hidrológicas observadas, especialmente na segunda metade de 2012.

Ainda de acordo com o BEN (2013), esta menor oferta hídrica explica o recuo das fontes renováveis na matriz elétrica, de 88,9% em 2011 para 84,5% neste ano.

A crescente necessidade de mais energia elétrica obriga a ampliação de sistemas de geração. A Figura 2.3 mostra a possível evolução da matriz elétrica mundial se forem mantidas as políticas atuais.

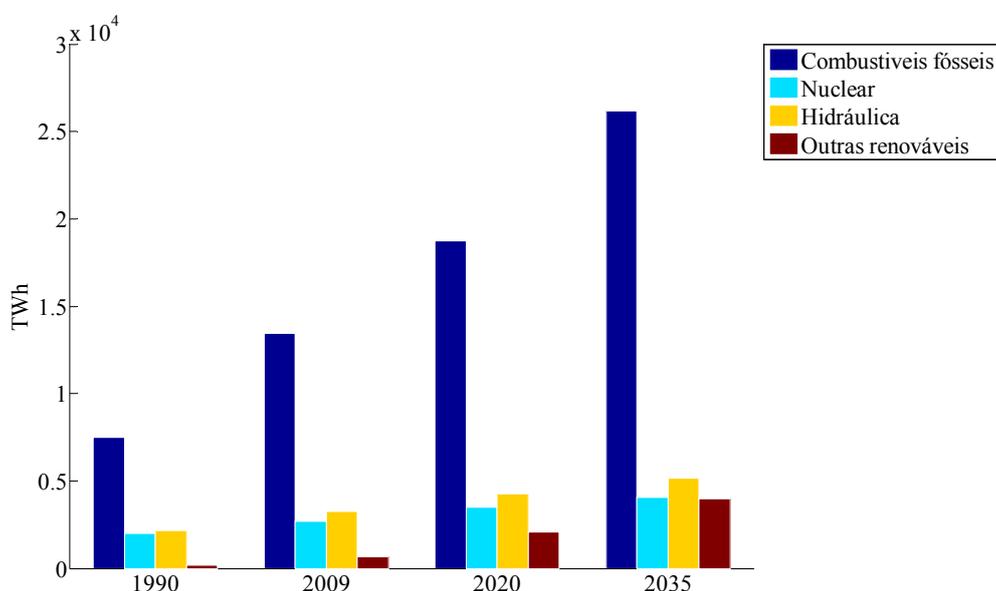


Figura 2.3 - Cenário atual e futuro da geração por fonte com as políticas atuais.

Fonte: IEA, (2013).

Conforme a Figura 2.3 mostra, o panorama não será muito diferente do que ocorre hoje. Os combustíveis fósseis tendem a continuar sendo as principais fontes utilizadas para a geração elétrica. A utilização maciça destes combustíveis tem contribuído muito para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera e o consequente aquecimento global.

Segundo o IPCC (2012), desde a década de 1850, o uso de combustíveis fósseis domina o abastecimento de energia, levando a um rápido crescimento dos níveis de concentração de CO₂ na atmosfera.

Ainda segundo o IPCC (2012) o aumento das temperaturas médias globais desde meados do século 20 deve-se muito ao aumento observado nas concentrações antropogênicas de GEE (Gases de Efeito Estufa) e que as concentrações de CO₂ aumentaram para mais de 390 ppm (partes por milhão), ou 39% acima dos níveis pré-industriais, até o final de 2010.

O Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa das Centrais Elétricas Brasileiras S.A (Eletrobras, 2013), apresenta relatórios anuais sobre a emissão de GEE com a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Emissões de GEE das empresas Eletrobras no ano de 2012.

Empresas Eletrobras	Emissões (tCO₂e)	Geração Total Líquida (MWh)	tCO₂e/MWh
CGTEE	3.322.914	2.677.000	1,2413
Chesf	300.080	50.003.000	0,0060
Furnas	1.150.036	39.786.000	0,0289
Eletronorte	990.191	42.236.000	0,0234
Eletronuclear	7.587	16.007.000	0,0005
Eletrosul	190.890	524.000	0,3643
Amazonas Energia	5.210.824	6.968.000	0,7478
Itaipu	10.494	49.144.000	0,0002
Cepel	1.295	-	-
Eletrobras Holding	2.842	46.000	0,0618
Distribuição Acre	134.411	-	-
Distribuição Alagoas	85.942	-	-
Distribuição Rondônia	262.477	-	-
Distribuição Roraima	17.343	-	-
Distribuição Piauí	84.820	-	-
Total	11.772.146	207.391.000	0,0568

Fonte: Eletrobras, (2013).

Segundo a Eletrobras (2013), a emissão total em 2012 foi 20% maior que em 2011 devido ao maior despacho pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) das usinas termoelétricas.

O relatório síntese do BEN (2013), afirma que para produzir 1 TWh de energia, o setor elétrico brasileiro emite 6 vezes menos que o europeu, 7 vezes menos que o setor elétrico dos Estados Unidos da América e 11 vezes menos do que o chinês. Entretanto mesmo sendo considerada baixa, a emissão de GEE com geração elétrica no Brasil, o

valor pode ser considerado expressivo observando-se o amplo domínio da hidroeletricidade na matriz elétrica sobre as demais fontes.

Devido ao baixo custo de operação, a fissão nuclear ainda é uma das maneiras mais econômicas para geração de energia. Utilizando insumos com expressiva densidade energética, a conversão da energia nuclear em energia elétrica é uma das formas mais eficientes de se gerar energia a baixo custo e, em condições normais de funcionamento, apresenta impactos ambientais, que podem ser considerados menores se comparados a outras opções térmicas. Porém acidentes como os da usina nuclear de Chernobyl na Ucrânia e de Fukushima no Japão estão fazendo com que muitos países repensem sobre a utilização desta tecnologia para produção de eletricidade.

2.3 FONTES ALTERNATIVAS

A busca por modelos de geração de energia elétrica que produzam reduzido impacto ao meio ambiente, segue em amplo crescimento. Neste contexto, as tecnologias alternativas e que utilizam fontes renováveis são vitais para a produção desta energia de maneira sustentável. Muitas destas tecnologias ainda são relativamente recentes e precisam ser melhor estudadas para que se tornem economicamente viáveis. Atualmente, os conversores eólicos e as células de conversão fotovoltaica estão entre as fontes alternativas mais utilizadas na geração de energia elétrica.

2.3.1 Energia eólica

Da mesma forma que a hidráulica, a energia eólica já era utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas foi somente um século depois, com a crise internacional do petróleo na década de 1970, que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

Os países europeus estão entre os que mais investem em energia eólica no mundo. Segundo a Associação Europeia de Energia Eólica (EWEA, 2014), durante o ano de 2013 foram instalados 12,03 GW de energia eólica em toda a Europa.

A evolução da matriz eólica mundial entre os anos de 1996 e 2012 é apresentada na Figura 2.4.

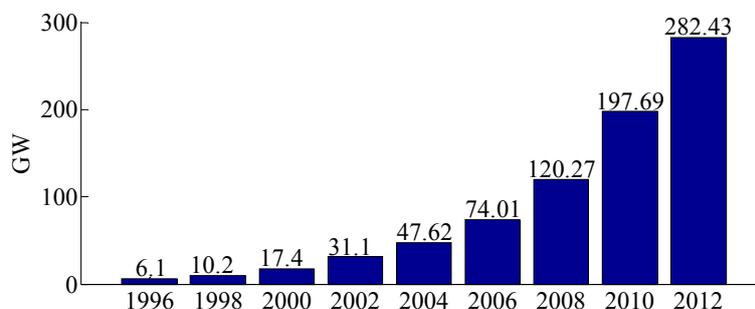


Figura 2.4 - Evolução da matriz elétrica mundial a partir de fontes eólicas.

Fonte: EWEA, (2014).

No Brasil a energia eólica tem sido a fonte de geração preferida entre as renováveis. Grande parte dos investimentos feitos em construção de parques de geração nos últimos anos mostra que a energia que provém dos ventos é a preferida entre as alternativas encontradas pelo setor.

A produção de eletricidade a partir de fontes eólicas alcançou 5.050 GWh em 2012, que representou um aumento de 86,7% em relação ao ano anterior, quando se alcançou 2.705 GWh (BEN, 2013).

Mesmo com a produção de energia elétrica de maneira limpa e utilizando fontes renováveis, os parques eólicos podem causar alguns impactos ao ambiente. Os fatos mais importantes a serem considerados é o impacto sonoro causado pelo ruído do vento nas pás dos rotores e a possível interferência no comportamento habitual de migração de aves, embora esta interferência ainda seja desconhecida.

Os conversores eólicos apresentam rendimento superior a muitos sistemas alternativos. Mesmo assim, este rendimento é baixo se comparado aos convencionais sistemas de geração. A evolução tecnológica dos conversores tem contribuído muito para uma melhora neste quadro. Outro fator a ser considerado se deve a intermitência na velocidade em que o vento sopra, pois pode provocar variações na energia gerada, tornando difícil a integração da sua produção no programa de exploração.

Uma alternativa interessante e que poderia contribuir de maneira significativa para aumentar o rendimento de plantas eólicas, seria um sistema offshore integrado onde, na mesma estrutura utilizada para a instalação dos conversores eólicos, se teria um sistema de aproveitamento da energia oceânica.

2.3.2 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é uma das formas mais limpas para a produção de energia elétrica que existe atualmente. Os sistemas podem operar durante anos com baixíssima manutenção, sendo uma opção excelente em lugares remotos ou de difícil acesso, pois sua instalação em pequena escala não obriga a enormes investimentos em linhas de transmissão.

Inicialmente os sistemas fotovoltaicos foram desenvolvidos visando esta utilização por empresas de telecomunicações. Aliado a isto outro fato que impulsionou o desenvolvimento desta tecnologia foi a corrida espacial. A célula solar continua sendo, o meio mais adequado para o fornecimento de energia elétrica, necessária para manter no espaço, por longos períodos, equipamentos como satélites, estações espaciais entre outros.

Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Salvo de Brito (CRESESSEB, 2014), a crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Mas para que essa forma de conversão de energia se tornasse economicamente viável, seria necessária uma redução em até 100 vezes do custo de produção das células solares em relação àquelas utilizadas em explorações espaciais.

Ainda de acordo com o CRESESSEB (2014), o perfil das empresas envolvidas no setor também passou por modificações. Nos Estados Unidos, empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar.

Atualmente a China e os países da Europa são os que mais investem na produção de energia a partir de conversores fotovoltaicos.

Com base em dados da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2014), a evolução da matriz solar fotovoltaica a nível mundial, entre os anos 2000 e 2012, é apresentado na Figura 2.5.

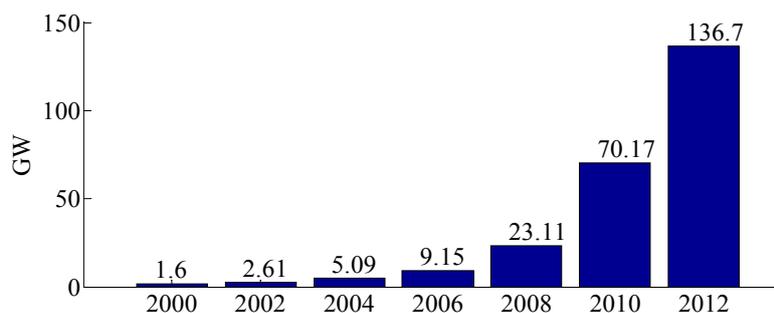


Figura 2.5 - Evolução da matriz solar fotovoltaica mundial.

Fonte: EPIA, (2014).

Mesmo produzindo energia limpa, os sistemas fotovoltaicos também apresentam algumas desvantagens, sendo as principais delas representadas pela baixa capacidade de conversão dos sistemas, pela reduzida produção de eletricidade em locais de latitude média e alta ou ainda em dias nublados e por não haver geração à noite, o que obriga a utilização de dispositivos de armazenamento da energia produzida durante o dia.

2.4 ENERGIA OCEÂNICA

Os oceanos cobrem uma enorme parte da superfície terrestre, são fundamentais ao equilíbrio e manutenção da vida na Terra e responsáveis diretos pela economia de muitos países, fornecendo alimentos e combustíveis ou servindo de ligação comercial entre eles. Mas o fato que está motivando pesquisadores e outros especialistas da área a respeito do potencial dos oceanos, está na possibilidade da utilização de sua energia cinética ou térmica na geração de energia elétrica.

Embora as avaliações sobre os recursos oceânicos para geração de energia estejam em uma fase preliminar, o potencial teórico da energia oceânica facilmente excede as atuais necessidades humanas por energia, (IPCC, 2012).

O aproveitamento das energias associadas aos oceanos pode ser realizado de diversas maneiras: energia das marés, energia das ondas, correntes marítimas e energia associada ao diferencial térmico (OTEC). Para cada uma destas formas de energia existe uma tipologia diferente para equipamentos que a convertem em energia elétrica. No que diz respeito à sua localização no oceano em relação à costa podem ser classificados como shoreline (na costa), onshore (próximos à costa) ou offshore (em alto mar).

Segundo o IPCC (2012), a energia oceânica oferece um potencial a longo prazo na redução de emissões de carbono, portanto é pouco provável que ofereça uma contribuição de maneira significativa antes de 2020, devido ao seu estágio inicial de desenvolvimento.

2.4.1 Energia das Ondas

As ondas podem ser formadas de diversas maneiras. Os principais responsáveis por sua formação são os ventos, a atração gravitacional da Lua e do Sol (marés), a movimentação de navios e os abalos sísmicos. Porém as ondas de maior interesse no aproveitamento de seu potencial são aquelas formadas pela ação dos ventos, por serem de maior constância e previsibilidade que as demais.

Na Figura 2.6 tem-se a distribuição da energia em função do período para os diversos tipos de ondas oceânicas.

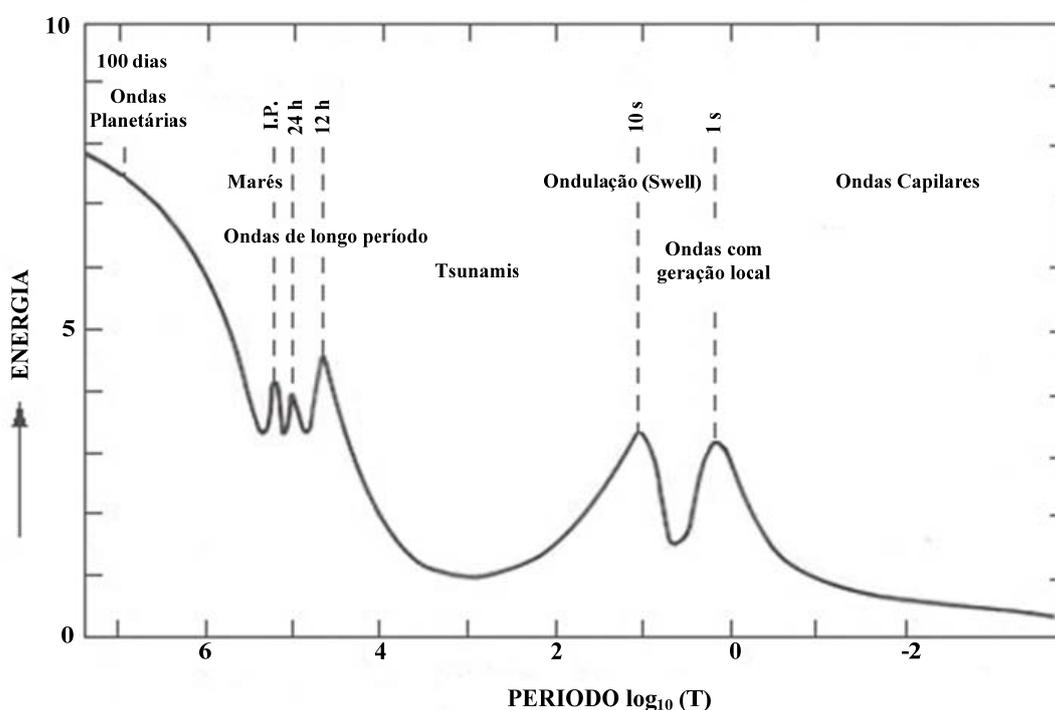


Figura 2.6 - Esquema mostrando a variação no espectro de energia em função do período para os diversos tipos de ondas oceânicas.

Fonte: Adaptado de LeBlond e Mysak (1978) *apud* Khandekar (1989).

A energia total das ondas oceânicas é composta por duas formas de energia: energia potencial, resultante do deslocamento da superfície livre, e a energia cinética, resultante da movimentação das partículas do fluido, (DEAN e DALRYMPLE, 1994).

Em um sistema dinâmico conservativo e submetido a oscilações de pequena amplitude, como é o caso das ondas de gravidade, a energia potencial (E_p) e a energia cinética (E_k) são iguais e podem ser definidas por:

$$E_p = E_k = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (2.1)$$

onde ρ representa a massa específica da água do mar, g a aceleração da gravidade e H a altura da onda.

A densidade média de energia total para ondas de gravidade (E_w) é o resultado da soma da parcela correspondente à energia potencial e da parcela correspondente à energia cinética. Com isso:

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.2)$$

É importante observar que a energia depende apenas da altura da onda e que, portanto, o aproveitamento desta energia e a sua consistência difere bastante de um local para outro. A distribuição global de potência das ondas para as diversas regiões do planeta é mostrada na Figura 2.7.

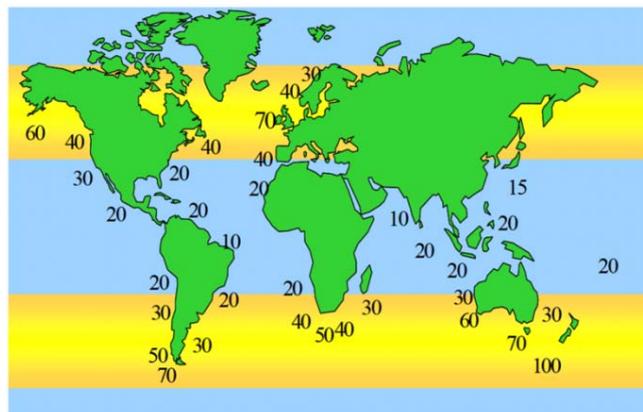


Figura 2.7 - Distribuição do fluxo médio anual de energia das ondas em kW por metro de crista de onda. Estima-se que o aproveitamento desta energia seja economicamente viável em níveis acima de 15 kW/m.

Fonte: WavEC (2014).

Na Figura 2.7 é possível verificar que a energia das ondas se distribui de maneira desigual pelo planeta e que as maiores atividades são observadas entre as latitudes de 30° e 60°.

Quanto ao local de geração, as ondas podem ser geradas longe ou próximas ao local de propagação. As que são originadas por ventos de tempestades ocorridas em alto-mar podem viajar a grandes distâncias mantendo sua energia sem perdas significativas, tornando a produção de energia muito mais estável e previsível. Próximo à costa, a densidade de energia das ondas diminui, devido à interação com o fundo do oceano e por outros fenômenos naturais.

As ondas podem ter diversos tamanhos e formas, dependendo da magnitude das forças que atuam sobre a água, (DEAN e DALRYMPLE, 1994).

A possibilidade de converter a energia das ondas em energia utilizável, inspirou numerosos inventores fazendo com que, até 1980 mais de mil patentes fossem registradas, (FALCÃO, 2010).

Muitas tecnologias de energia das ondas que representam uma gama de princípios operacionais foram concebidas e, em muitos casos, demonstradas para converter a energia das ondas em uma forma utilizável de energia, (IPCC, 2012).

A Figura 2.8 apresenta as principais tecnologias utilizadas para a conversão da energia das ondas oceânicas em energia elétrica.

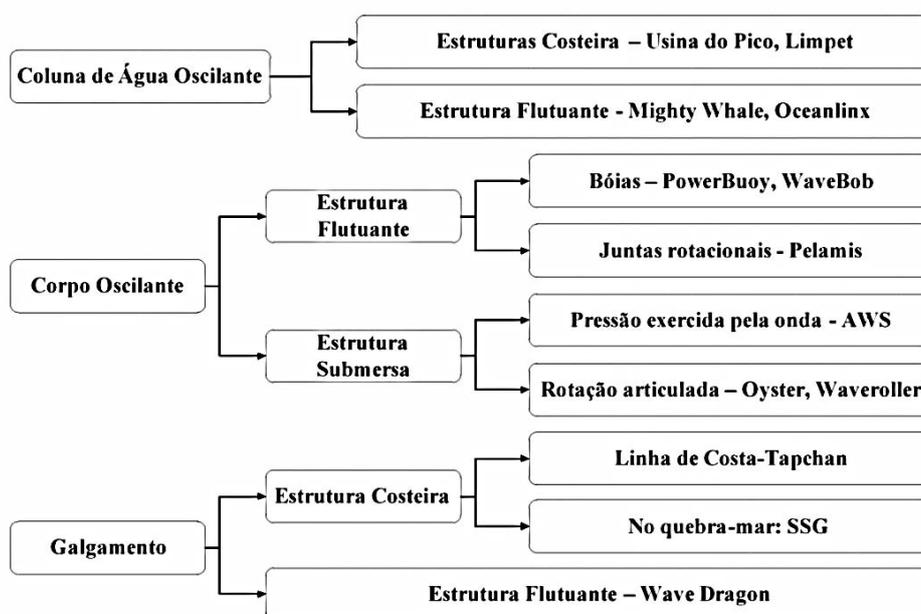


Figura 2.8 - Tipologias em equipamentos para conversão da energia oceânica.

Fonte: Adaptado de FALCÃO (2010).

Segundo FALCÃO (2010), baseados em diversos métodos de extração de energia, uma grande variedade de sistemas tem sido apresentados, mas apenas alguns protótipos foram construídos em tamanho natural e implantados em águas costeiras abertas. A maioria destes dispositivos fora instalada no litoral ou perto da costa, e são por vezes chamados de dispositivos de primeira geração.

O autor cita ainda que, a avaliação da potencialidade energética das ondas é um pré-requisito básico para o planejamento estratégico da sua utilização e para a escolha dos dispositivos.

As colunas de água oscilante (CAO) são formadas por estruturas com uma abertura para o mar abaixo da superfície livre do oceano. A movimentação das ondas no interior desta abertura provoca também a movimentação da coluna de ar no interior da coluna. Este processo de pressurização e despressurização no interior da câmara força a passagem do ar por um condutor onde existe uma turbina acoplada a um gerador elétrico (Figura 2.9).

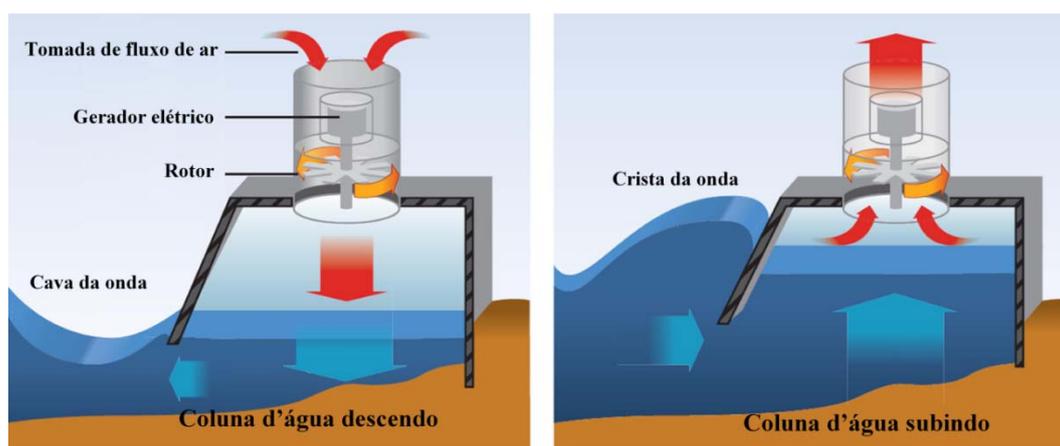


Figura 2.9 - Princípio de funcionamento de uma Coluna de Água Oscilante.

Fonte: IPCC (2012).

Para que o gerador mantenha o sentido de giro independente do sentido do escoamento do ar no interior da câmara, a turbina Wells é a mais frequentemente adotada na conversão de energia em sistemas de coluna de água oscilante.

Sendo que está submetida a condições mais adversas do em outras aplicações, a turbina é o ponto crítico de uma coluna de água oscilante devido a grande variabilidade e aleatoriedade do escoamento ao longo das diversas escalas de tempo.

FALCÃO (2010) destaca que muitos dispositivos de CAO foram construídos e submetidos a testes em vários países, porém a maioria não se encontra mais em

operação. Os principais projetos ainda existentes estão na Austrália (Energetech), na Grã-Bretanha (Limpet), em Portugal (Ilha de Pico) e no Japão (Mighty Whale).

Ainda segundo FALCÃO (2010), o mais bem sucedido destes projetos é o Limpet que, instalado na ilha de Islay na Escócia, opera desde 2001 conectado ao sistema elétrico britânico. Este sistema possui capacidade nominal de 500kW e uma turbina Wells com 2,6m de diâmetro.

Os dispositivos de corpo oscilante (DCO) são compostos por estruturas mais complexas que as colunas de água oscilante e estão divididos em dois tipos principais: sistemas flutuantes e sistemas submersos. Muitos dos equipamentos conversores de energia possuem sistemas mecânicos com vários graus de liberdade e podem ser dotados de geradores rotativos ou geradores lineares. Dependendo de sua concepção podem aproveitar tanto os movimentos horizontais da onda (Figura 2.10 a) quanto os movimentos verticais (Figura 2.10 b).

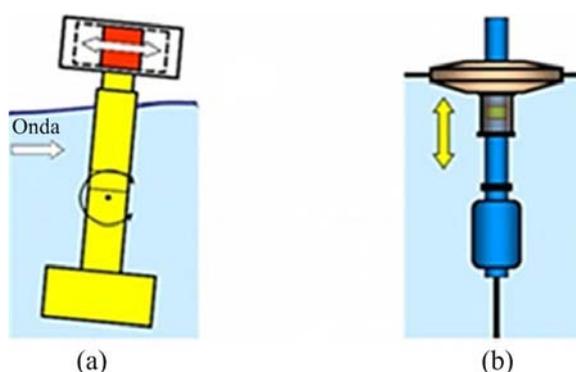


Figura 2.10 - Atuação da onda em sistemas de corpo oscilante.

Fonte: Falcão (2010).

O Pelamis é um exemplo de dispositivo de corpos oscilante que está em fase de testes no Centro de Energia Marinha Europeia (EMEC) ao largo da costa oeste do continente em Orkney Mainland, Escócia. O projeto consta de dois dispositivos P2 desenvolvidos pela Pelamis Wave Power. Entre outros fatores os testes buscam avaliar a eficiência e a resistência dos equipamentos para diversas condições de mar.

Os dispositivos de galgamento coletam e armazenam a água das ondas a vários metros acima do nível do oceano que é posteriormente canalizada retornando ao mar. Ao retornar ao mar a água faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico.

A Figura 2.11 mostra como é o funcionamento de um dispositivo de galgamento.

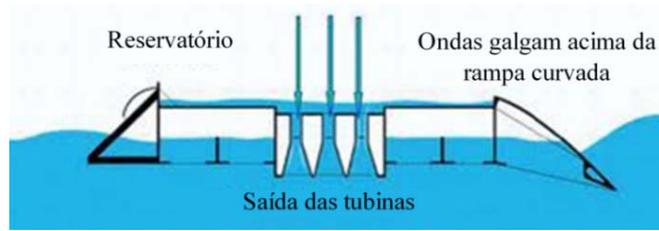


Figura 2.11 - Dispositivo de galgamento.

Fonte: Wave dragon (2012).

Um dispositivo como este é o Wave Dragon, cujo protótipo em escala 1/4,5 foi implantado no Mar do Norte em Nissum Bredning, Dinamarca. O dispositivo foi conectado à rede em 2003 e testado por vários anos, (FALCÃO, 2010).

Ainda segundo o autor, ao contrário da energia eólica que é uma tecnologia afirmada, atualmente existe uma grande variedade de sistemas para a conversão da energia oceânica. Todos os dispositivos estão em fase de desenvolvimento e competindo uns contra os outros, não deixando claro quais tecnologias serão adotadas.

2.4.2 Energia das Marés e Correntes Oceânicas

O nível médio da superfície dos oceanos não se mantém sempre estacionário. A atração gravitacional do Sol e da Lua, movimentam a massa líquida no sentido vertical, originando as marés e, também, horizontalmente, provocando as correntes de maré. As correntes oceânicas são formadas pelo aquecimento desigual entre os diferentes pontos do planeta pelo Sol e pelos grandes sistemas de ventos resultantes.

Devido a maior densidade, os movimentos causados pela movimentação de água, tanto por correntes oceânicas quanto por correntes de marés, possuem muito mais energia do que o movimento do ar. Isto quer dizer que mesmo correntes oceânicas lentas podem gerar eletricidade de maneira muito mais econômica que sistemas eólicos.

A energia de uma corrente uniforme (U), em uma profundidade (d), por unidade de área da superfície livre pode ser definida por:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho d U^2 \quad (2.3)$$

Comparando-se a energia total de uma onda com a energia de uma corrente oceânica chega-se a seguinte equação:

$$H = 2U \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (2.4)$$

Uma corrente oceânica de 2 m/s a uma profundidade de 5 m teria energia equivalente a uma onda com altura igual a:

$$H = 2U \sqrt{\frac{d}{g}} \therefore H = 2,86m$$

Alguns sistemas de energia das marés são constituídos de barragens, semelhante ao de uma usina hidrelétrica, construída próxima ao mar, responsáveis pela captação de água durante a maré alta. A água armazenada é liberada durante a baixa da maré e, ao passar por uma turbina, gera energia elétrica. Outros sistemas são compostos por equipamentos constituídos de rotores e pás, como no caso dos geradores eólicos, que aproveitam os movimentos horizontais das correntes, tanto de marés quanto oceânicas.

A Figura 2.12 apresenta algumas tipologias em equipamentos para aproveitamento das correntes oceânicas.

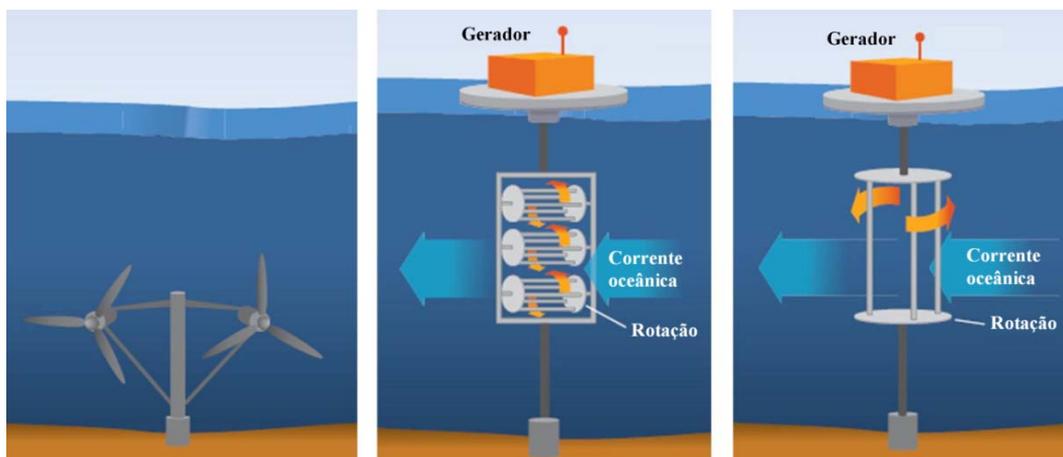


Figura 2.12 - Tipologias para conversão de energia de correntes oceânicas.

Fonte: IPCC (2012).

2.5 PROJETO VIVACE

Todas as tecnologias e princípios de funcionamentos abordados no subcapítulo anterior ainda estão em fase de testes ou são projetos piloto a fim de melhor avaliar sua potencialidade e eficiência no aproveitamento das energias renováveis do mar. Muitos outros projetos foram abandonados ou estão em fase de melhorias, pois não apresentaram o resultado esperado ou não suportaram a diversidade de intempéries quando se trata de ambientes marinhos.

No que diz respeito a questão ambiental, alguns equipamentos são vistos com desconfiança, principalmente aqueles que utilizam fluidos que são bombeados internamente para movimentar geradores, devido ao risco de vazamentos destes fluidos. Além disso, todas estas tecnologias ainda não comprovaram uma eficiência maior que aquela conseguida com geradores eólicos, fazendo com que não recebam maiores investimentos.

Desenvolvido pelos pesquisadores Michael M. Bernitsas e Kamaldev Raghavan ambos da Universidade de Michigan nos Estados Unidos, um novo dispositivo denominado VIVACE vem se apresentando como mais uma forma alternativa de geração de energia elétrica que utiliza fontes renováveis. A tecnologia utiliza vibrações produzidas por perturbação do escoamento, particularmente VIV e galloping, para a movimentação alternada de cilindros circulares e a posterior geração de eletricidade.

Vibrações induzidas por escoamento são um fenômeno altamente prejudicial podendo produzir desde a fadiga de materiais, aumentando os custos com manutenção, até a ruptura e a ruína de estruturas completas. Porém o VIVACE faz exatamente o contrário. As VIE são estimuladas e as oscilações produzidas no cilindro são aplicadas em geradores de energia elétrica.

Qualquer dispositivo cujo objetivo seja aproveitar a energia limpa, renovável e abundante dos oceanos ou outros recursos hídricos nos EUA deve atender a alguns requisitos principais: ter alta densidade de energia, ser discreto, ter baixa manutenção, ser robusto e ter vida útil considerável entre 10 e 20 anos, (Bernitsas et al., 2008).

Basicamente o sistema é constituído por um cilindro circular elasticamente montado na sua forma mais simples e somente com liberdade para oscilar transversalmente ao escoamento. Sob determinadas condições, o cilindro começa a

desenvolver oscilações que, então, são aproveitadas em conversores que transformam a energia cinética produzida pela movimentação dos cilindros em energia elétrica.

Os protótipos do projeto VIVACE garantem a produção de energia elétrica a partir de correntes de apenas 2 nós, tornando-o mais útil que a maior parte dos sistemas que utilizam correntes oceânicas como turbinas ou hélices, que normalmente precisam em média de 5 a 6 nós para operar de forma eficiente.

A Figura 2.13 mostra o aspecto físico de um dispositivo VIVACE.

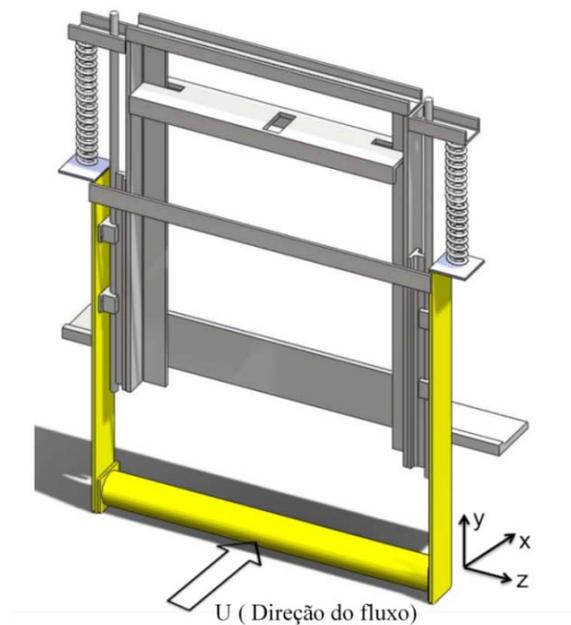


Figura 2.13 - Esquema básico do VIVACE.

Fonte: Vortex Hydro Energy (2014).

Bernitsas et al. (2008), afirmam que o dispositivo é capaz de aproveitar o fenômeno das VIV de forma controlada, produzindo energia elétrica limpa e renovável e que os dispositivos podem utilizar tanto correntes oceânicas quanto correntes fluviais.

Ainda segundo o autor, o conversor utilizado é completamente diferente de qualquer tecnologia existente e como as oscilações produzidas pelo cilindro são bastante lentas, cerca de um ciclo por segundo, o sistema praticamente não interfere no ambiente.

Os conversores VIVACE podem utilizar diversos tipos de geradores. Porém pela própria característica física dos equipamentos, o gerador linear pode ser o tipo que mais se adapta, já que as extremidades do cilindro podem ser fixas a potentes ímãs que deslizam alternadamente sobre circuitos magnéticos formados por bobinas, produzindo

eletricidade. A energia gerada pode ser acumulada em baterias e posteriormente convertida em corrente alternada para ser utilizada.

A Figura 2.14 apresenta um protótipo do VIVACE instalado no canal de testes da Universidade de Michigan.



Figura 2.14 - Canal de testes com o dispositivo VIVACE instalado.

Fonte: Vortex Hydro Energy (2014).

De acordo com Bernitsas et al. (2008), o equipamento possui densidade de energia superior a outras tecnologias para conversão de energia oceânica.

O autor cita ainda que o VIVACE pode gerar eletricidade para as mais diversas aplicações e, devido a flexibilidade do sistema pode ser construído em diversas escalas. Assim pode ser composto por um único cilindro de 40 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro ou de vários cilindros com 20 m de comprimento e diâmetro de 1 m.

Em agosto de 2010 a empresa Vortex Hydro Energy, começou testes em águas abertas no rio St. Clair em Port Huron, Michigan.

Excelentes estudos sobre o VIVACE foram conduzidos por Raghavan e Bernitsas (2011), Bernitsas et al. (2008), Che-Chun (Jim) et al. (2011) e por Lee e Bernitsas (2011).

3. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ESCOAMENTO EM CORPOS ROMBUDOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para que se entenda melhor como se processam as oscilações em corpos cilíndricos a partir de correntes oceânicas é necessária uma maior compreensão sobre a ação do escoamento de um fluido sobre corpos rombudos. Para tanto este capítulo apresenta alguns dos principais fundamentos da interação fluido-cilindro bem como alguns experimentos realizados visando mensurar algumas grandezas envolvidas.

3.2 CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DO ESCOAMENTO

Qualquer objeto rombudo imerso em uma corrente de fluido provoca a separação do escoamento próximo a sua superfície. Dependendo das características do fluido e do escoamento, instabilidades poderão ocorrer, causando a formação e o desprendimento de vórtices a jusante do objeto.

O desprendimento de vórtices é um fenômeno natural que ocorre em corpos de diversas geometrias quando estes estão submersos e submetidos ao escoamento de um fluido. Tratando-se especificamente de cilindros circulares, caso estes fossem colocados em um fluido ideal (não viscoso), matematicamente o fluido não encontraria resistência alguma devido ao equilíbrio de forças geradas, ou seja, a resultante de forças seria nula e as linhas de corrente contornariam o cilindro sem nenhuma dificuldade independente das características do cilindro ou do escoamento.

No entanto, a viscosidade submete qualquer corpo, imerso em um fluido, a uma resistência, criando um gradiente de velocidade (ou de pressão) e promovendo o desprendimento da camada limite a partir de uma certa distância da borda de ataque. O desprendimento da camada limite, que depende de certos parâmetros, exerce resistência ao avanço do fluido sobre o cilindro.

No que tange a dinâmica dos fluidos, a ação do escoamento sobre o cilindro, sob determinadas condições, fará com que ocorram fenômenos devido a interação simultânea entre três regiões de forte cisalhamento: a camada limite, a zona de separação e a esteira de vórtices (Figura 3.1).

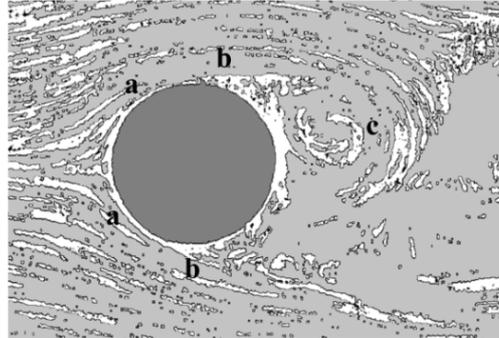


Figura 3.1 - Escoamento viscoso ao redor de um corpo cilíndrico. Nota-se na figura a camada limite (a), a zona de separação (b) e a formação da esteira de vórtices (c).

Fonte: Adaptado de Schlichting e Gersten (2001).

Bearman (1984) apresenta uma descrição física feita por Gerrard (1966) bastante útil na compreensão dos fenômenos que ocorrem na região de formação de vórtices a jusante de um cilindro circular.

3.2.1 Número de Reynolds

A formação da esteira de vórtices depende da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas. O parâmetro adimensional que relaciona estas forças e que, portanto, define regimes para o escoamento é o número de Reynolds (Re), dado por:

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (3.1)$$

onde D é o comprimento característico (no caso de cilindros corresponde ao diâmetro), U é a velocidade do escoamento e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Um valor muito baixo de Re corresponde ao predomínio das forças viscosas sobre as forças de inércia, isto é, maior será a espessura da camada limite. A partir de

certos valores de Re , começam a dominar as forças inerciais e o efeito viscoso apenas se faz sentir na vizinhança imediata da superfície sólida.

Sumer e Fredsoe (2006) identificam e representam os diversos regimes de escoamento segundo o número de Reynolds (Figura 3.2).

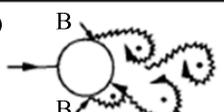
a)		Não há separação da camada limite	$Re < 5$
b)		Forma-se um par de vórtices simétricos	$5 < Re < 40$
c)		Forma-se uma esteira sem turbulência	$40 < Re < 200$
d)		Faixa de transição à turbulência na esteira	$200 < Re < 300$
e)		Esteira completamente turbulenta. A: Separação da camada limite laminar	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Sub Crítico
f)		A: Separação da camada limite laminar B: Separação da camada limite turbulenta	$3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$ Crítico
g)		B: Separação da camada limite turbulenta. Camada limite parcialmente laminar e parcialmente turbulenta	$3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ Super Crítico
h)		C: Camada limite completamente turbulenta em um lado	$1,5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Transição superior
i)		C: Camada limite completamente turbulenta nos dois lados	$4 \times 10^5 < Re$ Transcrítico

Figura 3.2 - Regime de escoamento ao redor de um cilindro circular fixo.

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

Convém ressaltar que a esteira de vórtices em um cilindro fixo é completamente diferente da esteira formada para um cilindro com liberdade para oscilar transversalmente ao fluxo. Quando em oscilação, o cilindro apresenta padrões de emissão de vórtices diretamente relacionados a amplitude e a frequência destas oscilações.

Williamson e Roshko (1988) mapearam as diversas configurações e padrões de emissão de vórtices a jusante de cilindros livres para oscilar transversalmente ao fluxo. Os estudos foram feitos para uma ampla faixa de velocidades no escoamento, onde os modos de emissão de vórtices foram classificados de acordo com a resposta do cilindro.

Através de um trabalho experimental em túnel de vento, Brika e Laneville (1999) estudaram a resposta dinâmica de um cilindro circular longo e flexível, na esteira de outro cilindro estacionário geometricamente semelhante, onde são apresentados os modos de emissão de vórtices para cada arranjo feito.

3.2.2 Força de arrasto e força de sustentação

Como é possível verificar pela Figura 3.2 a configuração com um par de vórtices simétricos é mantida até números de Reynolds próximos a 40. A partir deste ponto, a configuração se modifica para uma situação onde ocorre o desprendimento de vórtices de forma periódica e alternada. Em consequência, a distribuição da pressão em torno do cilindro sofre alterações a medida que evolui o processo de desprendimento dos vórtices, resultando em duas forças atuantes sobre o cilindro: A força de arrasto e a força de sustentação.

A força de arrasto ou *Drag* submete a estrutura a um esforço na mesma direção do fluxo. A força de arrasto (F_D) por unidade de comprimento em um cilindro de diâmetro (D), imerso em um fluido de massa específica (ρ) e com velocidade de escoamento (U) é dado por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_D \quad (3.2)$$

onde C_D corresponde ao coeficiente de arrasto.

A força de sustentação ou *Lift* (F_L) se desenvolve no sentido perpendicular ao escoamento e é definida por:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L \quad (3.3)$$

onde C_L corresponde ao coeficiente de sustentação.

Sumer e Fredsoe (2006) apresentam os resultados de um trabalho experimental de Drescher (1956) onde foi feita uma sequência de fotografias do fluxo da esteira a jusante de um cilindro. No estudo foi possível analisar a distribuição da pressão e as componentes de força sobre a superfície de um cilindro.

Após a análise dos resultados foi obtido um registro com o comportamento das forças de arrasto e de sustentação, onde se verifica que a força de arrasto oscila em torno de um valor médio e frequência igual ao dobro da frequência de desprendimento de vórtices enquanto a força de sustentação oscila em torno de zero, com a mesma frequência de desprendimento de vórtices e podendo atingir valores extremos consideráveis.

A Figura 3.3 mostra o gráfico obtido com os estudos feitos por Drescher (1956) onde é possível ver o comportamento das forças de arrasto e sustentação.

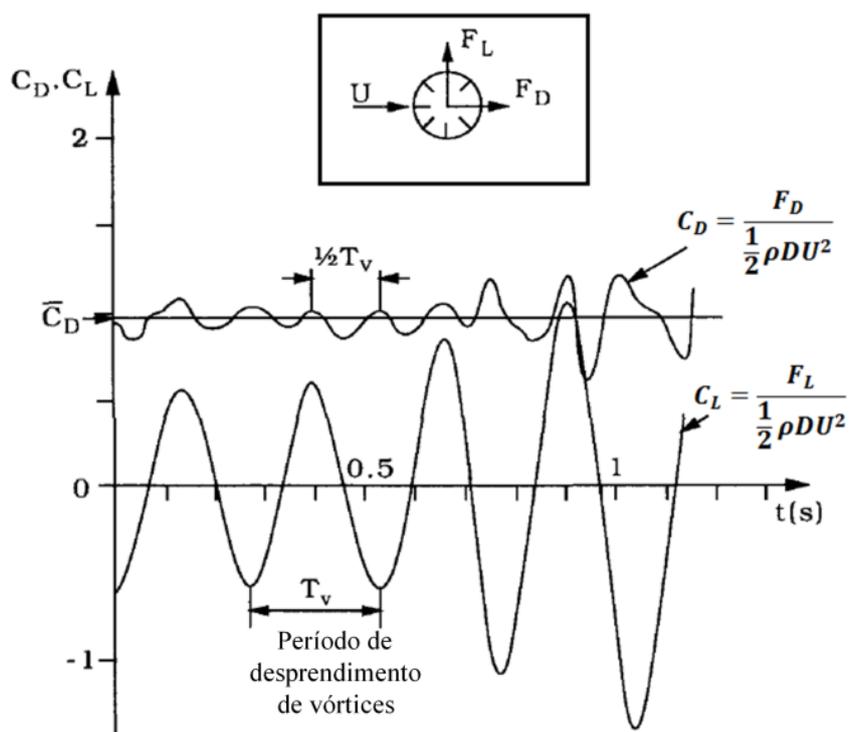


Figura 3.3 - Forças de arrasto e sustentação devido a distribuição da pressão em torno um cilindro fixo.

Fonte: Adaptado de Drescher (1956) *apud* Sumer e Fredsoe (2006).

3.2.3 Número de Strouhal

A frequência de desprendimento de vórtices (f_{vs}) é também conhecida como frequência de Strouhal (f_{st}) e a configuração que se desenvolve é conhecida como esteira de Von Karman. O parâmetro adimensional que regula o fenômeno é o número de Strouhal (St), conforme apresentado pela Equação 3.4.

$$St = \frac{f_{vs} D}{U} \quad (3.4)$$

A frequência de desprendimento de vórtices (f_{vs}), quando normalizada com a velocidade de fluxo (U) e com o diâmetro do cilindro (D) pode, por razões dimensionais, ser vista como uma função do número de Reynolds (Sumer e Fredsoe, 2006).

Blevins, (2001) apresenta uma dependência do número de Strouhal em função do número de Reynolds, para cilindros circulares (Figura 3.4).

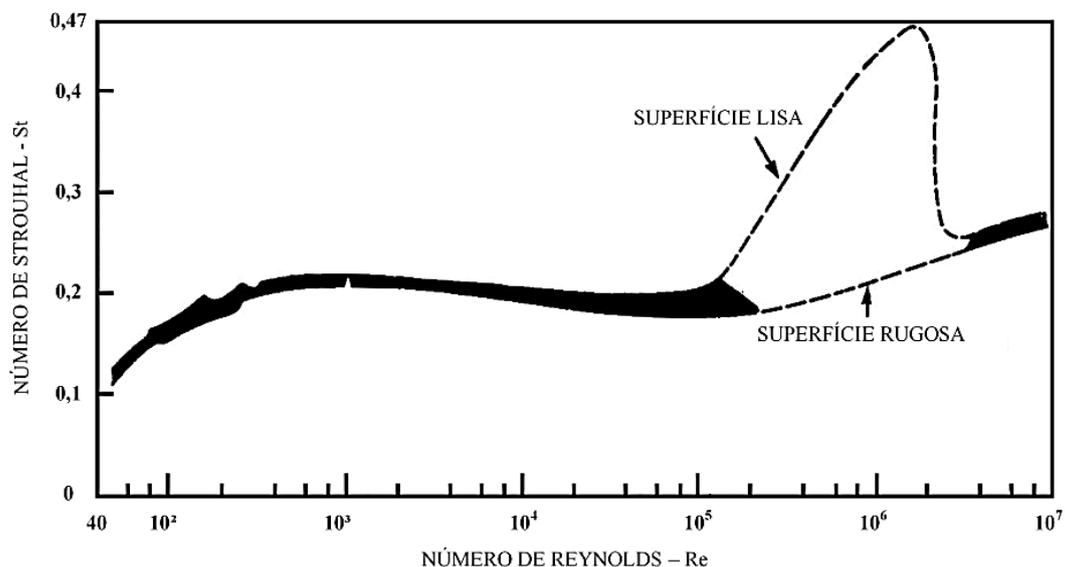


Figura 3.4 - Número de Strouhal em função do número de Reynolds.

Fonte: Adaptado de Blevins (2001).

Conforme se verifica na Figura 3.4, o número de Strouhal se mantém em torno de 0,2 para uma grande faixa de números de Reynolds. Esta relação é válida para cilindros circulares fixos.

3.2.4 Vibrações Induzidas por Escoamento (VIE)

Vibrações induzidas por escoamento são fenômenos que se fazem presentes em muitos projetos de engenharia em que estruturas estejam sujeitas a influência de um fluxo seja de água ou ar.

Existem diversos tipos de VIE, cada uma derivada de um fenômeno específico ou por combinações de fenômenos diferentes. Em estruturas cilíndricas, as VIE provocam vibrações transversais e paralelas em relação a direção do fluxo. Os tipos mais conhecidos de VIE são vibrações induzidas por vórtices, galloping e *flutter*.

Quando a vibração é causada pela distribuição da pressão ao redor da estrutura devido ao desprendimento de vórtices, tem-se o fenômeno conhecido por vibrações induzidas por vórtices. Dependendo da rigidez do sistema, as magnitudes das forças resultantes destas variações de pressão podem induzir deslocamentos e deformações na estrutura fazendo-a oscilar (Figura 3.5).

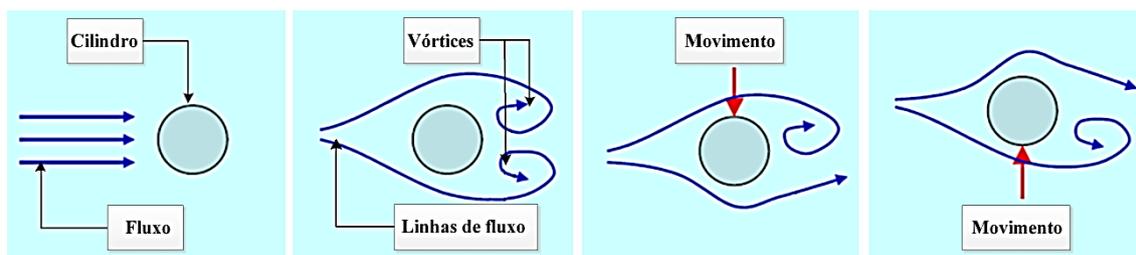


Figura 3.5 - Desprendimento de vórtices ao redor de um cilindro circular.

Fonte: umich.edu (2014).

Quando a oscilação da força de sustentação resulta da variação do ângulo de ataque do escoamento em relação ao corpo da estrutura tem-se aí o efeito denominado Galloping.

Este fenômeno é caracterizado pela progressiva amplitude na vibração transversal de um corpo devido ao aumento da velocidade do escoamento. É um fenômeno muito comum em linhas de transmissão de alta tensão em locais cuja baixa temperatura induz a formação de gelo na parte inferior dos condutores.

A Figura 3.6 mostra como se processa um fluxo de ar sobre um cilindro semicircular. As linhas representam o escoamento do fluxo de ar enquanto a região que

se encontra preenchida por pontos é caracterizada pela presença de vórtices irregulares e turbulentos.

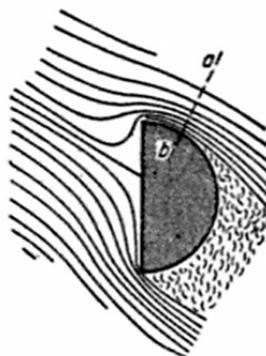


Figura 3.6 - Fluxo de ar em torno de um cilindro semicircular.

Fonte: Den Hartog (1985).

O efeito galloping também pode se manifestar em um cilindro circular quando este se encontra imerso na esteira de outro cilindro localizado à montante. Nesta situação o fluxo que incide sobre o cilindro à jusante não é uniforme e apresenta um campo de velocidades variável e alternado com efeito cisalhante. Estas variações cíclicas do escoamento incidente é que causam os efeitos de excitação nas forças fluidas de galloping surgidas no cilindro a jusante.

O efeito galloping produzido pelo vento é extensivamente citado na literatura pelo efeito destrutivo que pode exercer sobre pontes, edifícios, cabos ou placas de transito. Menos citado, porém, é a ocorrência deste fenômeno devido as correntes oceânicas sobre estruturas marítimas (Bokaian & Geoola, 1984 *apud* Paidoussis, 2011).

Blevins (2001) ressalta que a utilização dos termos *galloping* e *flutter* possui mais caráter histórico. Enquanto o termo *galloping* foi associado às instabilidades de estruturas com geometria transversal não circular da engenharia civil com um grau de liberdade, o termo *flutter* foi associado à instabilidades de estruturas da engenharia aeroespacial, as quais envolvem mais de um grau de liberdade. Nos dois casos, se a força fluida tende a aumentar as oscilações, então esta estrutura é instável e apresenta este fenômeno de excitação.

Alguns estudos sobre o efeito galloping foram conduzidos por Bokaian (1987, 1989 e 1995).

3.2.5 Velocidade Reduzida

A velocidade reduzida (U_r) é um parâmetro adimensional que relaciona a velocidade local do escoamento (U), a frequência de oscilação do cilindro (f_{osc}) e o diâmetro do cilindro (D).

$$U_r = \frac{U}{f_{osc} D} \quad (3.5)$$

Considerando que na condição de ressonância se tem $f_{osc} = f_n = f_{vs}$, a velocidade reduzida, nestas condições, pode ser dada pelo inverso do número de Strouhal.

3.2.6 Amplitude de resposta adimensional

A resposta devido ao desprendimento de vórtices pode se dar na direção do fluxo (*in line*) ou ser no sentido perpendicular à corrente. Uma forma adimensional de se tomar esta resposta é dividindo a amplitude (A) do deslocamento pelo diâmetro (D) da seção transversal do cilindro.

$$A/D \quad (3.6)$$

3.2.7 Lock-in

O desprendimento de vórtices é resultado da força oscilatória transversal ao fluxo, aplicada sobre o cilindro, que vibra a determinadas frequências. Se a frequência natural do sistema (f_n) for igual ou próxima a frequência de desprendimento dos vórtices (f_{vs}), tem-se aí uma condição de ressonância, onde o deslocamento do cilindro alcançará amplitudes significativas. Nestas condições, se o cilindro for livre para oscilar pode ocorrer o fenômeno de *lock-in* onde a frequência natural (f_n) do cilindro passa a controlar o desprendimento de vórtices em clara violação da relação de Strouhal.

De acordo com Sumer e Fredsoe (2006) este fenômeno possui uma curva de resposta diferente conforme o tipo de fluido (Figura 3.7).

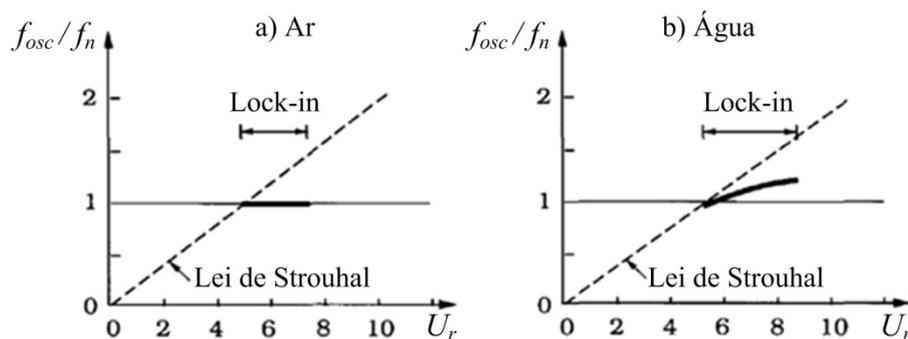


Figura 3.7 - Fenômeno de lock-in no ar e na água.

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

Sendo f_{osc} correspondente a frequência de vibração do cilindro, f_n a frequência natural do sistema e U_r a velocidade reduzida.

No intervalo de lock-in, são presumíveis a ocorrência de três frequências coincidentes entre si: a frequência de vibração do cilindro (f_{osc}), a frequência de despreendimento de vórtices (f_{vs}) e a frequência natural (f_n). Isto significa que neste intervalo, o despreendimento de vórtices está em sintonia com o movimento do cilindro. Como resultado tem-se vibrações de grandes amplitudes, (Sumer e Fredsoe, 2006).

3.3 ARRANJOS EXPERIMENTAIS COM CILINDROS

Paidoussis (2011), apresenta um experimento típico para a visualização do efeito galloping realizado por Hartog (1956), onde é utilizado um arranjo com cilindro semicircular.

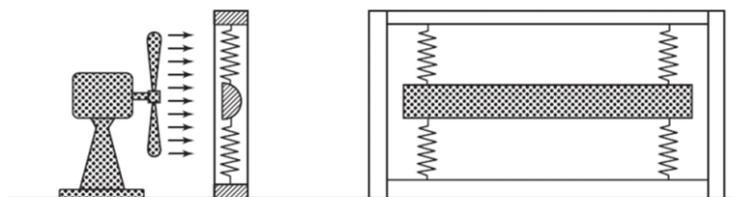


Figura 3.8 - Experimento para demonstração do galloping.

Fonte: Paidoussis (2011).

Conforme descrito anteriormente um cilindro exposto a um escoamento experimenta desprendimento de vórtices para $Re > 40$. A partir deste ponto observam-se variações periódicas nas forças de arrasto e sustentação no cilindro. Se o cilindro é montado elasticamente, estas forças induzem vibrações fazendo-o oscilar.

A força de sustentação pode induzir vibrações transversais, enquanto a força de arrasto pode induzir vibrações alinhadas ao escoamento ou *in-line* (Figura 3.9).

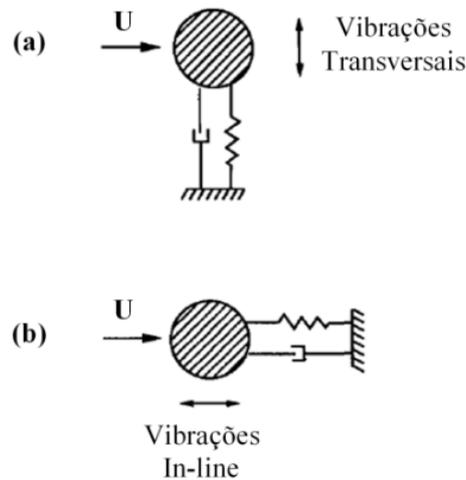


Figura 3.9 - Vibrações induzidas por fluxo transversal em um cilindro circular.

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

As vibrações produzidas pela força de sustentação são bem descritas por Sumer e Fredsoe (2006) onde é citado um experimento realizado por Feng (1968). O aparato experimental é constituído basicamente por um cilindro montado elasticamente com um grau de liberdade na direção transversal ao escoamento.

A Figura 3.10 apresenta um esquema do experimento realizado por Feng (1968).

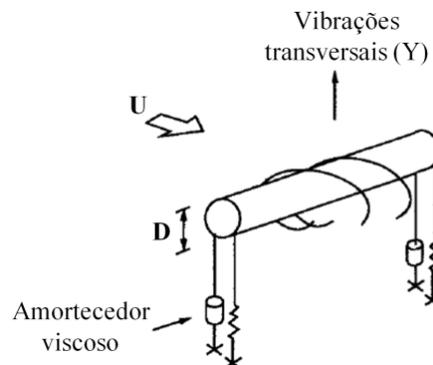


Figura 3.10 - Experimento de Feng (1968).

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

O sistema foi exposto a um fluxo de ar, cuja velocidade foi aumentada com pequenos incrementos, a partir de zero. A cada incremento de fluxo (U) foram mensuradas, entre outros parâmetros, a frequência de desprendimento de vórtices (f_{vs}), a frequência de oscilação do cilindro (f_{osc}) e a amplitude de oscilação (A/D).

A Figura 3.11 mostra os gráficos obtidos nos experimentos realizados por Feng.

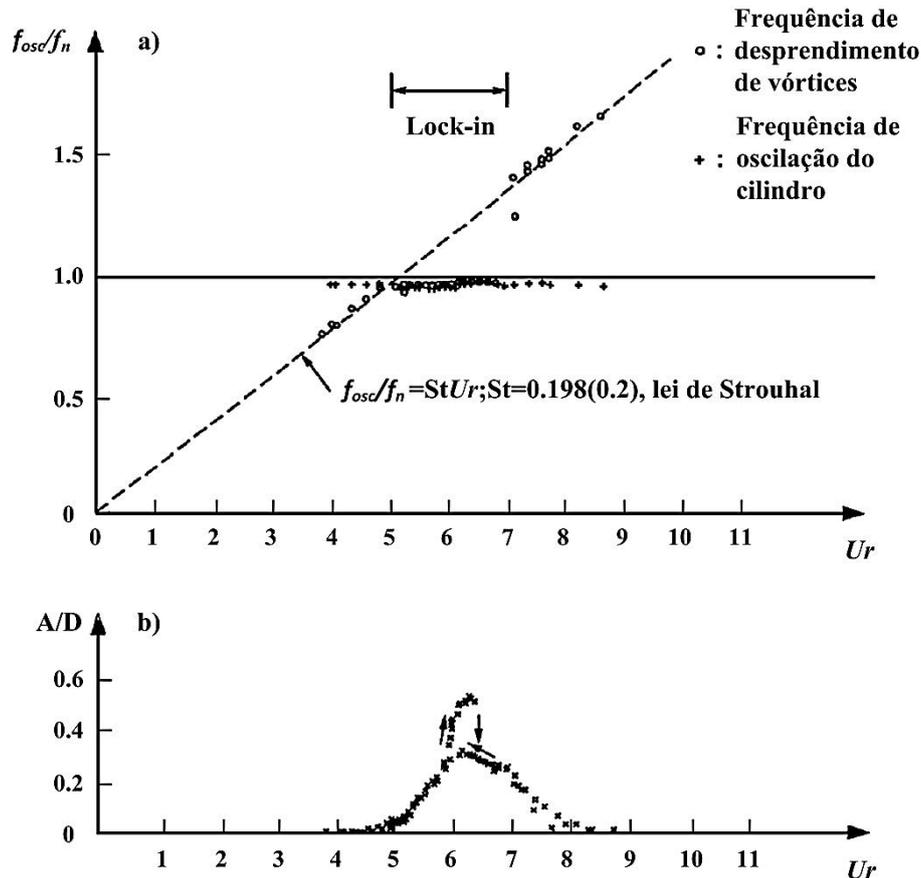


Figura 3.11 - Gráficos obtidos com as análises de Feng (1968).

Fonte: Adaptado de Sumer e Fredsoe (2006).

A partir da análise dos gráficos apresentados na Figura 3.11 podem ser feitas importantes considerações:

- Praticamente não se verificam vibrações até $U_r \leq 4$ (Figura 3.11 a);
- A frequência de vibração do cilindro segue a lei de Strouhal até $U_r = 5$. A partir deste ponto, a oscilação do cilindro começa a seguir a frequência natural do sistema. Conforme a Figura 3.11 isto se observa para o intervalo $5 < U_r < 7$. Conclui-se, portanto que neste intervalo a frequência de desprendimento de vórtices (f_{vs}) não é controlada pela relação de Strouhal, mas pela vibração do cilindro, configurando uma situação de lock-in (Figura 3.11 a);

- c) Neste intervalo, o desprendimento de vórtices e conseqüentemente a força de sustentação oscila de acordo com o movimento do cilindro, resultando em grandes amplitudes, (Figura 3.11 b).

No experimento realizado por Khalak e Williamson (1999) para demonstração e análise de VIV, um cilindro rígido em pêndulo é submetido a um fluxo transversal e uniforme de água. A montagem permite ao cilindro somente oscilar no sentido transversal ao fluxo. A medida que a velocidade de fluxo é variada, o movimento do cilindro é analisado em termos da sua amplitude e frequência de oscilação (Figura 3.12).

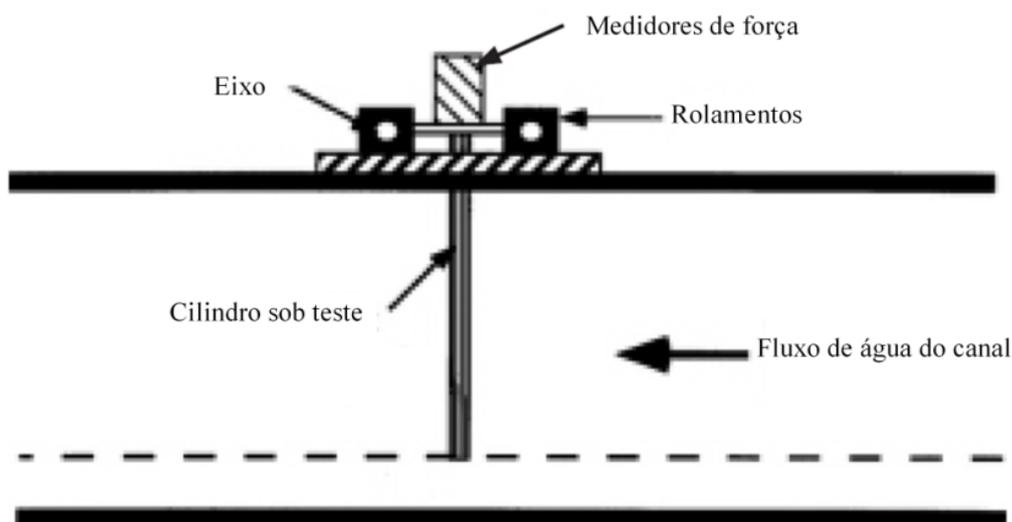


Figura 3.12 - Montagem para análise de VIV.

Fonte: Adaptado de Khalak e Williamson (1999).

Um dos resultados obtidos pelos experimentos de Khalak e Williamson (1999) é apresentado na Figura 3.13, onde se pode observar a ampliação dos deslocamentos na região de lock-in. Na figura é possível ver a comparação feita com o trabalho feito por Feng (1968).

No trabalho de Khalak e Williamson (1999) verifica-se uma descontinuidade na curva entre as regiões do ramo de excitação inicial (*initial excitation branch*), a região dos picos intermediários (*upper branch*) e o ramo final (*lower branch*). Esta mesma descontinuidade não se verifica no trabalho de Feng (1968), apresentado na mesma figura.

Convém ainda salientar que os experimentos de Khalak e Williamson (1999) foram realizados em água e que os experimentos de Feng (1968) foram realizados em túnel de vento.

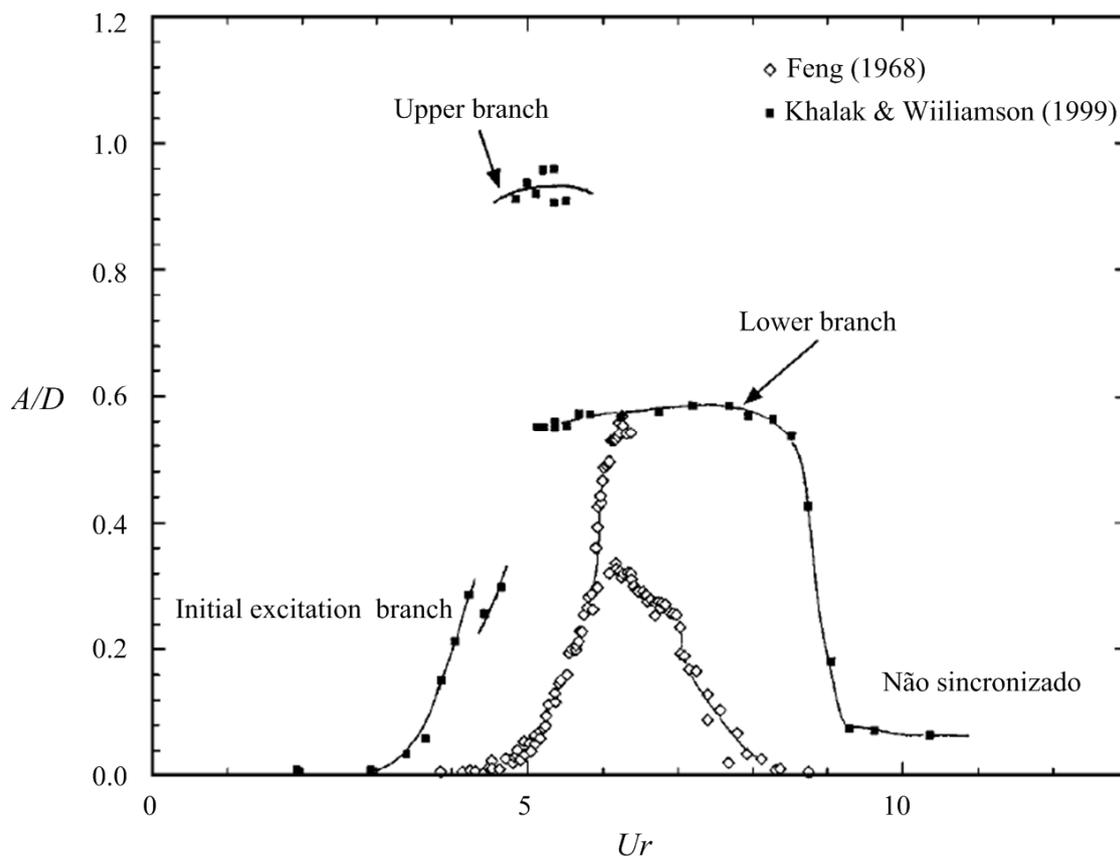


Figura 3.13 - Resultado dos experimentos com cilindros rígidos em pêndulo.

Fonte: Adaptado de Khalak e Williamson (1999).

Em outro trabalho semelhante, Govardhan e Williamson (2006), estudaram o comportamento de cilindros expostos transversalmente ao fluxo onde foi possível controlar o amortecimento do sistema. Através de um motor elétrico, que aplicava mais ou menos tensão às molas utilizadas na montagem, foi possível avaliar a resposta em termos de amplitude de oscilação para diversas condições de amortecimento. Os estudos realizados mostraram que o número de Reynolds exerce muito mais influência sobre a amplitude das oscilações obtidas no cilindro do que outros parâmetros como as variações na relação amortecimento ou de massa.

A Figura 3.14 apresenta um esquema do aparato montado para a realização dos experimentos realizados por Govardhan e Williamson (2006).

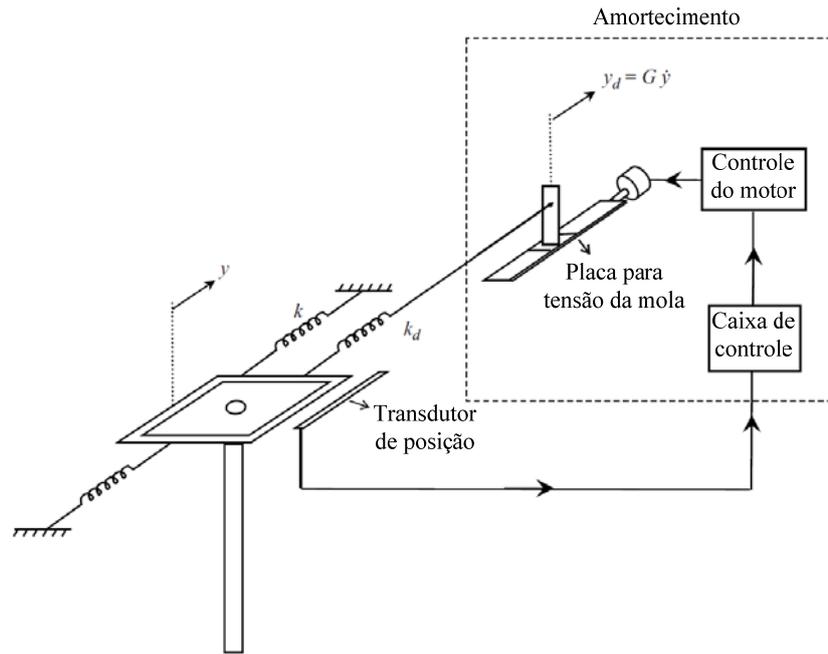


Figura 3.14 - Experimento para estudo sobre VIV com controle de amortecimento.

Fonte: Adaptado de Govardhan e Williamson (2006).

Gopalkrishnan (1993) estudou a amplitude modulada devido à VIV transversal. Os experimentos foram realizados em um canal de testes retangular com 30 m de comprimento do Departamento de Engenharia Oceânica do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). O canal é equipado com um dispositivo de reboque, onde o modelo da Figura 3.15 foi suspenso e arrastado pelo canal.

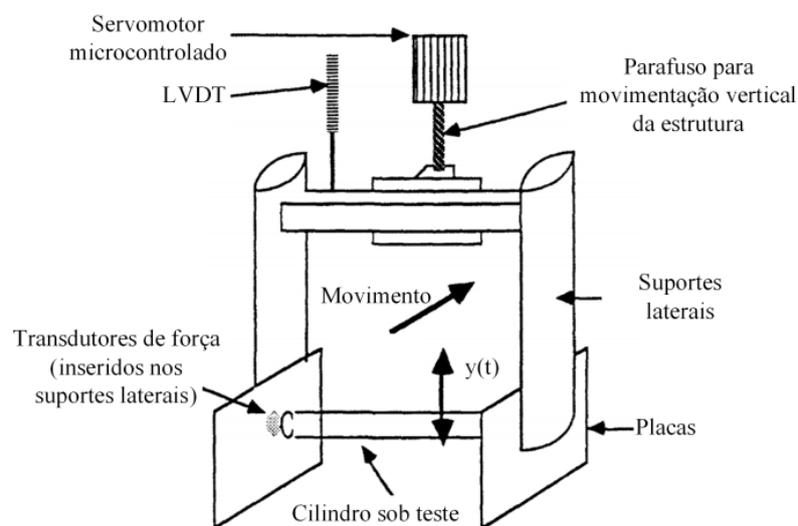


Figura 3.15 - Aparato utilizado nos experimento para estudos de VIV transversal.

Fonte: Gopalkrishnan (1993).

Ao mesmo tempo em que era deslocado, todo o conjunto oscilava verticalmente em relação ao canal e transversalmente em relação ao escoamento, utilizando um conjunto com parafuso de avanço acionado por um servo-motor controlado por microprocessador. Utilizando um cilindro de alumínio polido de 2,54 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento, as forças de arrasto e sustentação, bem como os deslocamentos, foram registrados por um LVDT (*Linear Variable Displacement Transducers*) e gravados para posterior análise. Através deste estudo foram obtidas algumas relações importantes entre coeficientes hidrodinâmicos como a amplitude e a frequência de vibração, hoje utilizadas por programas computacionais na previsão de VIV.

Um experimento composto por um cilindro montado elasticamente e livre para oscilar na direção transversal ao escoamento é apresentado por Vikestad et al. (2000). Neste experimento o cilindro foi submetido a um fluxo com velocidade constante e teve seu comportamento analisado sob diversas situações inclusive com o apoio de excitação externa para amplitude e frequência. O cilindro analisado possuía 2 m de comprimento por 100 mm de diâmetro, e foi arrastado em um canal com água com 25 m de comprimento por 2,5 m de largura. Uma das conclusões obtidas com a realização dos experimentos foi que a frequência de resposta foi o parâmetro mais influenciado pela excitação externa. A Figura 3.16 mostra como ficou o arranjo feito para a condução dos ensaios.

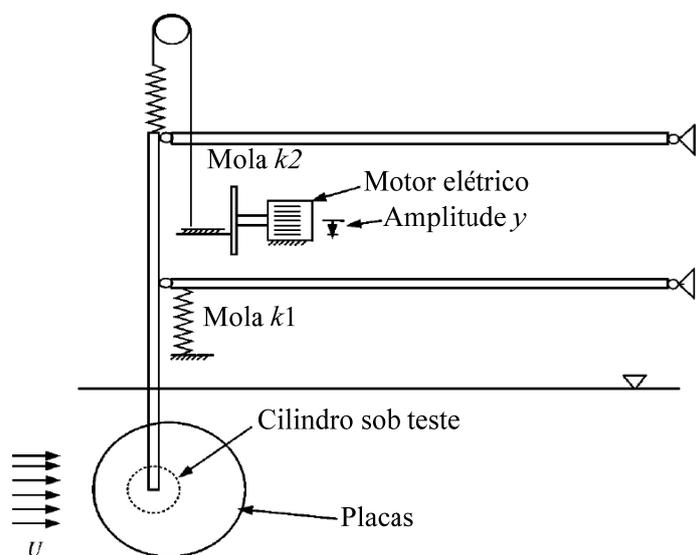


Figura 3.16 - Aparato montado em cilindro rígido não estacionário para análise e controle de VIV

Fonte: Adaptado de Vikestad et al. (2000).

Outros experimentos com cilindros isolados expostos transversalmente ao fluxo foram conduzidos por Morse e Williamson (2010).

O efeito da variação dos parâmetros geométricos de cintas helicoidais na atenuação das vibrações induzidas por vórtice foram analisadas em um experimento realizado por Korkischko e Meneghini (2010). A supressão na oscilação foi verificada tanto para o caso de cilindros circulares isolados como para o caso do cilindro com cintas colocado à jusante de outro, em diversas posições alinhadas.

A Figura 3.17 apresenta a montagem feita para a realização dos experimentos.

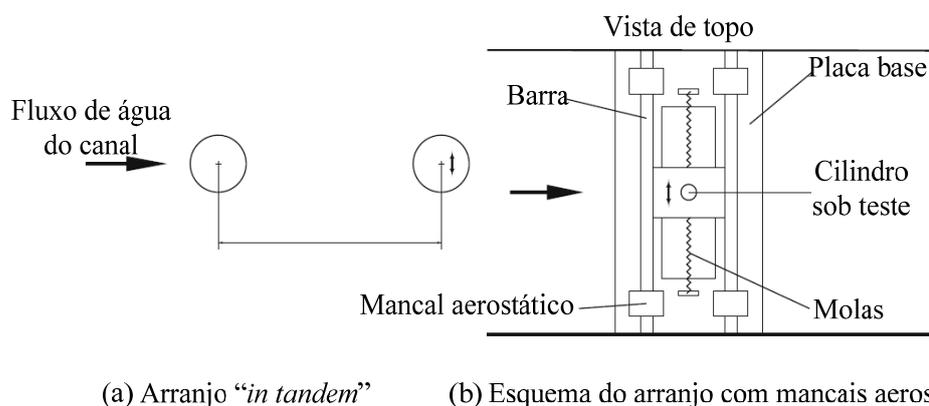


Figura 3.17 - Montagem para a condução dos experimentos com cilindros.

Fonte: Adaptado de Korkischko e Meneghini (2010)

Também neste caso o cilindro foi montado de forma a oscilar unicamente no sentido transversal ao fluxo. Os ensaios foram conduzidos em um canal de recirculação de água, medindo 0,70 m x 0,80 m x 7,50 m do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos da Universidade de São Paulo (USP). As análises foram feitas utilizando-se o processo de estereoscopia digital de velocimetria por imagem de partículas (SDPIV).

Estudos semelhantes, realizados por Wong e Kokkalis (1982), apresentam um comparativo em cilindros com três tipos diferentes de supressores de VIV.

Sumner et al. (1999), estudaram o comportamento do fluxo em arranjos com dois e três cilindros de igual diâmetro e colocados lado a lado com diferentes espaçamentos entre si. Nos experimentos, foram utilizadas diferentes técnicas para a investigação do escoamento à jusante dos cilindros como ejeção de tinta, anemometria de filme quente e velocimetria por imagens de partículas (PIV). Os estudos foram conduzidos em um canal de recirculação de água com área de teste igual a 254 mm x 254 mm. Dentro da faixa em que os estudos foram realizados ($500 \leq Re \leq 3000$) não foram

observadas variações nas quantidades medidas ou diferenças nos padrões de fluxo em grupos de dois ou três cilindros arranjados lado a lado. Os resultados foram bastante semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores (Figura 3.18).

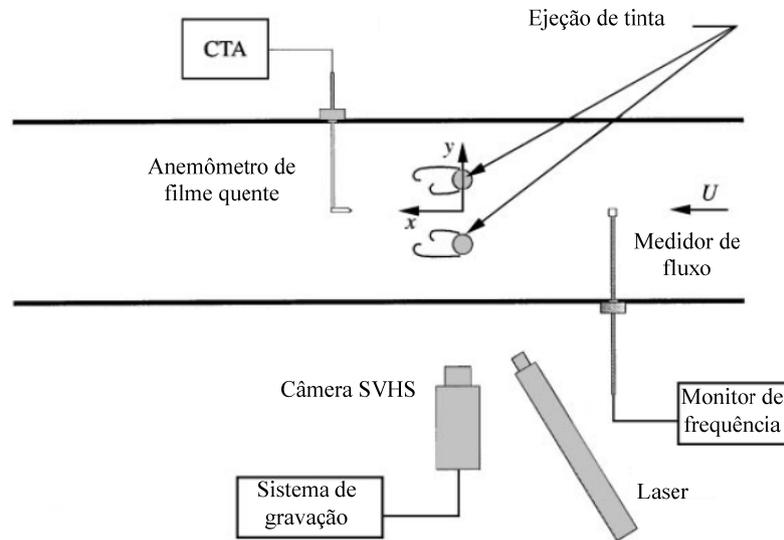


Figura 3.18 - Montagem realizada para a condução dos experimentos.

Fonte: Adaptado de Sumner et al. (1999).

Além destes, outros excelentes trabalhos experimentais visando o estudo da interação fluido estrutura, com a utilização de cilindros circulares foram realizados. Alguns destes trabalhos são citados a seguir.

- Franzini et al. (2009 e 2013) apresentaram os resultados de um trabalho experimental para análise de VIV em cilindros circulares inclinados. Os resultados foram considerados, em parte, semelhantes aos obtidos com cilindros verticais. As principais diferenças estão no fato dos cilindros inclinados apresentarem amplitude de oscilação ligeiramente menor. Com relação as forças de sustentação e arrasto estas se mostraram menores a medida que a inclinação dos cilindros aumentaram.
- Huera-Huarte et al. (2009, 2011 e 2014) realizaram estudos em cilindros flexíveis. Os estudos buscavam avaliar diversos parâmetros como resposta dinâmica em função da tensão aplicada a cilindros isolados ou o efeito das vibrações induzidas por vórtices em pares de cilindros flexíveis dispostos lado a lado ou alinhados (in tandem). Também com cilindros flexíveis Marcollo e Hinwood (2006) realizaram estudos para verificar o comportamento destes na

região de sincronização. As conclusões mais importantes destes estudos foram a obtenção de novos dados sobre as VIV em cilindros flexíveis de extrema importância na adoção de medidas de controle destas vibrações em estruturas offshore tais como riser, linhas de ancoragem ou dutos submarinos submetidos a correntes oceânicas;

- Experimentos com cilindros em fluxo oscilatório são descritos por Sarpkaya (2002 e 2006). A conclusão mais importante destes estudos está na revelação da forma tridimensional do escoamento na zona de separação, em cilindros circulares lisos. Os resultados apresentados podem fornecer importantes informações para a realização de simulações numéricas;
- Experimentos com cilindros alinhados foram conduzidos por Pinto et al. (2012). Os trabalhos realizaram-se no Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE) e foram compostos por dois conjuntos de ensaios. Em cada conjunto, um cilindro foi forçado a oscilar com determinada amplitude e em diversas frequências enquanto o outro foi mantido fixo. O estudo se concentrou em determinar a frequência na esteira através da medição com anemometria de filme quente. Os resultados mostraram a ocorrência de lock in não somente para frequência em que o cilindro foi forçado a oscilar, mas também para seus harmônicos superiores e inferiores;
- Experimentos em túnel de vento para verificar o comportamento das forças de arrasto e sustentação em um par de cilindros agrupados lado a lado ou alinhados (in tandem) foram conduzidos por Zdravkovich (1985 e 1987). Os resultados obtidos mostraram que as oscilações na região de proximidade de interferência foram ampliadas significativamente em comparação com as oscilações na região de não-interferência.

4. INSTALAÇÃO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as características principais dos aparatos confeccionados para a realização dos ensaios experimentais bem como todos os equipamentos e métodos utilizados nos diversos experimentos realizados no túnel de vento. Os ensaios foram realizados nas instalações do Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

4.2 PREPARAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento foi especialmente preparado para a condução dos ensaios experimentais. O conjunto formado por motor, polias, correia e hélice, responsável pela movimentação do ar no interior do túnel, foi substituído por um único conjunto composto somente por motor e hélice. Esta providência foi de fundamental importância, pois a maior parte dos experimentos necessitou de baixas velocidades de fluxo, inatingíveis com o conjunto anterior devido ao grande atrito gerado entre as polias e a correia. Na Figura 4.1 (esquerda) é possível ver o conjunto motor-hélice instalado no túnel de vento.

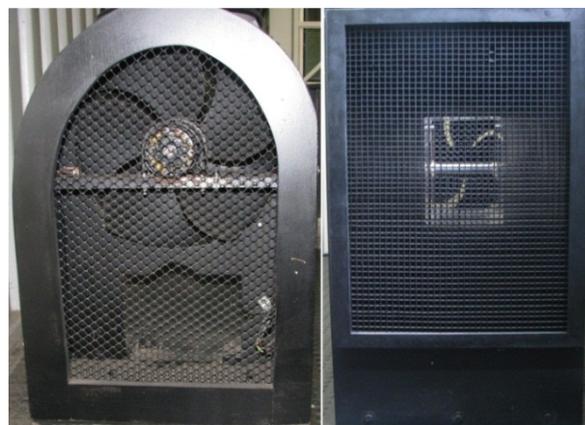


Figura 4.1 - Conjunto motor-hélice (esquerda) e colmeia(direita) do túnel de vento.

Na mesma Figura 4.1 a direita é possível ver a colmeia instalada na entrada de ar do túnel de vento. Esta colmeia, responsável pela retificação do ar na área de testes, possui área livre de 360 mm por 510 mm e é composta por 2.035 furos quadrados de 10 mm de lado x 40 mm de profundidade.

Nas paredes laterais da área de testes foram feitos dezesseis furos com diâmetro de 4 mm e distanciados entre si de 12,5 mm. Com a execução dos furos obteve-se uma matriz de quatro linhas por quatro colunas. O centro do cilindro analisado ficou diretamente alinhado com os centros dos furos da primeira linha e a 37,5 mm dos centros dos furos da primeira coluna. Isto possibilitou a colocação do cilindro fixo nas diversas posições analisadas com variação de 12,5 mm para cada posição tanto no sentido longitudinal quanto no sentido perpendicular ao fluxo. Os diversos posicionamentos foram designados como “X” para aqueles que ocorreram no sentido longitudinal ao escoamento e como “Y” para os que ocorreram no sentido transversal, conforme mostrado na Figura 4.2.

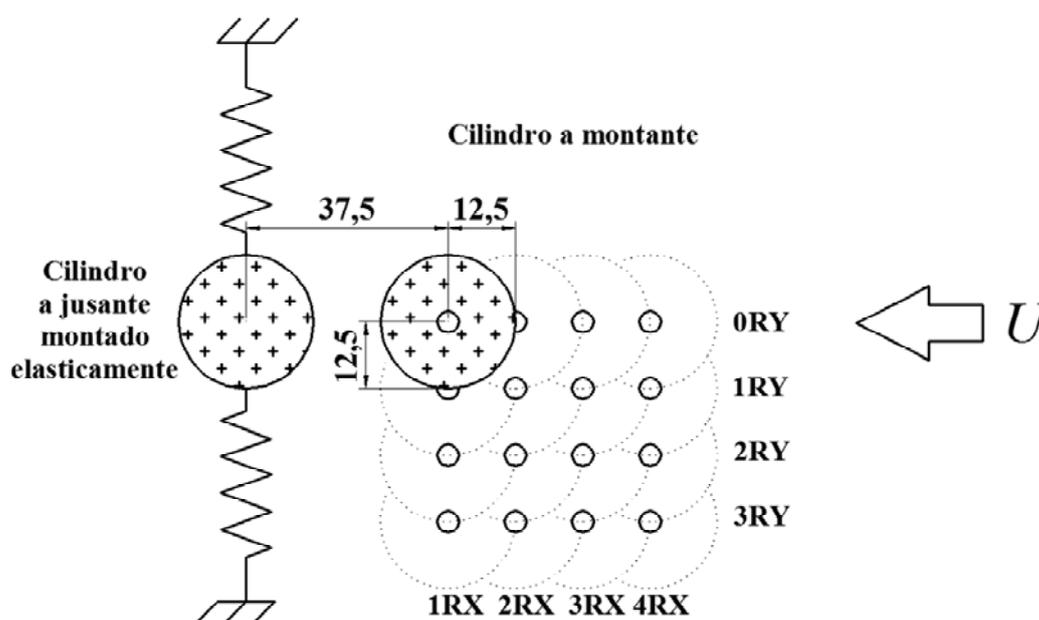


Figura 4.2 - Diversas posições para o cilindro fixo no túnel de vento.

Antes da condução dos ensaios foram tomadas as velocidades do escoamento para várias frequências no inversor (f_{inv}) de controle de rotação do motor. Estas medições foram realizadas em nove locais diferentes da seção transversal intermediária da área de testes, sendo três na parte superior, três no centro e três na parte inferior, conforme mostra a Figura 4.3.

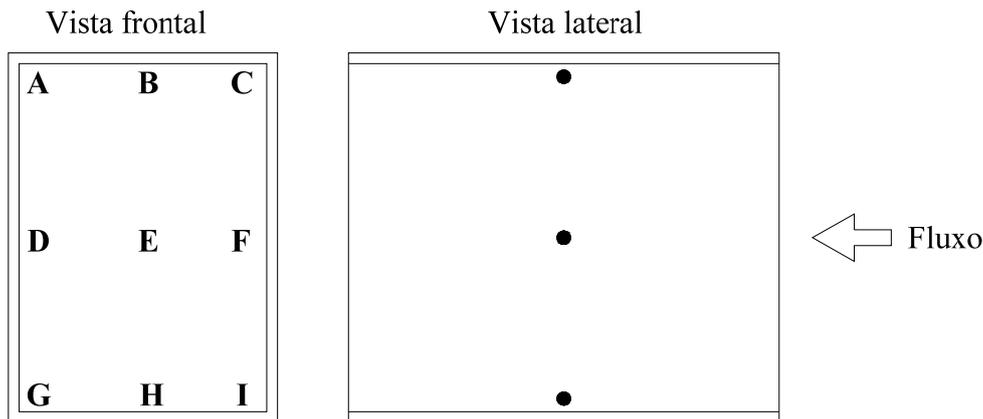


Figura 4.3 - Vistas frontal e lateral da seção de testes do túnel de vento com os pontos onde foram feitas as medições nas velocidades do escoamento.

A partir destas medições foi possível construir uma curva que representa, para cada frequência do inversor (f_{inv}), o comportamento do escoamento em cada uma destas posições no interior do túnel de vento. A Figura 4.4 apresenta as curvas geradas pelas velocidades de escoamento nos pontos indicados na Figura 4.3 para diversas frequências do inversor.

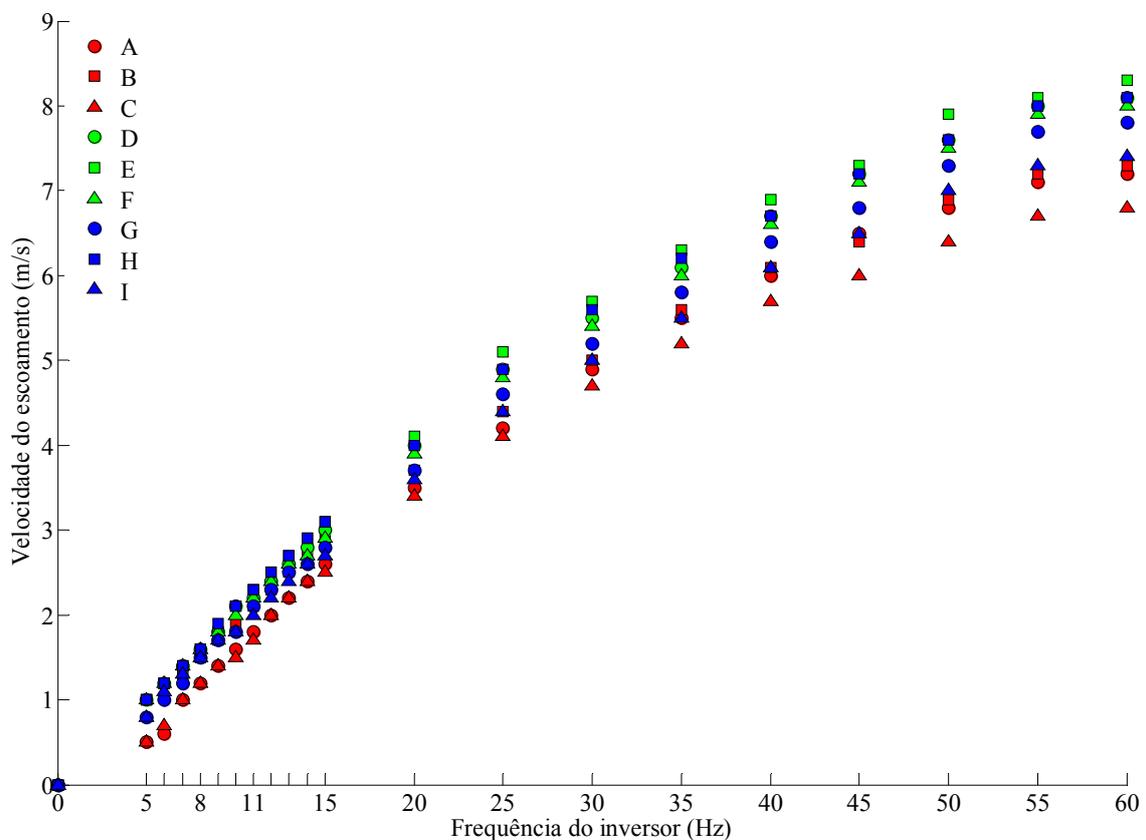


Figura 4.4 - Perfil de velocidades no interior do túnel de vento

Utilizou-se nos testes, cilindros de alumínio e molas do tipo tração-compressão. Para a fixação dos cilindros às molas, foram confeccionados dois suportes de náilon também em formato cilíndrico.

O cilindro analisado foi montado nos suportes de náilon e elasticamente suspenso por quatro molas, onde uma das extremidades é fixa ao suporte e a outra fixa nas laterais da área de testes do túnel de vento. As características dimensionais destes elementos podem ser vistos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos componentes utilizados na montagem.

Componente	Comprimento (mm)	Diâmetro externo (mm)	Massa (kg)
Cilindro fixo	180	25	0,085
Cilindro móvel	165	25	0,037
Molas	140	8	0,004
Suportes do cilindro móvel	8	30	0,015

O aspecto da montagem destes elementos e as alterações feitas no túnel de vento, com as dimensões (mm) da área de teste são mostrados na Figura 4.5.

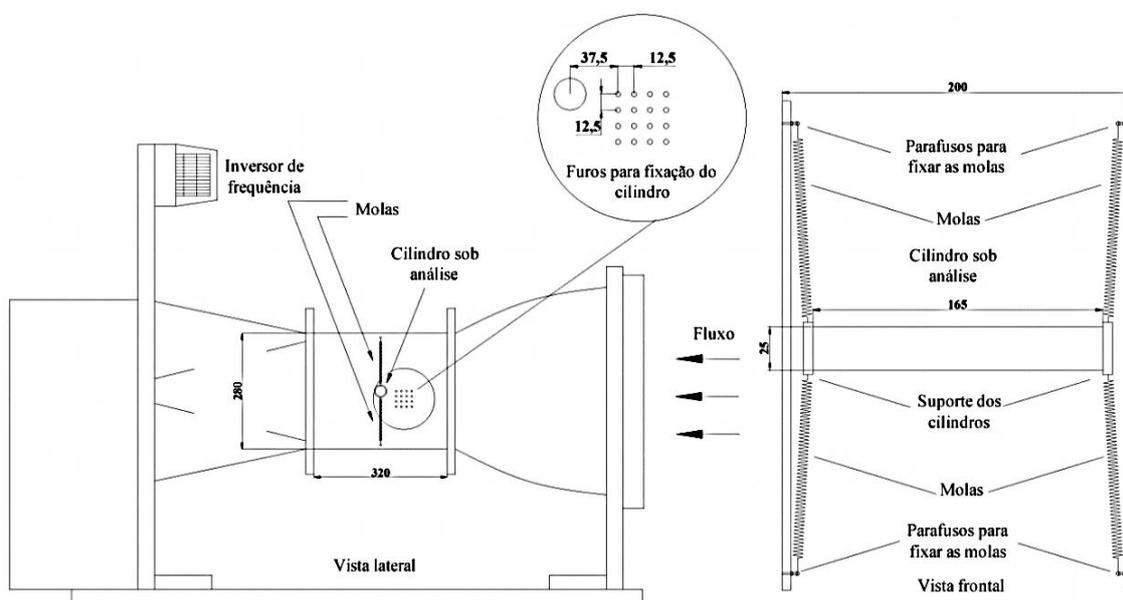


Figura 4.5 - Modificações feitas no túnel de vento para a realização dos experimentos.

Durante o restante do trabalho serão utilizadas as nomenclaturas “cilindro à jusante”, “cilindro analisado” ou “cilindro sob análise” para o cilindro montado elasticamente no túnel e a nomenclaturas “cilindro a montante” ou “cilindro fixo” para o cilindro cujas posições pode ser alterada em X e em Y.

Quando se tratar da configuração com o cilindro sob análise instalado isoladamente no interior do túnel de vento poderá também ser utilizada a nomenclatura “único”.

4.3 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Com as modificações feitas, o túnel de vento foi devidamente instrumentado para a verificação do comportamento dinâmico da estrutura montada com cilindros.

As velocidades do escoamento foram obtidas através de um anemômetro de fio quente modelo TAFR 180 da Instrutherm (Figura 4.6 a). Para mensurar os deslocamentos do cilindro livre para oscilar foi utilizado um sensor de posição a laser modelo optoNCDT 1300 da Micro-Epsilon (Figura 4.6 b). A aquisição e conseqüente registro dos dados foram realizados, utilizando-se um dispositivo de aquisição multifuncional modelo NI 6008 USB (Figura 4.6 c) da National Instruments (NI).



Figura 4.6 - Instrumentos e dispositivos utilizados nas análises.

Fonte: Instrutherm (a), Micro-epsilon (b) e National Instruments (c), (2014).

Para a verificação do comportamento do cilindro em tempo real e o conseqüente registro dos dados aquisitados, foi desenvolvida uma rotina específica em ambiente Labview também da NI.

A Figura 4.7 apresenta o painel frontal da rotina desenvolvida para este trabalho.

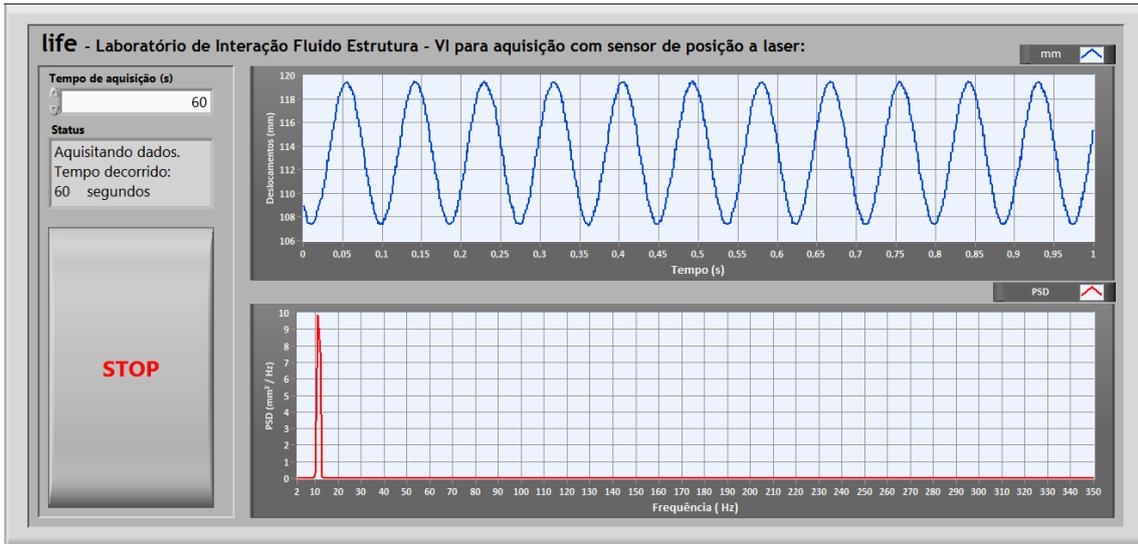


Figura 4.7 - Interface do programa de aquisição de dados do sensor óptico de posição desenvolvida para este trabalho.

No gráfico apresentado na parte superior da interface é possível observar como ocorrem os deslocamentos e na parte inferior tem-se o espectro de frequências, ambos são exibidos ao mesmo tempo em que os dados estão sendo aquisitados.

A Figura 4.8 apresenta o sub VI, desenvolvido para este trabalho.

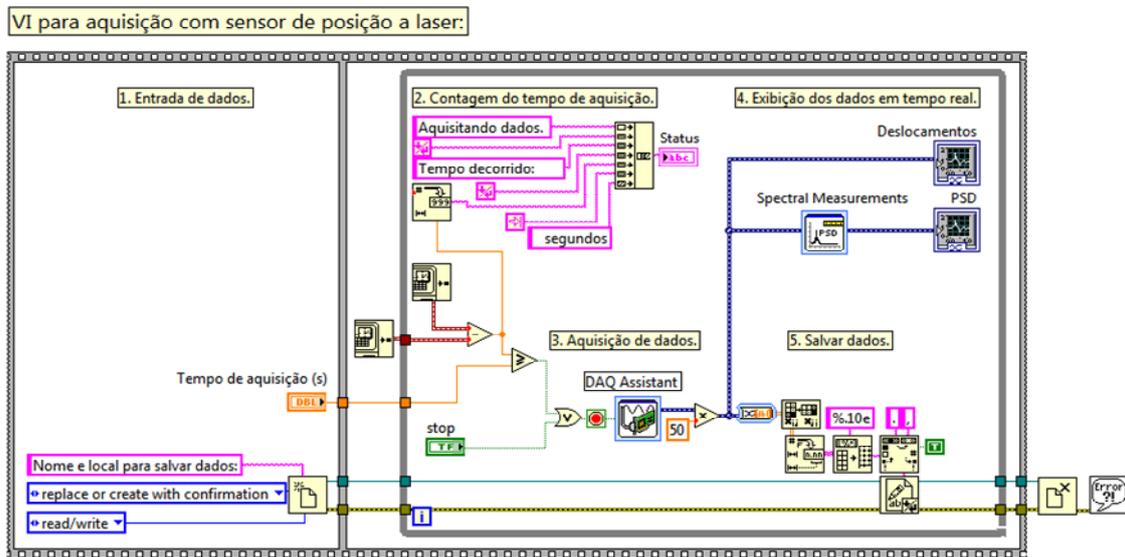


Figura 4.8 - Rotina em ambiente Labview desenvolvida para este trabalho.

A Figura 4.9 mostra o arranjo final dos equipamentos utilizados no túnel de vento para a condução dos experimentos.



Figura 4.9 - Foto do túnel de vento com os equipamentos utilizados nos experimentos.

Depois de feito o arranjo com os cilindros e instalados os instrumentos de medição, o motor do túnel de vento foi acionado. Para cada posição no cilindro fixo encontrou-se a velocidade do ar (U), para a qual o cilindro livre oscilava com maior amplitude. Encontrada esta velocidade, foi-se aumentando ou diminuindo aos poucos o fluxo de ar, a razão $f_{inv}=0,3$ Hz no inversor de frequência, até que as amplitudes no cilindro livre fossem desprezíveis ou inferiores a 1 milímetro.

A taxa de aquisição utilizada nos ensaios foi de 1.000 amostras por segundo e cada registro teve duração de 60 segundos.

Realizaram-se, ainda, ensaios sem a presença do cilindro fixo, ou seja, somente com o cilindro montado elasticamente no interior do túnel, onde também se obteve a curva para um único cilindro.

A frequência natural do sistema foi determinada experimentalmente através do teste de decaimento. Assim, com o motor do túnel de vento desligado, o cilindro ensaiado sofreu oscilação forçada manualmente. Através dos dados obtidos e a análise da densidade espectral de potência do sinal obteve-se a frequência natural para o arranjo feito com o cilindro livre e o conjunto de molas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta, compara e discute os principais resultados experimentais obtidos com a realização deste trabalho. Também são apresentadas algumas conclusões preliminares as quais serão complementadas no capítulo final.

5.2 PARÂMETROS AVALIADOS

Após a aquisição e registro, os dados obtidos passaram por uma análise inicial. Nesta primeira análise verificou-se a qualidade e a integridade dos registros e possibilitou que, em caso de necessidade, um ou outro teste fosse feito.

Utilizando rotinas específicas desenvolvidas em ambiente matlab, foi feita a análise temporal e no domínio da frequência do sinal bruto, sem filtragem. Através desta análise inicial, foram obtidas as frequências onde ocorreram as amplitudes mais significativas.

De posse desta frequência, todos os dados passaram por uma filtragem, através da aplicação de um filtro passa baixa, a fim de eliminar sinais de alta frequência, como ruídos provocados por interferências mecânicas ou elétricas.

A partir da análise dos dados obtidos, foi possível avaliar diversos parâmetros de interesse, como amplitude de oscilação (A ou A/D), frequência de oscilação (f_{osc}), faixa de Re onde ocorrem estas oscilações, verticalidade do ramo inicial e verticalidade do ramo final. Estes parâmetros são explicados a seguir.

a) **Amplitude de oscilação – A ou A/D**

A amplitude de oscilação pode ser definida como a metade da distância vertical, em milímetros, entre um pico de deslocamento positivo o pico de deslocamento negativo que ocorre em seguida.

Obteve-se o pico de deslocamento positivo com a média de todos os picos positivos enquanto o pico de deslocamento negativo foi obtido pela média de todos os picos negativos no registro. A Figura 5.1 mostra como foi definida a amplitude de oscilação (A) com as médias dos picos positivos e negativos.

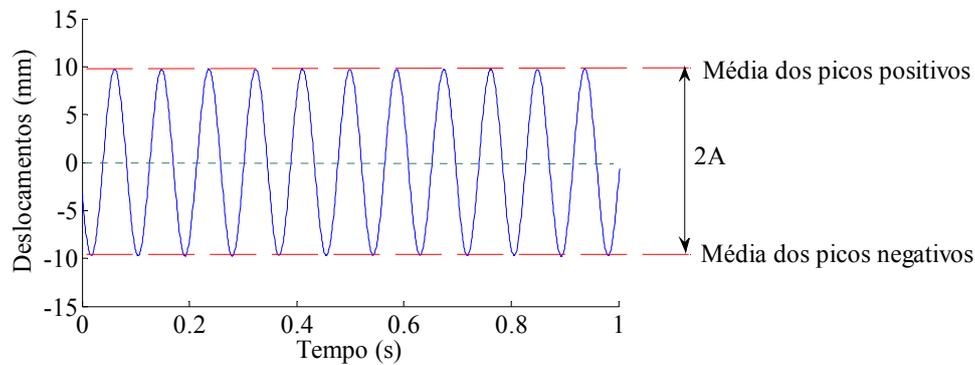


Figura 5.1 – Definição da amplitude de oscilação

Esta amplitude também foi tomada na forma adimensional onde se dividiu a amplitude de oscilação do cilindro pelo seu diâmetro (A/D).

b) Densidade Espectral de Potência (PSD)

A densidade espectral de potência permite avaliar a energia do sinal para cada banda de frequência. Para calcular a densidade espectral de potência foi utilizado o método de Welch, onde se empregou parâmetros de 8 janelas, overlap 50% e número mínimo de pontos para fft igual a 256.

c) Verticalidade dos ramos de excitação inicial e final

Através da curva construída pela evolução da PSD em função do número de Reynolds (Re), foi possível avaliar como ocorre o aumento ou a diminuição na amplitude de oscilação do cilindro em função dos incrementos dados à velocidade do escoamento. Esta curva pode ser dividida em ramo de excitação inicial e ramo final. A verticalidade destes ramos indica a quantidade de incrementos dados à velocidade do escoamento (U) para que o cilindro chegue à máxima amplitude de oscilação ou então em quanto tempo este cessa a oscilação de maneira significativa.

O ramo de excitação inicial equivale a evolução na PSD devido ao aumento de Re até o ponto de máxima amplitude enquanto o ramo final mostra a diminuição deste ponto até os valores considerados insignificantes.

A Figura 5.2 mostra como são identificados estes ramos em cada curva de evolução da PSD em função do número de Reynolds.

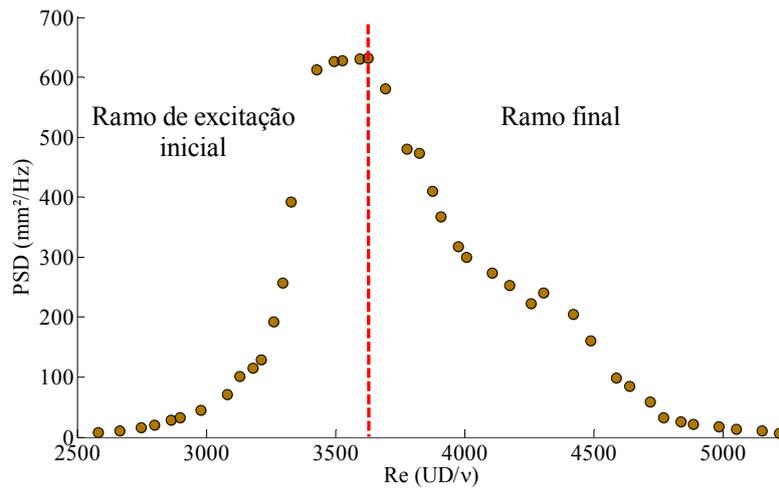


Figura 5.2 - Identificação dos ramos de excitação inicial e final em uma curva de evolução da amplitude de oscilação em função de Re .

Observa-se na Figura 5.2 que a curva formada pelo ramo de excitação inicial é menos inclinada que o ramo final. Esta maior verticalidade indica a menor quantidade de incrementos na velocidade de escoamento para o cilindro atingir a máxima amplitude do que para regredir deste ponto máximo até zero.

d) Número de Reynolds (Re) onde ocorre a máxima oscilação

O número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade do escoamento. Sendo assim, um comparativo entre os valores de Re onde ocorrem as máximas amplitudes torna-se importante para se avaliar a evolução na velocidade do escoamento para que seja atingida a máxima amplitude em cada um dos diversos arranjos feitos com os cilindros.

e) Faixa de oscilação do cilindro

A faixa oscilação do cilindro determina o Re onde o cilindro começa e onde cessa a oscilação de maneira significativa. Este parâmetro é importante a medida que quanto maior for esta faixa de Re , maior é o intervalo de velocidades no escoamento onde se tem oscilações no cilindro.

A partir dos comparativos entre todos estes parâmetros, sempre tendo como referência o comportamento do cilindro instalado isoladamente no interior do túnel de vento, pode-se identificar em quais configurações feitas com o cilindro fixo se obteve maior ganho no cilindro analisado.

A Figura 5.3 mostra como é identificada a faixa de Re onde ocorrem oscilações no cilindro.

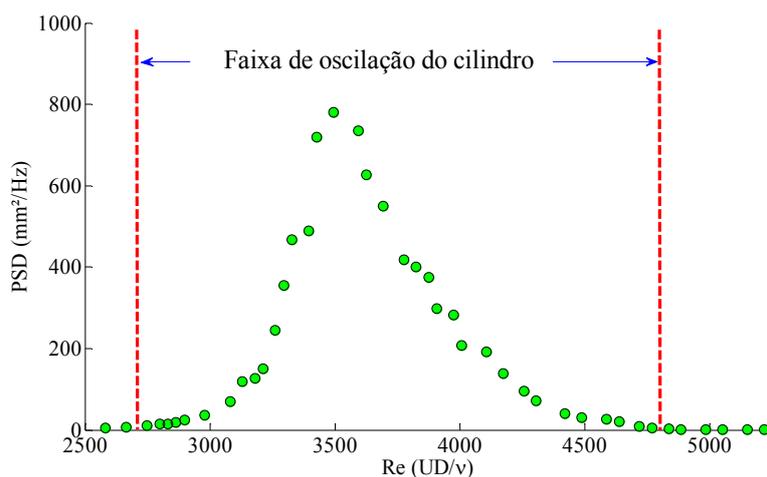


Figura 5.3 - Faixa de Re onde o cilindro apresenta oscilações

Conforme já mencionado, o cilindro de montante pode ser colocado em dezesseis posições distintas. Para cada uma destas posições, tem-se um espaçamento entre os centros dos cilindros e diferentes ângulos formados entre os cilindros e o escoamento incidente no cilindro analisado. Durante a discussão dos resultados estes espaçamentos (S ou S/D) e os ângulos formados entre os cilindros e o escoamento (α) são identificados conforme as posições para o cilindro fixo, mostradas Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Espaçamentos (S ou S/D) e ângulos (α) para as diversas posições do cilindro fixo.

Posição do Cilindro fixo	Ângulos α	Espaçamentos	
		S	S/D
1RX0RY	0°	37,50 mm	1,50
2RX0RY	0°	50,00 mm	2,00
3RX0RY	0°	62,50 mm	2,50
4RX0RY	0°	75,00 mm	3,00
1RX1RY	18,43°	39,53 mm	1,58
2RX1RY	14,04°	51,54 mm	2,06
3RX1RY	11,31°	63,74 mm	2,55
4RX1RY	9,46°	76,03 mm	3,04
1RX2RY	33,69°	45,07 mm	1,80
2RX2RY	26,57°	55,90 mm	2,24
3RX2RY	21,80°	67,31 mm	2,69
4RX2RY	18,43°	79,06 mm	3,16
1RX3RY	45,00°	53,03 mm	2,12
2RX3RY	36,87°	62,50 mm	2,50
3RX3RY	30,96°	72,89 mm	2,92
4RX3RY	26,57°	83,85 mm	3,35

Na Tabela 5.1 S/D é obtido dividindo-se o espaçamento (S) pelo diâmetro do cilindro (D). A Figura 5.4 mostra como são identificados, os espaçamentos e os ângulos formados entre os cilindros e o escoamento (α).

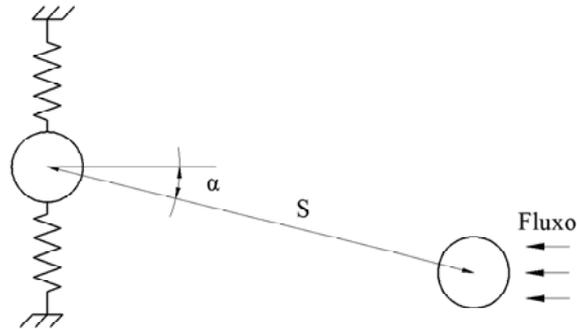


Figura 5.4 – Identificação do espaçamento (S) e do ângulo (α).

5.3 FREQUÊNCIA NATURAL DA ESTRUTURA

Conforme já mencionado anteriormente, a frequência natural da estrutura foi determinada experimentalmente. Assim, aplicou-se o teste de decaimento ao cilindro montado elasticamente, forçando sua vibração. A partir da análise espectral do sinal adquirido, obteve-se a frequência natural para a montagem realizada.

Na Figura 5.5 tem-se uma amostra do sinal adquirido bem como o espectro de frequência com a aplicação do teste.

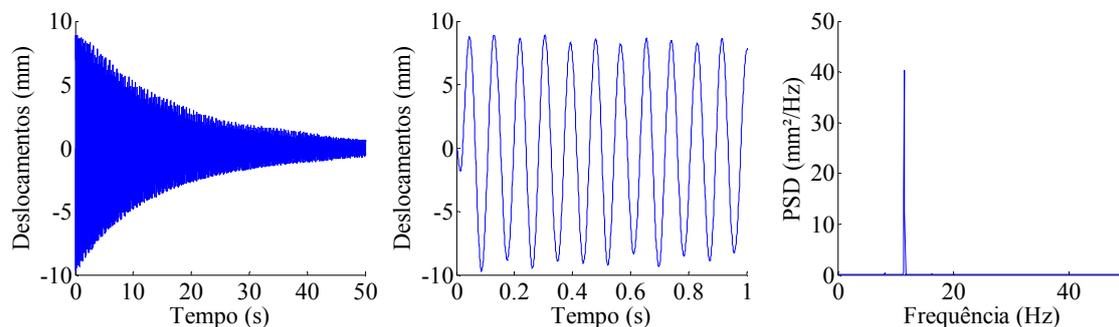


Figura 5.5 - Sinal filtrado (esquerda), amostra de 1 segundo do mesmo sinal (centro) e densidade espectral de potência (direita) do impulso aplicado ao cilindro sob análise no túnel de vento do LIFE com frequência de amostragem de 1000 Hz.

Com base nos gráficos conclui-se que a frequência natural da estrutura da montagem feita no túnel de vento está centrada em $f_n=11,47$ Hz.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 5.6 tem-se o gráfico da análise temporal e da densidade espectral de potência do cilindro livre para oscilar instalado no túnel de vento, sem a presença do cilindro fixo. Este resultado foi obtido à velocidade de $U=1,73$ m/s, sendo esta a velocidade do escoamento onde foram observadas as maiores amplitudes, em média $A=9,77$ mm ($A/D=0,39$). A frequência em que ocorreram estas oscilações foi de $f_{osc}=11,41$ Hz.

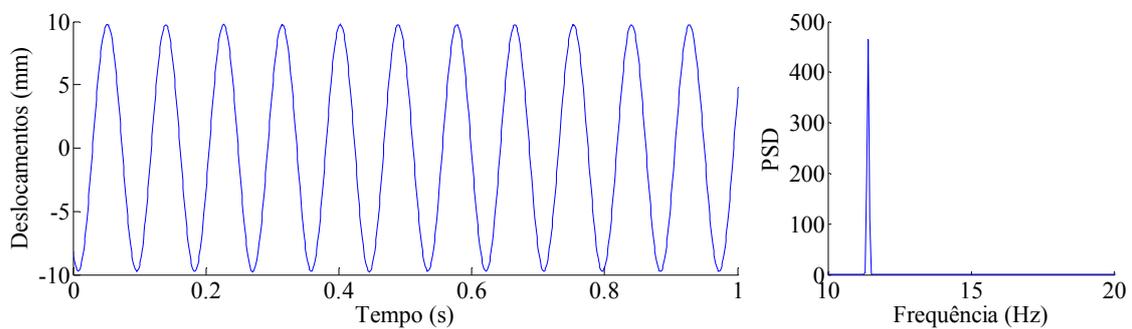


Figura 5.6 - Amostragem de 1 s (esquerda) e densidade espectral de potência-PSD (direita) para o sinal adquirido com o cilindro analisado instalado isoladamente no interior do túnel de vento.

Na Figura 5.7 tem-se a curva com o comportamento da PSD em função de Re desta configuração. A ascensão do ramo inicial se dá a partir de $Re \approx 2.200$, porém é somente com $Re \geq 2.600$ que se têm amplitudes bem mais significativas, mesmo com pequenos incrementos na velocidade de fluxo. Em $Re=2.864$ se tem o máximo PSD e a partir daí a curva começa a regredir.

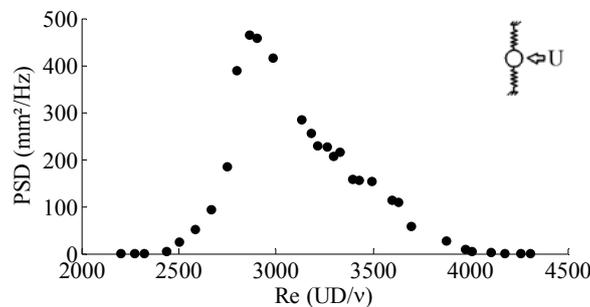


Figura 5.7 - Evolução do PSD em função de Re sem a presença do cilindro à montante.

A faixa de Re onde o cilindro apresenta oscilações com amplitudes significativas estão entre $2.318 < Re < 4.106$.

Observando os ramos de excitação inicial e final nota-se uma maior verticalidade para o ramo inicial do que para o ramo final, indicando que o cilindro rapidamente chega ao pico máximo após entrar em oscilação, necessitando de menores incrementos na velocidade do fluxo para atingir os máximos deslocamentos do que para cessar a oscilação.

O cilindro começa a oscilar e atinge seu máximo deslocamento, para cada velocidade de escoamento, independente de sua condição inicial.

5.4.1 Cilindro fixo nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY

A Figura 5.8 compara as amplitudes e a densidade espectral de potência para a configuração com cilindros diretamente alinhados. Os gráficos se referem a velocidade de escoamento onde ocorreram os maiores deslocamentos. Em todas as posições analisadas se obteve ganho, porém é com o cilindro a montante em 1RX0RY, que se têm deslocamentos bem mais expressivos.

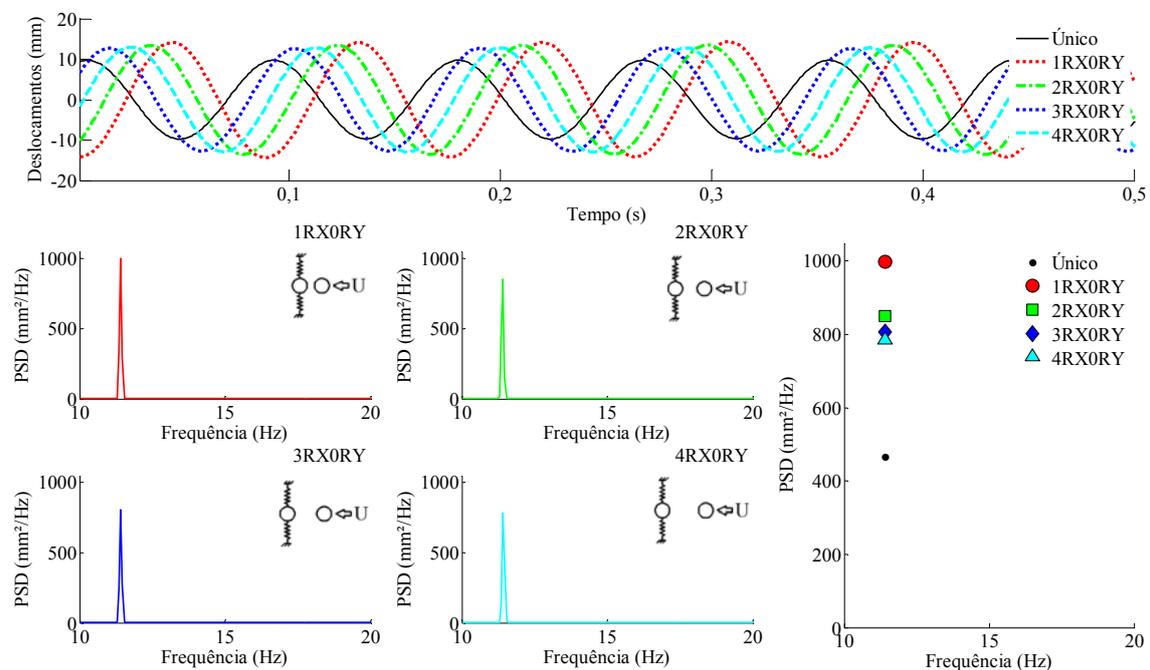


Figura 5.8 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.

As oscilações ocorreram a $f_{osc}=11,41$ Hz e as máximas amplitudes ficaram em $A=14,19$ mm ($A/D=0,57$ e $Re=3.625$) com cilindro fixo em 1RX0RY, $A=13,50$ mm ($A/D=0,54$ e $Re=3.079$) com cilindro fixo em 2RX0RY, $A=12,75$ mm ($A/D=0,51$ e $Re=3.013$) com cilindro fixo em 3RX0RY e $A=12,95$ mm ($A/D=0,52$ e $Re=3.013$) com cilindro fixo em 4RX0RY.

Na Figura 5.9 tem-se a curva com os pontos máximos de PSD em relação ao número de Reynolds com os cilindros diretamente alinhados e com espaçamentos de $S/D=1,5$, $S/D=2$, $S/D=2,5$ e $S/D=3$.

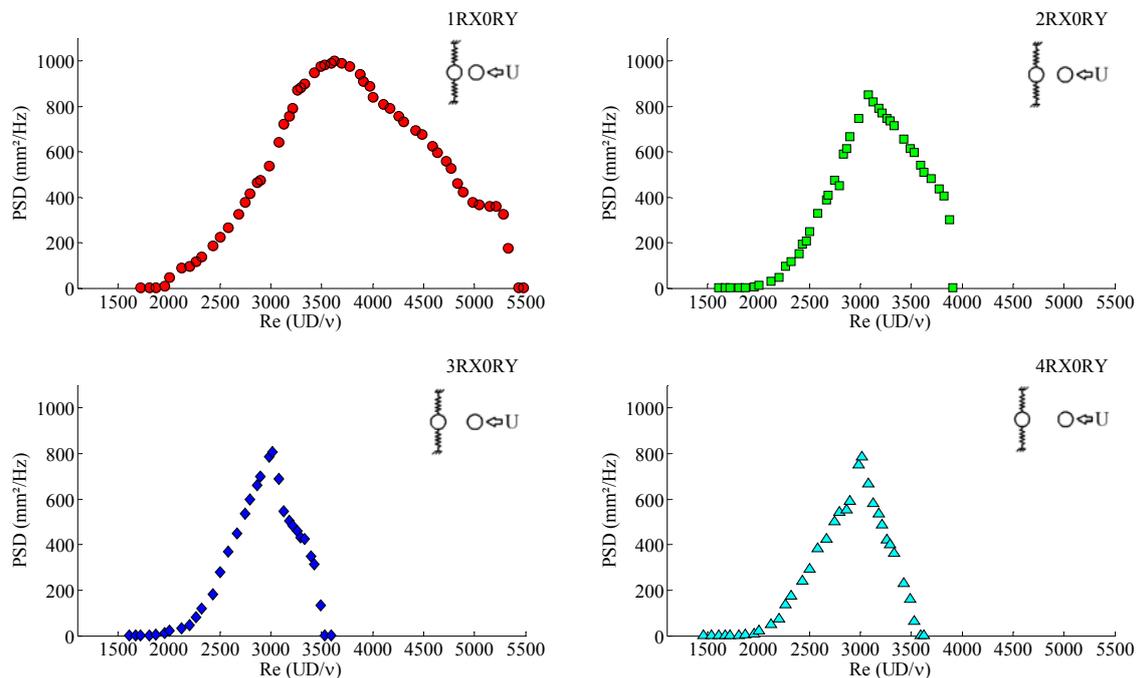


Figura 5.9 - Evolução da PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY.

Na configuração 1RX0RY, observa-se boa concordância entre os ramos de resposta, indicando que o número de incrementos ao fluxo no ramo de excitação inicial é bastante próximo aos incrementos que formaram o ramo final. Para as demais configurações o ramo inicial mostra mais incrementos ao fluxo que o ramo final, como pode ser observado pela maior verticalidade apresentada pela curva final.

A Figura 5.10 apresenta um comparativo entre todas as curvas de comportamento do PSD em função de Re para as configurações com o cilindro fixo diretamente alinhado ao cilindro analisado e com somente o cilindro analisado instalado isoladamente no interior do túnel de vento.

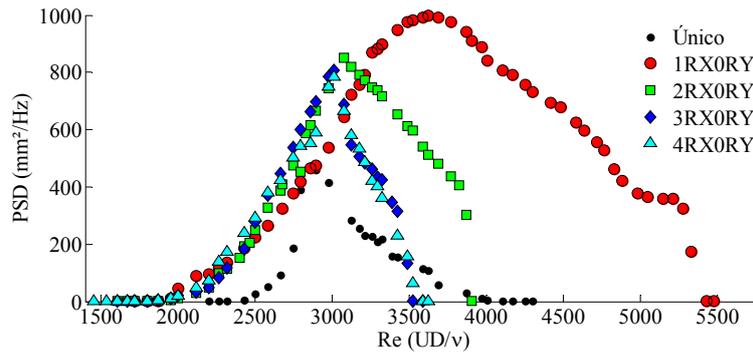


Figura 5.10 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY.

A faixa de Re onde se observa valores significativos para o PSD se mostra bem mais abrangente para o cilindro a montante, localizado na posição mais próxima do cilindro analisado, do que para as demais posições. Verifica-se que com o cilindro fixo, posicionado em 3RX0RY e 4RX0RY as curvas geradas apresentam comportamentos semelhantes, abrangendo a mesma faixa de Re e, aproximadamente, a mesma amplitude de PSD. Estas duas posições apresentaram as menores faixas de oscilação desta análise, menores inclusive que os valores atingidos nos ensaios feitos com o cilindro analisado, instalado isoladamente no interior do túnel.

Em 1RX0RY o cilindro apresentou oscilações significativas entre $1.954 < Re < 5.215$. Já nas demais posições, oscilações significativas são verificadas entre $1.954 < Re < 3.825$ (2RX0RY), $1.954 < Re < 3.427$, (3RX0RY) e $1.954 < Re < 3.427$ (4RX0RY).

Os resultados mostram que o intervalo de oscilação se apresenta mais estreito a medida que os cilindros se encontram mais afastados entre si, com exceção das duas últimas posições, onde os comportamentos apresentados são bastante semelhantes.

As análises feitas com os cilindros nestas quatro posições apresentaram, ainda, dois comportamentos bastante peculiares. O primeiro ocorreu no ramo de excitação inicial a partir de certos valores de Re . Se o cilindro fosse parado, permanecia neste estado, a menos que recebesse um impulso inicial, ou seja, o cilindro somente alcançava a máxima amplitude de oscilação se o incremento na velocidade do escoamento fosse dado com o cilindro já oscilando. Este comportamento se verificou no ramo de excitação inicial onde, para velocidades de escoamento superiores a $U=1,8$ m/s ($Re \geq 2.980$), $U=1,62$ m/s ($Re \geq 2.682$), $U=1,66$ m/s ($Re \geq 2.748$) ou $U=1,73$ m/s ($Re \geq 2.864$), o cilindro analisado foi forçado a parar e só voltou a oscilar com a

aplicação de um impulso inicial. Este comportamento se verificou nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY, respectivamente.

O outro comportamento verificado ocorreu no ramo final. Notou-se que mesmo com energia de oscilação de valor considerável, o cilindro sofre uma desaceleração brusca a partir de determinados valores de Re até cessar a oscilação. Embora este declínio, praticamente vertical, ocorra com valores de Re diferentes para cada posição do cilindro fixo, ele ocorre para valores muito próximos na PSD.

Na Figura 5.11 tem-se as curvas com a evolução do PSD em função de Re dividida em três faixas, para os quatro casos analisados.

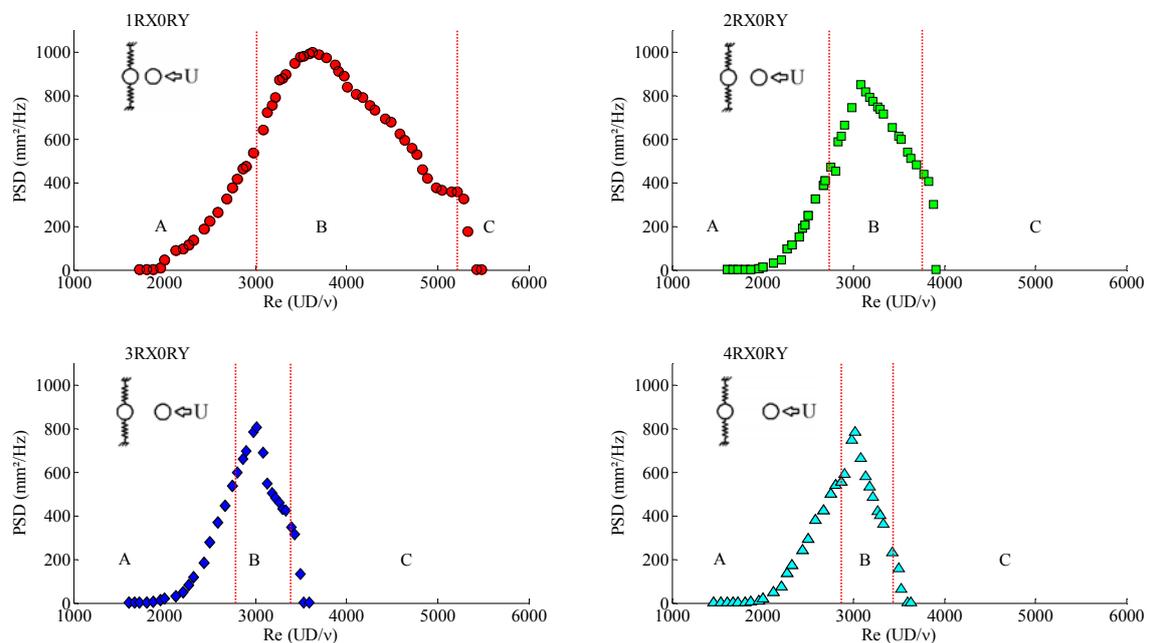


Figura 5.11 - Regiões de Re em que o cilindro apresenta comportamentos distintos.

A faixa de Re inicial, representado pela letra “A” na Figura 5.11, mostra os valores de Re em que o cilindro inicia ou continua sua oscilação, independente se na sua condição inicial estiver em repouso ou oscilando. Já em “B” tem-se a faixa de Re em que o cilindro não oscila se na sua condição inicial estiver em repouso, a menos que a ele seja aplicado um impulso inicial.

A parcela de Re , representada pela letra “C” mostra, a partir de que ponto a oscilação do cilindro diminui significativamente.

5.4.2 Cilindro fixo nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY

A Figura 5.12 apresenta uma parcela da análise temporal e a densidade espectral de potência do registro dos deslocamentos obtidos com o cilindro fixo posicionado em 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY.

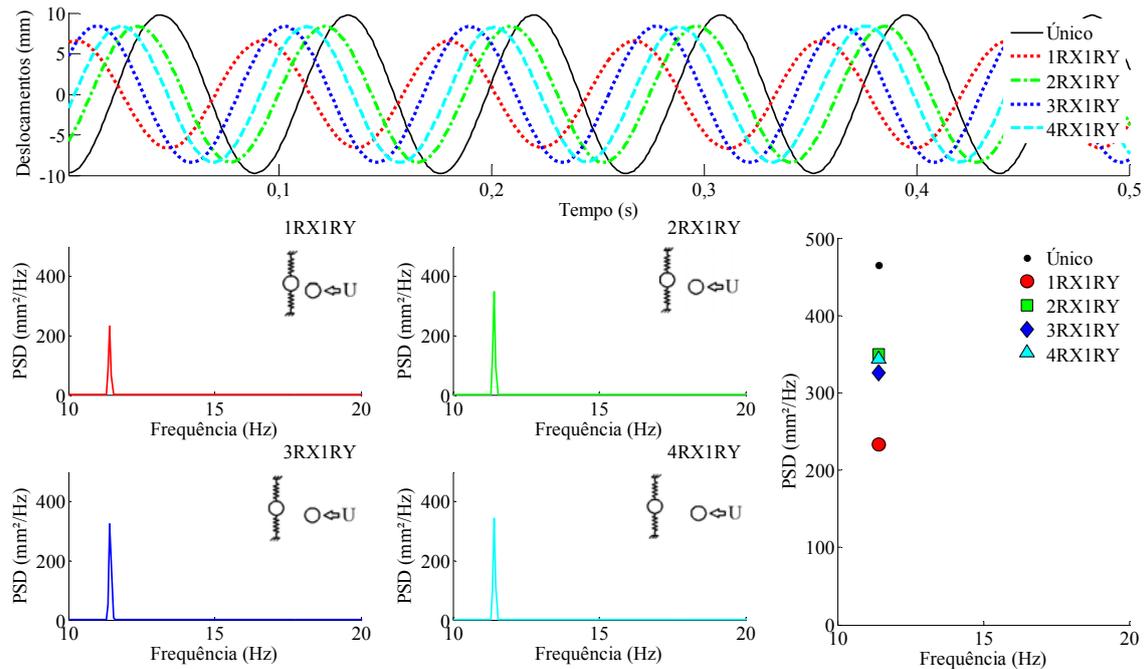


Figura 5.12 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.

Como se verifica na Figura 5.12, com o cilindro a montante nestas posições obteve-se uma redução significativa na amplitude dos deslocamentos e, conseqüentemente, nos níveis da densidade espectral de potência nas análises feitas. As máximas amplitudes foram muito inferiores àquelas obtidas com apenas o cilindro livre para oscilar instalado no túnel de vento.

A análise dos dados mostrou que praticamente não houve diferença entre as amplitudes máximas alcançadas, a exceção dos resultados obtidos com o cilindro a montante, posicionado em 1RX1RY, onde os resultados foram ainda menores.

Assim, obteve-se o deslocamento máximo em torno de $A=8,42$ mm ($A/D=0,34$) em $Re=3.178$ com o cilindro a montante na posição 2RX1RY, $A=8,41$ mm ($A/D=0,34$)

em $Re=3.178$ com o cilindro a montante na posição 3RX1RY, $A=8,31$ mm ($A/D=0,33$) em $Re=3.211$ com o cilindro a montante na posição 4RX1RY e $A=6,83$ mm ($A/D=0,27$) em $Re=3.261$ para o cilindro a montante em 1RX1RY. Em todos os ensaios o cilindro oscilou a $f_{osc}=11,41$ Hz.

Na Figura 5.13 têm-se as curvas geradas com as análises feitas a partir dos registros obtidos para estas configurações.

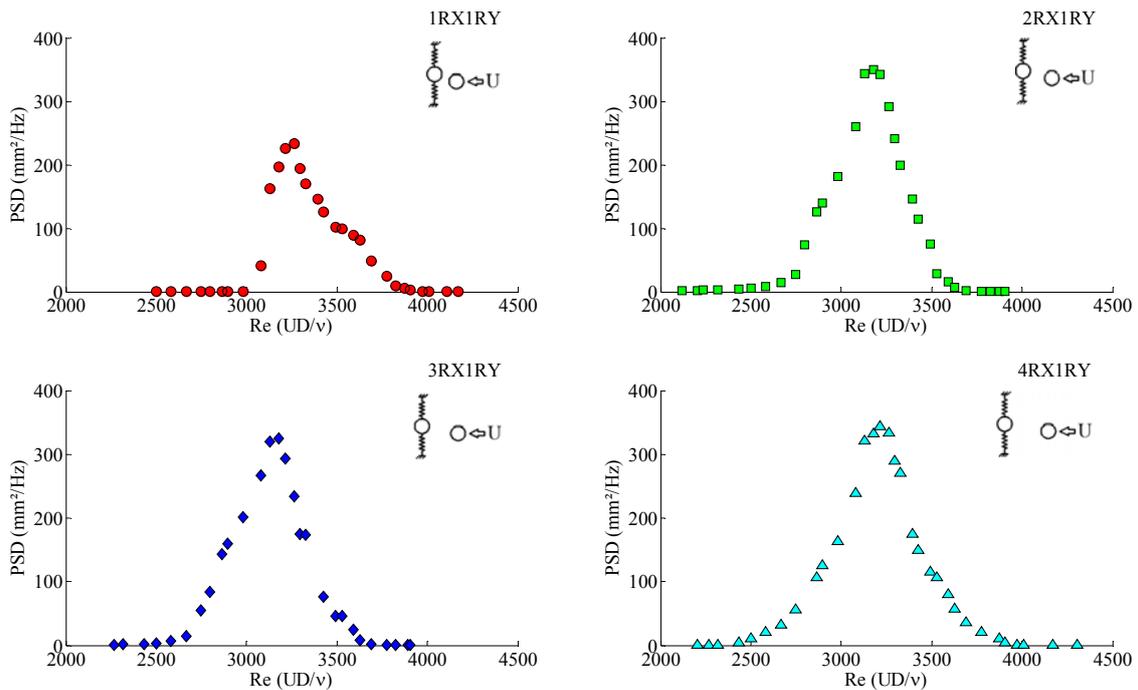


Figura 5.13 - Evolução do PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY.

Na curva formada pelos ramos de excitação inicial e final, observa-se que apenas na posição 1RX1RY, o ramo inicial se apresenta mais verticalizado que o ramo final, indicando uma ascensão a amplitude máxima mais rápida do que para regredir deste máximo ponto a zero. Esta também foi a posição de menor resultado obtido para amplitude dentre todas as análises.

Nas posições 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY, as curvas apresentam boa concordância entre os ramos de resposta evidenciando as mesmas quantidades de incrementos na velocidade do escoamento.

A faixa de Re onde o cilindro apresenta oscilações significativas está entre $2.980 < Re < 3.907$ para a posição 1RX1RY, $2.434 < Re < 3.692$ para as posições 2RX1RY e 3RX1RY e $2.434 < Re < 3.974$ para a posição 4RX1RY.

Para qualquer valor de Re dentro das faixas citadas se tem oscilação no cilindro mesmo que este seja parado repentinamente.

Um comparativo entre as curvas formadas com os dados do cilindro analisado isoladamente no túnel e com a presença do cilindro a jusante nas posições 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY pode ser visto na Figura 5.14.

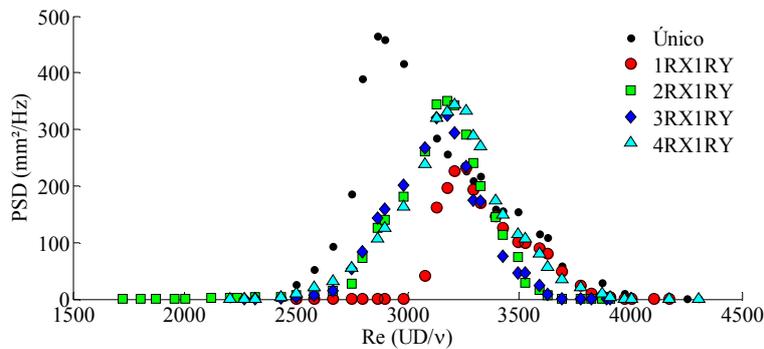


Figura 5.14 - Comparações na evolução da PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX1RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY.

Como pode ser verificado na Figura 5.14, a curva gerada para o cilindro instalado isoladamente no túnel de vento apresenta uma faixa de oscilação um pouco maior do que as faixas para os registros com a presença do cilindro fixo. Na mesma figura também é possível ver a reduzida faixa de oscilação apresentada para o registro com o cilindro fixo posicionado mais próximo ao cilindro analisado.

5.4.3 Cilindro fixo nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY

A Figura 5.15 apresenta as oscilações máximas obtidas, com o cilindro a montante, posicionado em 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY E 4RX2RY. Observa-se que somente na posição 1RX2RY, as amplitudes das oscilações atingem valores maiores que as obtidas com somente o cilindro analisado instalado no túnel de vento. Nesta posição a amplitude máxima atingiu $A=12,14$ mm ($A/D=0,49$) em $Re=3.824$, enquanto que nas demais os valores alcançados foram de $A=9,67$ mm ($A/D=0,39$) em $Re=3.526$ com cilindro fixo em 2RX2RY, $A=8,73$ mm ($A/D=0,35$) em $Re=3.294$, com cilindro fixo em 3RX2RY e $A=8,11$ mm ($A/D=0,32$) em $Re=3.178$, com cilindro fixo posicionado em 4RX2RY.

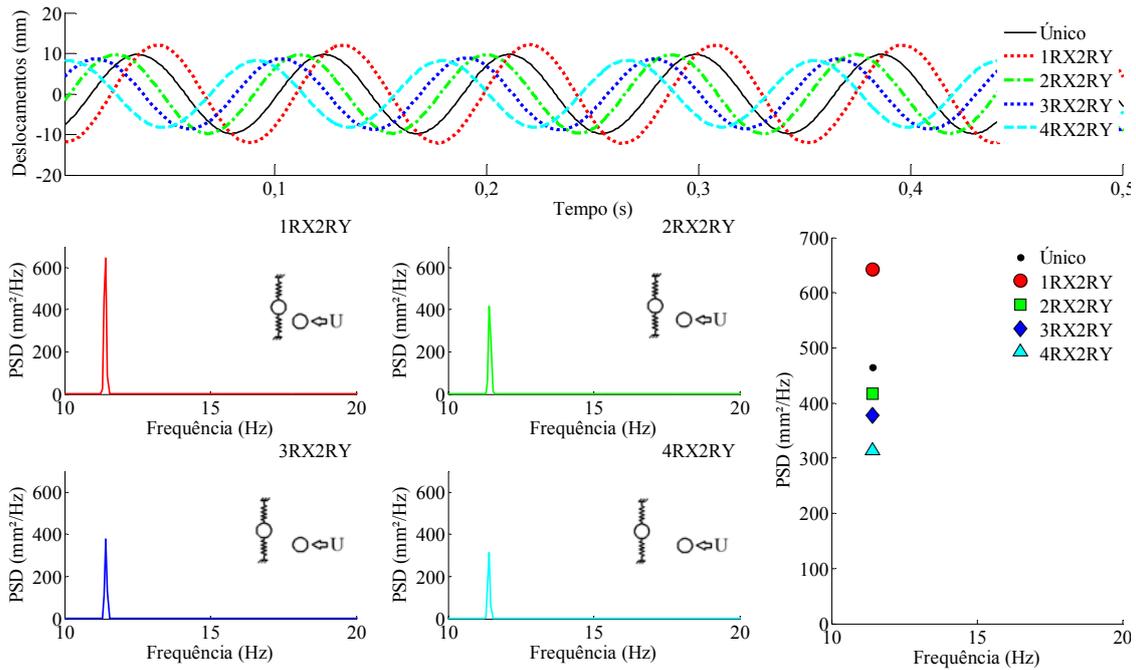


Figura 5.15 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado isoladamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.

O cilindro analisado apresentou oscilações de menor amplitude a medida que se encontra mais afastado do cilindro fixo e com relação à frequência de oscilação, verificou-se que a mesma se manteve em $f_{osc}=11,41$ Hz para qualquer uma destas configurações ensaiadas.

Os cilindros atingem máxima amplitude de oscilação rapidamente, exigindo poucos incrementos na velocidade do escoamento para alcançarem o pico. Em contrapartida exigem maiores incrementos para que o cilindro pare de oscilar. Isto pode ser observado pela posição mais vertical do ramo de excitação inicial em relação ao ramo final (Figura 5.16).

As faixas de Re onde as amplitudes de oscilação apresentadas pelo cilindro analisado atingem valores significativos estão entre $2.748 < Re < 5.844$ para o cilindro a montante na posição 1RX2RY, $2.748 < Re < 4.834$ na posição 2RX2RY, $2.748 < Re < 4.305$ na posição 3RX2RY e $2.748 < Re < 4.007$ com o cilindro em 4RX2RY. Dentro das faixas citadas, o cilindro começa a oscilar e desenvolve a máxima amplitude, independente do seu estado inicial.

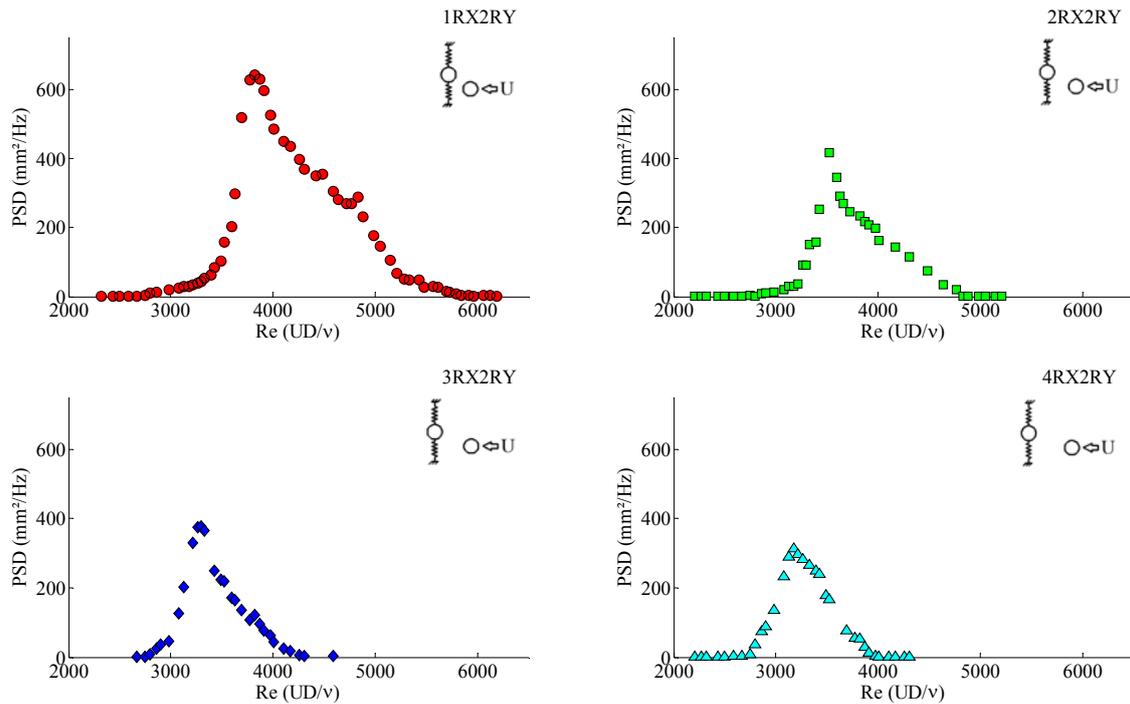


Figura 5.16 - Evolução do PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY.

Um comparativo entre estas curvas mostra que quanto mais próximo o cilindro a montante está posicionado do cilindro analisado, maior é a faixa de oscilação apresentada (Figura 5.17).

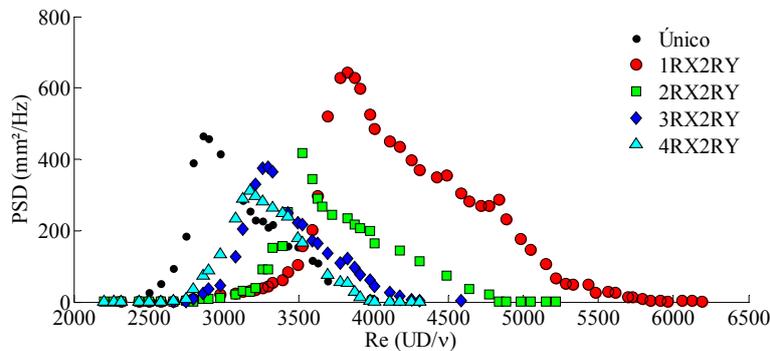


Figura 5.17 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY e 4RX2RY.

5.4.4 Cilindro fixo nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY

Na Figura 5.18 têm-se os deslocamentos obtidos no cilindro analisado com o cilindro a montante, posicionado em 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY.

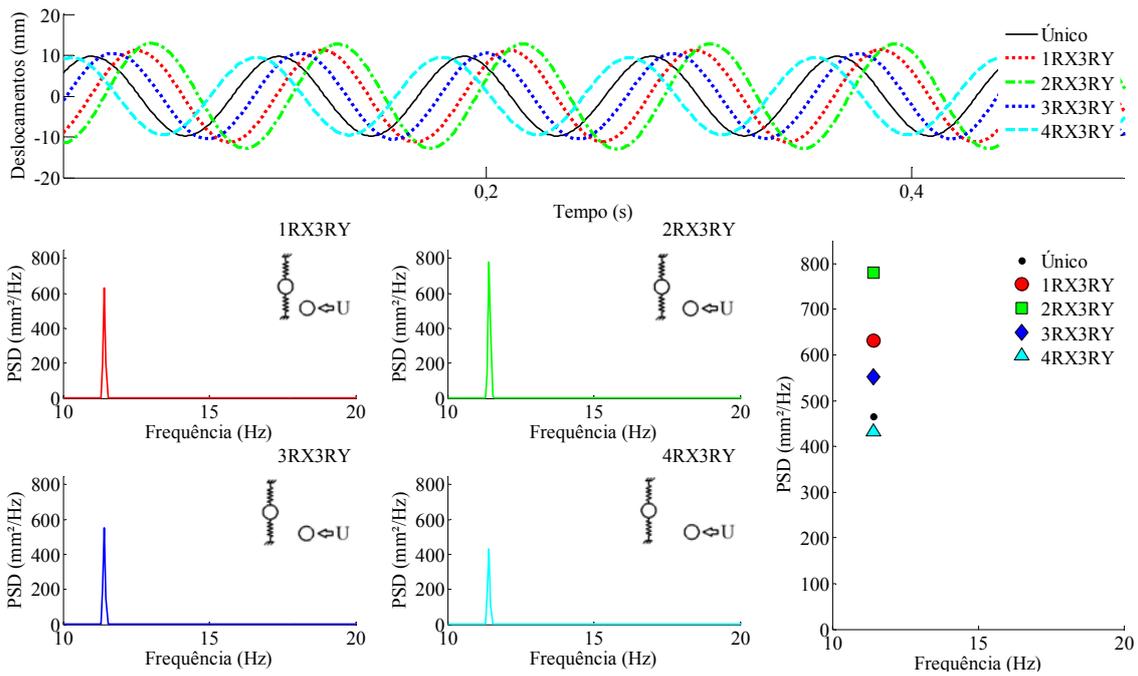


Figura 5.18 - Comparações entre o cilindro sob análise instalado unicamente no túnel e com o cilindro a montante localizado nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY. Na figura é possível ver a amostragem de 0,5 s (acima) e a densidade espectral de potência (abaixo) dos sinais analisados.

Com o cilindro a montante colocado nas posições 1RX3RY, 2RX3RY e 3RX3RY, houve um aumento na amplitude dos deslocamentos apresentados pelo cilindro analisado. Nestas três posições, os valores alcançaram níveis superiores aos obtidos nas análises com somente o cilindro montado elasticamente no túnel de vento. Isto se verifica principalmente nas duas posições mais próximas. Na posição 4RX3RY, os valores foram inferiores, porém muito próximos aos obtidos com o cilindro único, demonstrando que nesta posição o cilindro a montante exerceu pouca influência.

A comparação feita mostra que os valores de máximo deslocamento ocorrem quando o cilindro a montante está posicionado em 2RX3RY. Nesta posição o cilindro analisado atinge $A=12,86$ mm ($A/D=0,51$) de deslocamento máximo para $Re=3.493$. Nas demais posições desta análise os deslocamentos foram de $A=11,26$ mm ($A/D=0,45$) em $Re=3.625$ para a posição 1RX3RY, $A=10,56$ mm ($A/D=0,42$) em $Re=3.394$ para a posição 3RX3RY e $A=9,36$ mm ($A/D=0,37$) em $Re=3.261$ para a posição 4RX3RY.

A frequência em que ocorreram os deslocamentos foi de $f_{osc}=11,41$ Hz. No que diz respeito a rampa de elevação do PSD, esta se apresenta um pouco mais verticalizada para chegar ao pico máximo de oscilação do que para regredir a zero (Figura 5.19).

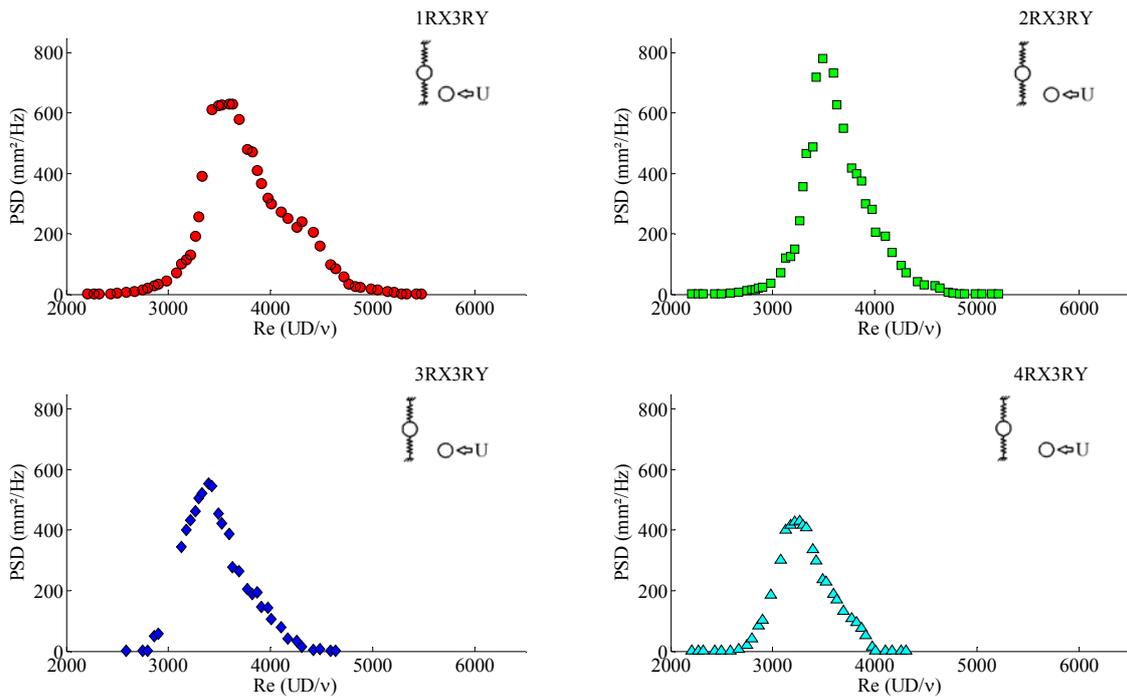


Figura 5.19 - Evolução da PSD em função do número de Reynolds com cilindro à montante localizado nas posições 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY.

A Figura 5.20 apresenta as curvas obtidas pela evolução do PSD em função de Re para as configurações com o cilindro a montante, localizado em 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY em comparação com a curva obtida com a PSD do cilindro analisado instalado isoladamente no túnel de vento. Para as duas posições mais próximas (1RX3RY e 2RX3RY), o cilindro começa a oscilar e, por consequência, ganhar energia significativa praticamente no mesmo ponto, ou seja, com $Re \geq 2.500$. Nas demais posições a oscilação se inicia em valores de Re um pouco maiores.

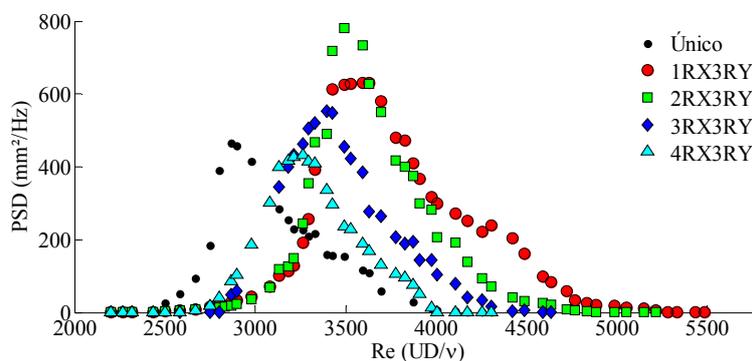


Figura 5.20 - Comparações na evolução do PSD em função do número de Reynolds para o cilindro a montante posicionado em 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY.

A faixa de oscilação é gradualmente menor quanto mais afastado um cilindro se encontra do outro, ou seja, $2.500 < Re < 5.215$ com cilindro fixo na posição 1RX3RY,

$2.500 < Re < 4.719$ com cilindro fixo na posição 2RX3RY, $2.798 < Re < 4.421$ com cilindro fixo em 3RX3RY e $2.583 < Re < 4.007$ com cilindro fixo posicionado em 4RX3RY. Dentro destas faixas, o cilindro inicia a oscilação em qualquer velocidade de fluxo, independente de sua condição inicial.

A Figura 5.21 apresenta as amplitudes adimensionais (A/D) em função do número de Reynolds, onde os deslocamentos máximos ocorreram. Neste gráfico, é possível comparar, para todas as configurações com cilindros utilizadas durante os experimentos, onde se obteve ganho ou perda de amplitude e em quais valores de Re estas amplitudes ocorreram. Verificou-se em todas as análises feitas com a presença do cilindro fixo que, para o cilindro analisado atingir a máxima amplitude, é necessário uma velocidade no escoamento superior aquela onde o cilindro montado elasticamente se encontra isoladamente no túnel de vento.

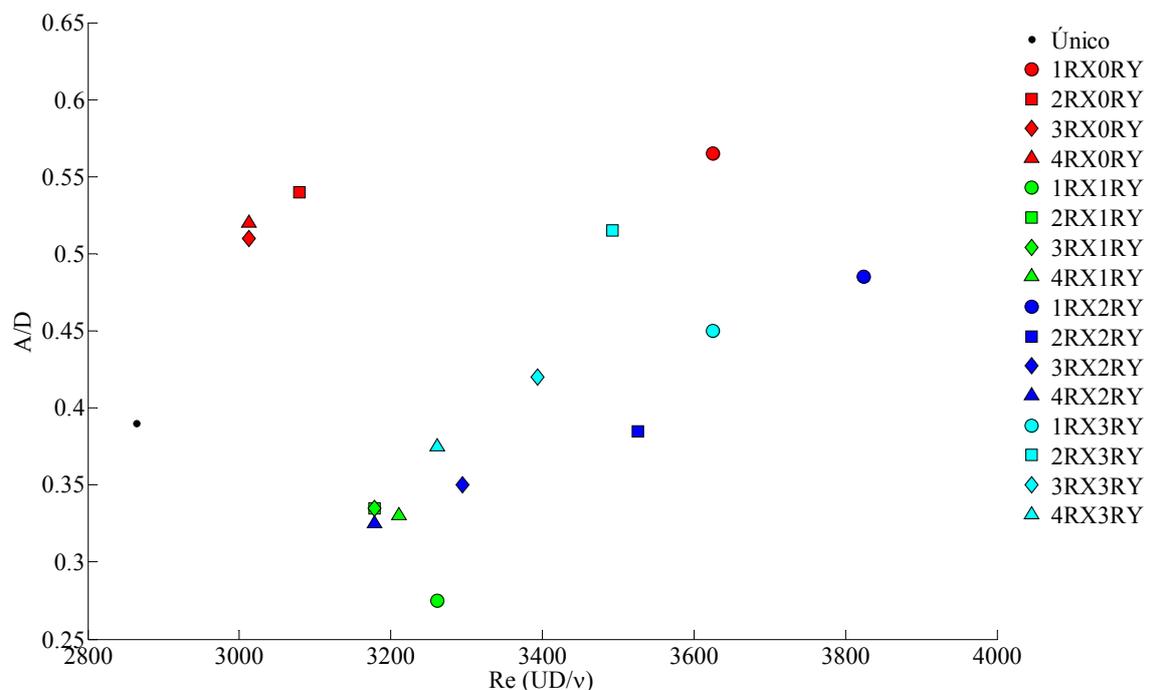


Figura 5.21 - Amplitude adimensional em função de Re dos registros onde ocorreram os maiores deslocamentos no cilindro analisado para todas as posições do cilindro a montante.

A Figura 5.22 apresenta os resultados dos ensaios experimentais nas posições para o cilindro fixo onde a amplitude máxima de oscilação foi superior aquela obtida nos experimentos realizados com somente o cilindro elástico instalado no túnel de vento. Observa-se que as posições diretamente alinhadas (1RX0RY, 2RX0RY,

3RX0RY e 4RX0RY) mais a posição 2RX3RY estão entre as posições para o cilindro fixo onde se obteve os maiores resultados em termos de amplitude de oscilação.

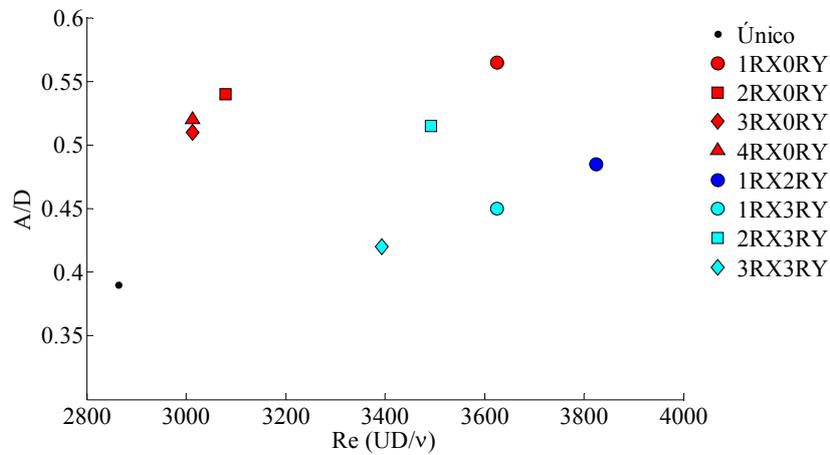


Figura 5.22 - Posições para o cilindro fixo em que obteve ganho de resposta em termos de amplitude de oscilação.

Na Figura 5.23 tem-se um comparativo entre todas as curvas de evolução do PSD em função de Re , obtidas com os registros dos experimentos realizados com o cilindro fixo colocado nas dezesseis posições possíveis mais o registro obtido no cilindro analisado instalado isoladamente no túnel de vento.

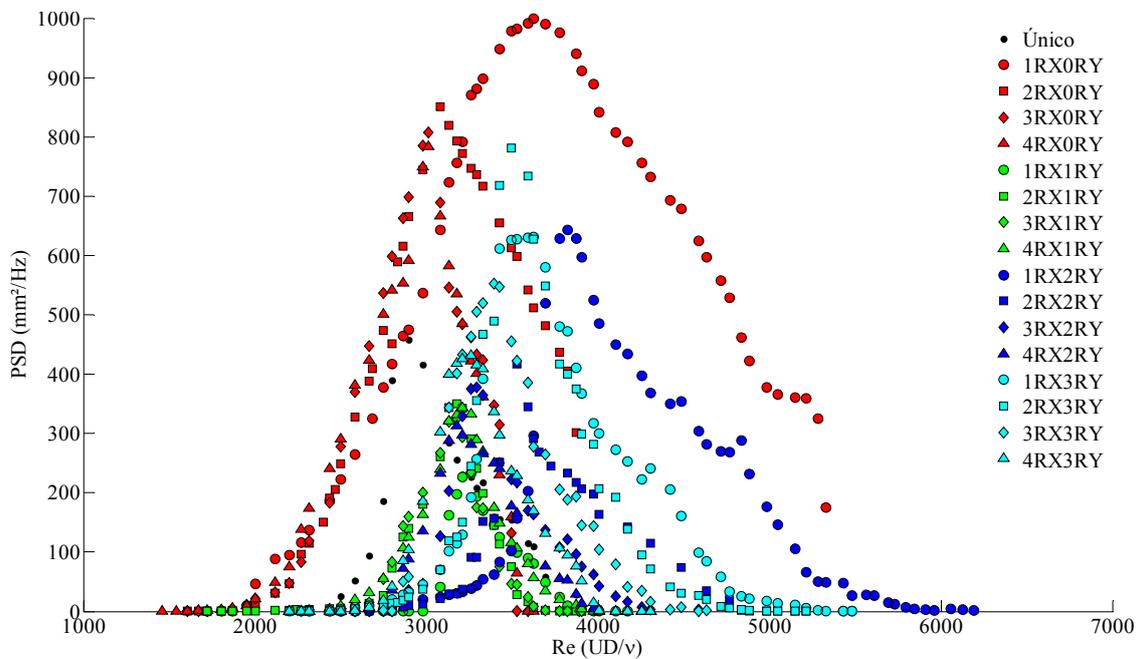


Figura 5.23 - Comparativos entre todas as curvas obtidas pela evolução na densidade espectral de potência em função dos incrementos dados a velocidade do escoamento para as diversas configurações analisadas.

Observa-se que com o cilindro fixo na posição mais próxima ao cilindro analisado (1RX0RY) obteve-se a maior faixa de oscilação de todas as análises feitas. As outras posições onde se obteve aumento desta faixa foram 1RX2RY, 1RX3RY, 2RX3RY, 2RX2RY e 2RX0RY.

Também é possível observar na mesma figura que para as posições diretamente alinhadas (1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY) se tem amplitudes de oscilação com valores equivalentes ao máximo obtido com o cilindro analisado instalado isoladamente no túnel de vento, em valores de Re um pouco menores. Nas demais configurações, quando se chega a esta amplitude, necessita-se de escoamento com velocidades maiores.

A Figura 5.24 apresenta um comparativo com as curvas do PSD obtidas nas análises feitas com o cilindro a montante nas posições onde se obteve uma faixa de oscilação superior a obtida com somente o cilindro analisado instalado no túnel de vento.

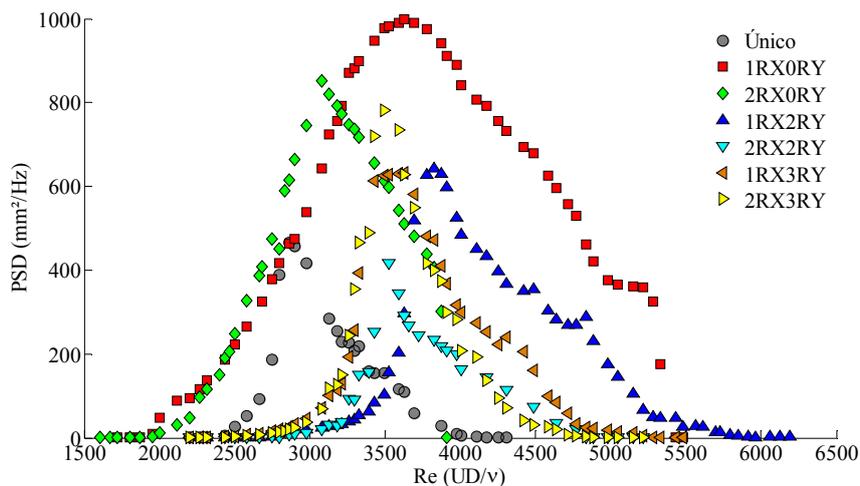


Figura 5.24 - Comparativo entre as curvas de evolução do PSD nas posições para o cilindro fixo onde a faixa de oscilação significativa foi superior à obtida com somente o cilindro analisado instalado no túnel de vento.

As posições 1RX0RY, 2RX0RY e 1RX2RY são aquelas onde se obteve os maiores resultados em termos de faixa de oscilação.

Todos os resultados discutidos neste capítulo estão resumidos na Tabela 5.2 onde se tem um comparativo geral dos resultados obtidos em todas as análises feitas para as diversas configurações ensaiadas no túnel de vento.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos com a realização dos experimentos.

Posição do cilindro fixo	S/D	Re onde ocorre amplitude máxima	A/D	Oscilação em função de Re	
				Início	Final
ÚNICO	-	2.864	0,39	2.318	4.106
1RX0RY	1,50	3.625	0,57	1.954	5.215
2RX0RY	2,00	3.079	0,54	1.954	3.825
3RX0RY	2,50	3.013	0,51	1.954	3.427
4RX0RY	3,00	3.013	0,52	1.954	3.427
1RX1RY	1,58	3.261	0,27	2.980	3.907
2RX1RY	2,06	3.178	0,34	2.434	3.692
3RX1RY	2,55	3.178	0,34	2.434	3.692
4RX1RY	3,04	3.211	0,33	2.434	3.974
1RX2RY	1,80	3.824	0,49	2.748	5.844
2RX2RY	2,24	3.526	0,39	2.748	4.834
3RX2RY	2,69	3.294	0,35	2.748	4.305
4RX2RY	3,16	3.178	0,32	2.748	4.007
1RX3RY	2,12	3.625	0,45	2.500	5.215
2RX3RY	2,50	3.493	0,52	2.500	4.719
3RX3RY	2,92	3.394	0,42	2.798	4.421
4RX3RY	3,35	3.261	0,37	2.583	4.007

6. CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões feitas após a análise dos resultados com a realização dos experimentos. Os resultados obtidos nos experimentos realizados com a presença do cilindro a montante foram comparados aos resultados obtidos nos testes com o cilindro analisado instalado isoladamente no interior do túnel de vento a fim de se determinar em quais posições se obteve maior ganho de amplitude ou de faixa de oscilação.

No final são apresentados os principais problemas encontrados na realização dos experimentos como também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

6.2 AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO

As posições diretamente alinhadas ao cilindro analisado foram responsáveis por significativos ganhos na amplitude de oscilação do cilindro. O maior ganho em amplitude foi obtido com o cilindro a montante, colocado na posição 1RX0RY, porém também foi esta uma das posições em que o cilindro necessitou de velocidade de fluxo bem maior que a do cilindro isolado, para atingir a maior amplitude.

Com o cilindro fixo localizado nas três outras posições diretamente alinhadas, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY, o cilindro analisado apresentou amplitudes máximas inferiores a posição 1RX0RY, porém atingiram este máximo ganho também em números de Reynolds menores. É importante ressaltar que mesmo sendo amplitudes menores, ainda assim são bastante expressivas quando comparadas com as obtidas com o cilindro analisado instalado isoladamente no túnel de vento.

Convém ainda salientar que estas posições são as mesmas que apresentam o inconveniente de, em determinadas velocidades de escoamento, não começar a oscilar a partir de uma situação de repouso, a menos que recebam um impulso inicial. Em

condições de fluxo onde haja muita variação na velocidade, estas posições podem não ser a melhor opção.

Nas outras posições para o cilindro fixo, a que apresentou maior ganho é a posição 2RX3RY ($A/D=0,52$). O percentual de ganho com o cilindro fixo nesta posição representa 32% a mais do que se tinha com somente o cilindro analisado no interior do túnel de vento. Como neste caso não se verificou os problemas que ocorreram para as posições alinhadas, considera-se que esta seja a posição onde se obteve os melhores resultados em termos de amplitude de oscilação.

Com relação à frequência de oscilação, o cilindro apresentou sempre o mesmo valor, ou seja, $f_{osc}=11,41$ Hz, muito próxima da frequência natural do sistema obtida experimentalmente, cujo valor é $f_n=11,47$ Hz.

6.3 FAIXA DE OSCILAÇÃO DO CILINDRO

A faixa de oscilação obtida com o cilindro a montante, colocado na posição 1RX0RY, foi a maior dentre todas as análises realizadas. O ganho em relação a faixa de oscilação obtida para o cilindro único chegou a 82% com o cilindro fixo nesta posição. Porém é importante novamente ressaltar os problemas relatados em relação a fluxo com velocidade variável.

As outras posições em que se obteve ganho expressivo foram 1RX2RY, 1RX3RY, aonde se chegou a aproximadamente 73% e 52% respectivamente, a mais do que a faixa que se tinha com o cilindro único. Para as outras posições 2RX3RY, 2RX2RY e 2RX0RY as resposta foram menos positivas. Mesmo assim, na posição 2RX3RY obteve-se um ganho aproximado de 25%.

Considerando que não foram verificados os problemas ocorridos nas posições 1RX0RY, 2RX0RY, 3RX0RY e 4RX0RY, a posição 1RX2RY foi a que apresentou melhor resultado em termos de faixa de oscilação.

O ramo de resposta inicial se apresentou mais vertical na análise feita com o cilindro instalado isoladamente e com a presença do fixo nas posições 1RX1RY, 1RX2RY, 2RX2RY, 3RX2RY, 4RX2RY, 1RX3RY, 2RX3RY, 3RX3RY e 4RX3RY. Houve bastante semelhança entre ramos de resposta para cilindro fixo nas posições

1RX0RY, 2RX1RY, 3RX1RY e 4RX1RY. Nas demais posições, o ramo final se mostrou ligeiramente mais vertical que o ramo inicial.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pequenas variações de temperatura podem interferir de maneira significativa nos resultados obtidos, afetando principalmente a rigidez do sistema. A série de experimentos realizados envolveu mais de 800 ensaios, sem contar aqueles que foram refeitos por algum problema ou para confirmar algum resultado, o que demandou vários dias na realização de ensaios e testes.

Para a obtenção de resultados mais confiáveis, realizou-se sempre os experimentos, a temperatura em valores muito próximos a 18,0 °C na área de testes, que foi a temperatura onde foram tomadas as velocidades em função da frequência do inversor. Para tanto a temperatura era verificada constantemente e alguns dados adquiridos em dias anteriores foram novamente tomados para que se observasse se mantinham coerência.

O sistema também se mostrou muito sensível a pequenas variações nas velocidades do escoamento. Embora se tenha tomado todas as precauções com relação a este fato, foi de fundamental importância a utilização de uma rotina em Labview com visualização em tempo real dos dados adquiridos para que, caso ocorresse algum fluxo de ar externo, se verificasse se o mesmo alterava a energia ou a qualidade do sinal.

Estas precauções se fazem necessárias na realização de trabalhos futuros para qualquer experimento realizado em túnel de vento. Por isso recomenda-se a utilização de um ambiente com, no mínimo temperatura controlada e isolada de correntes de ar externas. Também se torna importante uma instrumentação no túnel que permita a verificação da temperatura e da velocidade do escoamento ao mesmo tempo em que são realizados os ensaios.

Propõe-se, ainda, a realização dos ensaios com os dois cilindros livres para oscilar, como também, que todos os experimentos sejam conduzidos em canal com correntes de água, inclusive com instrumentação que permita avaliar as forças de arrasto e de sustentação do cilindro, assim como a utilização de outras técnicas de medição

como a velocimetria por imagens de partículas que permite avaliar os campos de velocidade e a vorticidade do escoamento a jusante dos cilindros.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, que se insere em um programa de pesquisa mais amplo, a presente dissertação procurou avaliar e quantificar experimentalmente, a influência causada por um cilindro fixo e colocado em diversas posições, através dos resultados obtidos em outro cilindro colocado a jusante e livre para oscilar.

Os resultados obtidos evidenciaram que a posição relativa do cilindro fixo, exerceu forte influência na amplitude e na faixa de oscilação bem como na velocidade do escoamento em que o cilindro apresentou oscilações significativas.

No que tange a utilização de vibrações induzidas pelo escoamento para a geração de energia elétrica, considera-se de extrema importância, não somente os resultados em que se obteve ganho de amplitude ou faixa de oscilação, mas também aqueles resultados em que obteve perda. Entende-se que, se alguns testes mostraram como se pode obter rendimento e eficiência em um sistema, outros são importantes para se avaliar o que deve ser evitado.

Avaliaram-se estes parâmetros por entender que sejam de grande importância quando se pretende empregar o conceito utilizado no VIVACE, que é o estímulo das vibrações induzidas no escoamento para a geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: Abr 2014.

BEARMAN P. W. Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, v.1, p.195-222, 1984.

BERNITSAS, M. M. VIVACE – A New Concept a to Harness Energy form Ocean / River. Disponível em: <www.personal.umich.edu>. Acesso em: Dez 2013.

BERNITSAS, M. M., RAGHAVAN K., BEN-SIMON Y., GARCIA E. M. H. VIVACE – A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy from Fluid Flow. **25th International OMAE Conference**, 2008.

BERNITSAS, M.,SIMIAO, G. Vortex Hidro Energy. LLC. **NREL's 20th Annual, Industry Growth Forum**, 2007.

BLEVINS, R.B. Flow Induced Vibrations-2nd Edition-Volume 26, Krieger Publishing Company, Florida, 2001. 477p. ISBN 1-57524-183-8.

BOKAIAN A. Galloping of a Circular Cylinder in the Wake of Another. **Journal of Sound and Vibration**. v.128, p.71-85, 1989.

BOKAIAN A. Interference Galloping of a Circular Cylinder Near a Plane Boundary. **Journal of Sound and Vibration**. v.181, p.431-445, 1995.

BOKAIAN A. Interference Galloping of of Upstream Member of a Pair of Circular Cylinder. **Journal of Sound and Vibration**. v.117, p.433-446, 1987.

BRIKA D., LANEVILLE A. The Flow Interaction Between a Stationary Cylinder and a Downstream Flexible Cylinder. **Journal of Fluids and Structures**. v.13, p.579-606, 1999.

CHE-CHUN (JIM) CHANG, KUMAR R. A., BERNITSAS M.M. VIV and Galloping of Single Circular Cylinder With Surface Roughness at $3.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1,2 \times 10^5$. **Ocean Engineering**. v.38, p.1713-1732, 2011.

CRESESSEB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Salvo de Brito. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: Mar 2014.

DEAN, R.G., DALRYMPLE, R.A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Vol. 2. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific, 1994. 353p. ISBN 9810204205.

ELETRORBRAS – Energia para Novos Tempos. Disponível em: <www.eletrorbras.com>. Acesso em: Mar 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – Balanço Energético Nacional 2013. Disponível em: <ben.epe.gov.br >. Acesso em: Mar 2014.

EPIA – European Photovoltaic Industry Association. Disponível em: <www.epia.org>. Acesso em: Mar 2014.

EWEA – The European Wind Energy Association. Disponível em: <www.ewea.org>. Acesso em: Mar 2014.

FALCÃO, A. F. O. Control Techniques for Wave Energy Converters. In: **SUPERGEN MARINE 7th DOCTORAL TRAINING PROGRAMME WORKSHOP**, 2010. Disponível em: <www.engineering.lancs.ac.uk>. Acesso em: Jan 2013.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 14, p. 899-918, 2010.

FENG C.C. The Measurement of Vortex-Induced Effects in Flow Past a Stationary and Oscillating Circular and D-section Cylinders. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of British Columbia, 1968.

FRANZINI G. R., FUJARRA A. L. C; MENEGHINI J.R, KORKISCHKO I., FRANCISS R. Experimental Investigation of Vortex-Induced Vibration on Rigid, Smooth and Inclined Cylinders. **Journal of Fluids and Structures**. V. 25, p. 742-750, 2009.

FRANZINI G. R., GONÇALVES R. T., MENEGHINI J.R., FUJARRA A. L. C. One and Two Degrees of Freedom Vortex-Induced Vibration Experiments With Yawed Cylinders. **Journal of Fluids and Structures**. v.42, p.401- 420, 2013.

GOPALKRISHNAN, R., Vortex-Induced forces on Oscillating Bluff Cylinders. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). Departamento de Engenharia Oceânica, Massachusetts Institute of Technology (MIT). Boston, 1993.

GOVARDHAN R. N., WILLIAMSON C. H. K. Defining the Modified Griffin Plot in Vortex Induced Vibration: Revealing the Effect of Reynolds Number Using Controlled Damping. **Journal of Fluid Mechanics**. v.561, p.147-180, 2006.

HARTOG D. J. P. Mechanical Vibrations. 4ª ed. New York.: McGraw-Hill, 1985. 452p. ISBN 0-486-64785-4.

HUERA-HUARTE F.J., BANGASH Z.A, GONZÁLEZ L.M. Towing Tank Experiments on the Vortex Induced Vibrations of Low Mass Ratio Long Flexible Cylinders. **Journal of Fluid and Structures**. v.48, p.81-92, 2014.

HUERA-HUARTE F.J., BEARMAN P. W. Vortex and Wake Induced Vibrations of a Tandem Arrangement of two Flexible Circular Cylinders with Near Wake Interference. **Journal of Fluid and Structures**. v.27, p.193-211, 2011.

HUERA-HUARTE F.J., BEARMAN P. W. Wake Structures and Vortex Induced Vibrations of a Long Flexible Cylinder -Part 1: Dynamic response. **Journal of Fluid and Structures**.v.25, p. 969-990, 2009.

HUERA-HUARTE F.J., GHARIB M. Flow Induced Vibrations of a Side-by-side Arrangement of Two Flexible Circular Cylinder. **Journal of Fluid and Structures**.v.27, p. 354-366, 2011.

IEA – Internacional Energy Agency. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: Mar 2014.

INSTRUTHERM. Disponível em: <www.instrutherm.com.br>. Acesso em: Mai 2014.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: Jan 2013.

KHALAK, A., WILLIANSO, C.H.K. Motions, forces and Mode Transitions in Vortex Induced Vibration at Low Mass-Damping. **Journal of Fluid and Structures**. v.13, p.813-851, 1999.

KHANDEKAR, M.L. Coastal and Estuarine Studies – Operational Analysis and Prediction of Ocean Win Waves. Springer-Verlag, New York, 1989. 215 p. ISBN 3-540-97150-5.

KORKISCHKO I., MENEGGHINI J. R. Experimental Investigation of Flow induced Vibration on Isolated and Tandem Circular Cylinders Fitted with Strakes. **Journal of Fluids and Structures**. v.26, p.611-625, 2010.

LEE J. H., BERNITSAS M.M, High-Damping, High-Reynolds VIV Tests for Energy Harnessing Using the VIVACE Converter. **Ocean Engineering**. v.38, p.1697-1712, 2011.

MARCOLLO H., HINWOOD J.B., On Shear Flow Single Mode Lock-in with Both Cross-flow and In-line Lock-in Mechanisms. **Journal of Fluid and Structures**. v.22, p.197-211, 2006.

MICROEPSILON. Disponível em: <www.micro-epsilon.com>. Acesso em: Mai 2014.

MORSE T.L., WILLIAMSON C. H. K. Steady, Unsteady and Transient Vortex Induced Vibration Predicted Using Controlled Motion Data. **Journal of Fluid Mechanics**. v.649, p.429-451, 2010.

MREL – Marine Renewable Energy Laboratory. Disponível em: <www.umich.edu>. Acesso em: 31 Jan 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: <brasil.ni.com>. Acesso em: Mai 2014.

PAIDOUSSIS, M. P., PRICE, S. J., LANGRE, E. Fluid Structure Interactions-Cross Flow Induced Instabilities. First published. New York: Cambridge University Press, 2011. 402 P. ISBN 978-0-521-11942-9

PELAMIS WAVE POWER – Disponível em: <www.pelamiswave.com>. Acesso em: Jun 2014.

PINTO W. T., COELHO J. F. L. An Experimental Study of the Cross Flow on a Pair of Staggered Cylinders Subject to Forced Oscillations. **International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation**. 2012.

RAGHAVAN K., BERNITSAS M.M. Experimental Investigation of Reynolds Number Effect on Vortex Induced Vibration of Rigid Circular Cylinder on Elastic Supports. **Ocean Engineering**. v.38, p.719-731, 2011.

SARPKAYA T. Experiments on the Stability of Sinusoidal Flow Over a Circular Cylinder. **Journal of Fluid Mechanics**. v.457, p.157-180, 2002.

SARPKAYA T. Structures of Separation on a Circular Cylinder in Periodic Flow. **Journal of Fluid Mechanics**. v.567, p.281-297, 2006.

SCHLICHTING, H., GERSTEN, K. Boundary Layer Theory. 8th revised and Enlarged Edition, Springer-Verlag, Berlin, 2001. 800 p. ISBN 81-8128-121-7.

SUMER, B.M., FREDSE, J. Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, Advanced Series on Ocean Engineering-Revised Edition-Volume 26. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2006. 530 p. ISBN 981-270-039-0.

SUMNER D., WONG S. S. T., PRICE S. J., PAIDOUSSIS M. P. Fluid Behaviour of Side by Side Circular Cylinders in Steady Cross Flow. **Journal of Fluid and Structures**. v.13, p.309-338, 1999.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. Disponível em: < www.umich.edu >. Acesso em: Jan 2014.

VIKESTAD K., VANDIVER J. K., LARSEN C.M., Added Mass and Oscillation Frequency for a Circular Cylinder Subjected to Vortex Induced Vibrations and External Disturbance. **Journal of Fluid and Structures**. v.14, p.1071-1088, 2000.

VORTEX HYDRO ENERGY – Disponível em: <www.vortexhydroenergy.com>. Acesso em: Jan 2014.

WAVE DRAGON – Disponível em: <www.wavedragon.net>. Acesso em: Fev 2014.

WAVEC – Centro de Energia das Ondas. Disponível em:<www.wavec.org>. Acesso em Mai 2014.

WILLIAMSON C.H.K, ROSHKO A. Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder. **Journal of Fluids and Structures**. v.2, p.355-381, 1988.

ZDRAVKOVICH M. M. Flow Induced Oscillations of Two Circular Cylinders. **Journal of Sound and Vibrations**. v.101, p.511-521, 1985.

ZDRAVKOVICH M. M. The Effects of Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow. **Journal of Fluids and Structures**. v.1, p.239-261, 1987.