

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

**COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE MATERIAIS
PIEZELÉTRICOS SUBMETIDOS ÀS OSCILAÇÕES GALOPANTES**

RICARDO NAOYUKI ALVES DE MORAES SAWAGUCHI

RIO DE JANEIRO

2019

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

**COLHEITA DE ENERGIA ATRAVÉS DE MATERIAIS
PIEZELÉTRICOS SUBMETIDOS ÀS OSCILAÇÕES GALOPANTES**

RICARDO NAOYUKI ALVES DE MORAES SAWAGUCHI

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

RIO DE JANEIRO

2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S271 Sawaguchi, Ricardo Naoyuki Alves de Moraes
Colheita de energia através de materiais piezelétricos
submetidos às oscilações galopantes / Ricardo Naoyuki Alves de
Moraes Sawaguchi – 2019.
xvii, 75f. + anexo : il.color. , grafs. ; enc.

Projeto Final. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso
Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia: f. 73-75.
Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

1. Colheita de energia. 2. Captação de energia – Materiais. 3.
Materiais termoelétricos. 4. Piezoeletricidade. 5. Materiais
piezoelétricos. I. Monteiro, Luciana Loureiro da Silva (Orient.). II.
Título.

CDD 621.3124

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre me apoiou e compreendeu meus momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus por me dar condições de chegar até aqui.

À minha família e, especialmente, minha mãe, a quem eu devo gratidão eterna e poucas palavras não seriam suficientes para expressar todos os meus agradecimentos.

À Hellen Lapas, por todo o apoio e compreensão que foram essenciais.

Ao CEFET/RJ, instituição a qual tenho o orgulho de levar no meu currículo duas formações para o mercado de trabalho.

Aos professores do CEFET/RJ que contribuíram com minha formação.

À minha orientadora, Luciana Loureiro, que não somente foi uma das melhores professoras que tive durante todo o curso, mas também teve um papel fundamental nessa etapa final que me proporcionou um enorme aprendizado.

À ENGEVIX Engenharia e à Ouro Negro, pelo apoio e pela flexibilidade para que eu pudesse trabalhar e estudar.

Ao meu amigo, Eduardo Cruz, que carinhosamente considero como meu mentor e foi grande apoiador e incentivador no início da minha carreira profissional.

Ao Felipe Oliveira e Raphael Ricardo pela ajuda que me deram neste trabalho.

RESUMO

SAWAGUCHI, Ricardo. **Colheita de energia através de materiais piezelétricos submetidos às oscilações galopantes**. 2019. 76 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

Neste trabalho, estudos numéricos sobre interações fluido-estrutura de corpos rombudos com geometrias de seção transversal em D, quadrada e triangular, sujeitos às oscilações galopantes e associados a um sistema de colheita de energia através de materiais piezelétricos são realizados. Um modelo matemático que acopla as equações do movimento dos materiais piezelétricos com as oscilações galopantes de um grau de liberdade é solucionado numericamente para diferentes condições de escoamento e configurações de geometria. Por fim, análises paramétricas envolvendo as variáveis do coeficiente aerodinâmico são realizadas para otimização da colheita de energia.

Palavras-chave: colheita de energia, piezeletricidade, oscilações galopantes, vibrações induzidas por fluxo.

ABSTRACT

SAWAGUCHI, Ricardo. **Energy harvesting from piezoelectric materials subjected to galloping**. 2019. 76 pages. Undergraduate Thesis – Federal Center of Technological Education. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

In this work, numerical studies regarding fluid-structure interactions of bluff bodies with cross-section geometries as D, square and triangle, subjected to galloping and coupled with a piezoelectric energy harvesting system are performed. A mathematical model that couples the motion equations of the piezoelectric materials and the galloping with one degree of freedom is solved numerically for different flow conditions and geometry configurations. Finally, parametric analyzes involving the aerodynamic coefficient variables are performed for energy harvesting optimization.

Keywords: energy harvesting, flow-induced vibration, galloping, piezoelectricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama esquemático de um sistema de colheita de energia (adaptado de Uddin <i>et al</i> , 2016).....	19
Figura 2.1: Gerador de energia piezoeletrico utilizando vibrações aeroelásticas como o galope. (adaptado de Siroshi e Mahadik, 2011).....	22
Figura 2.2: Gerador de energia baseado em VIV. (adaptado de Pan <i>et al</i> , 2017).....	22
Figura 2.3: Diagrama do sistema coletor de energia utilizando FIV proposto por Uddin <i>et al</i> , 2016. (adaptado de Uddin <i>et al</i> , 2016).	23
Figura 2.4: Esquema do coletor de energia através de materiais piezoeletricos utilizando FIV. (adaptado de Uddin <i>et al</i> , 2016)	24
Figura 2.5: Aumento da eficiência η com a velocidade de escoamento. Cilindro rígido (linha preta + vermelha tracejada); Cabo com tração constante (linha preta traço-ponto); Cabo com tração induzida por arrasto (linha azul). (Grouthier <i>et al</i> , 2012).....	27
Figura 3.1: Modelo molecular de exemplificação do efeito piezoeletrico. (a) Molécula eletricamente neutra, cargas elétricas com centros coincidentes; (b) Polarização P_k resultante da força aplicada F_k . (c) Efeito da polarização na superfície do cristal piezoeletrico. (Dahiya <i>et al</i> , 2013).....	29
Figura 3.2: (a) Gráfico de histerese Polarização x Campo elétrico, P-E (acima) e gráfico de Deformação x Campo elétrico, S-E (embaixo); (b) material piezoeletrico antes (linha tracejada) e após o “ <i>poling</i> ”; (c) deformação decorrente da aplicação de tensão elétrica de mesma polaridade do “ <i>poling</i> ”; (d) deformação decorrente da tensão elétrica de polaridade invertida; (e) geração de tensão elétrica com polaridade similar ao do “ <i>poling</i> ” devido aplicação de carga compressiva; (f) geração de tensão elétrica com polaridade inversa em relação ao “ <i>poling</i> ” devido aplicação de carga trativa no cristal. (adaptado de Dahiya <i>et al</i> , 2013)	31
Figura 3.3: Direções do tensor para definição das relações constitutivas. (Dahiya <i>et al</i> , 2013)	32
Figura 3.4: Dois modos de acoplamento piezoeletrico. (a) Modo d_{33} . (b) Modo d_{31} (adaptado de Rafique, 2018).....	32
Figura 3.5: Diagrama esquemático de um sistema de colheita de energia através de materiais piezoeletricos (adaptado de Rafique, 2018)	33
Figura 3.6: Modelo típico de um sistema de colheita de energia baseado em vibrações (adaptado de Cellular, Savi e Silva, 2016).....	34
Figura 3.7: Escoamento viscoso em torno de um aerofólio. (Fox, 2014).....	35
Figura 3.8: A camada-limite sobre uma placa plana. (Fox, 2014)	36
Figura 3.9: Regime de escoamento ao sobre cilindros circulares. (adaptado de Lienhard, 1966)	39
Figura 3.10: Mapa dos modos da esteira de vórtices, mostrando os modos 2S, 2P e P+S. (adaptado de Williamson e Govardhan, 2004).....	40

Figura 3.11: Fotografia da ponte Tacoma Narrows durante as oscilações galopantes que a levaram ao seu colapso (Païdoussis, Price e Langre, 2011).....	41
Figura 3.12: (a) Força aerodinâmica em um cilindro circular (por exemplo, fio da linha de transmissão) devido do escoamento; (b) força aerodinâmica num condutor revestido de gelo (adaptado de Païdoussis, Price e Langre, 2011).....	42
Figura 3.13: Modelo para oscilações galopantes com um grau de liberdade (adaptado de Blevins, 2001).....	43
Figura 4.1: Modelo de estrutura elástica coletora de energia através de materiais piezelétricos com um grau de liberdade (adaptado de Abdelkefi <i>et al</i> , 2013).....	45
Figura 4.2: Relação entre o ângulo de ataque α , velocidade na direção do eixo y , velocidade do escoamento U e a velocidade de escoamento relativa U_{rel} . (adaptado de Blevins, 2001).....	46
Figura 4.3: Geometrias dos corpos rombudos estudados no presente trabalho. (a) Seção D; (b) Quadrado; (c) Triângulo isósceles com $\delta = 30^\circ$ (Fonte própria).....	47
Figura 4.4: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção D em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013); Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	49
Figura 4.5: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção D em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)	49
Figura 4.6: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção quadrada em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)	50
Figura 4.7: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção quadrada em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	50
Figura 4.8: Comparação dos deslocamentos máximos em função da resistência elétrica para a seção quadrada em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	51
Figura 4.9: Comparação da potência máxima em função da resistência elétrica para a seção quadrada em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)	51
Figura 4.10: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	52
Figura 4.11: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	52
Figura 4.12: Comparação dos deslocamentos máximos em função da resistência elétrica para seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria).....	53

Figura 4.13: Comparação da potência máxima em função da resistência elétrica para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi <i>et al</i> (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)	53
Figura 5.1: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal em D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	55
Figura 5.2: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal em D com $R = 10^4 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 300 s a 400 s. (Fonte própria).....	56
Figura 5.3: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	56
Figura 5.4: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)	57
Figura 5.5: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	58
Figura 5.6: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 75 s a 100 s. (Fonte própria)	58
Figura 5.7: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	59
Figura 5.8: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)	59
Figura 5.9: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	60
Figura 5.10: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 45 s a 60 s. (Fonte própria)	61
Figura 5.11: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)	61
Figura 5.12: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)	62
Figura 5.13: Comparação dos deslocamentos máximos para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)	63
Figura 5.14: Comparação das potências máximas para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria).....	63
Figura 5.15: Comparação dos deslocamentos RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria).....	64

- Figura 5.16: Comparação das tensões elétricas RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)..... 64
- Figura 5.17: Comparação das potências RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)..... 65
- Figura 5.18: Variação da potência máxima com o coeficiente de acoplamento eletromecânico para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) e $U = 10$ m/s. (Fonte própria)..... 68
- Figura 5.19: Variação da potência RMS com o coeficiente de acoplamento eletromecânico para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) e $U = 10$ m/s. (Fonte própria)..... 68
- Figura 5.20: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^3 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 69
- Figura 5.21: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^4 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 69
- Figura 5.22: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^5 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 70
- Figura 5.23: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^3 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 70
- Figura 5.24: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^4 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 70
- Figura 5.25: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^5 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Largura do pico ao logo da velocidade ótica de escoamento $w = \Delta U/\bar{U}$	28
Tabela 4.1: Valores dos parâmetros adotados na solução numérica para comparação com Abdelkefi <i>et al</i> (2013).	48
Tabela 5.1: Escala de Beaufort.....	66
Tabela 5.2: Consumo de diversos dispositivos alimentados por bateria.....	67

LISTA DE ABREVIACOES

FIV	<i>Flow Induced Vibration</i> (vibração induzida por fluxo, tradução livre)
GDL	Grau de liberdade
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> (microssistemas eletromecânicos, tradução livre)
RMS	<i>Root mean square</i> (raiz quadrática média, tradução livre)
VIV	<i>Vortex-Induced Vibration</i> (vibração induzida por vórtices, tradução livre)

LISTA DE SÍMBOLOS

\ddot{u}	Aceleração da base num sistema com excitação de base
A/D	Amplitude da esteira de vórtices
α	Ângulo de ataque
E_k	Campo elétrico na direção k para as equações constitutivas dos materiais piezelétricos
E_m	Campo elétrico na direção m para as equações constitutivas dos materiais piezelétricos
C_p	Capacitância da camada piezelétrica
C_y	Coefficiente aerodinâmico da força aplicada na direção normal ao escoamento
θ	Coefficiente de acoplamento eletromecânico
b	Coefficiente de amortecimento viscoso
C_D	Coefficiente de arrasto
d_{mi}	Coefficiente de deformação piezelétrica nas direções m e i
C_L	Coefficiente de sustentação
l	Comprimento da estrutura
λ/D	Comprimento de onda da esteira de vórtices
S_i	Deformação na direção i para as equações constitutivas dos materiais piezelétricos
ρ	Densidade do fluido
u	Deslocamento da base num sistema com excitação de base
y	Deslocamento da estrutura na direção do eixo y
z	Deslocamento de uma massa em relação à base
D_m	Deslocamento elétrico na direção m
$y_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo no eixo y
y_{RMS}	Deslocamento quadrático médio no eixo y
d	Diâmetro de um cilindro sujeito a escoamentos externos
D	Dimensão característica do corpo sujeito ao escoamento
ξ	Fator de amortecimento mecânico
ξ_y	Fator de amortecimento mecânico na direção do eixo y

F_y	Força aerodinâmica por unidade de comprimento na direção do eixo y
F_k	Força aplicada numa molécula de material piezelétrico
F_D	Força de arrasto por unidade de comprimento
F_L	Força de sustentação por unidade de comprimento
f_s	Frequência da esteira de vórtices
ω_n	Frequência natural
f_n	Frequência natural de vibração
s_{ij}^E	Inverso do tensor elástico sob campo elétrico nulo ou constante nas direções i e j
m	Massa total por unidade de comprimento
Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal
ε_{mk}^T	Permissividade elétrica sob tensão nula ou constante nas direções m e k
P_k	Polarização de uma molécula de material piezelétrico
$P_{máx}$	Potência máxima por unidade de comprimento
P	Potência elétrica instantânea
\dot{y}	Primeira derivada temporal do deslocamento da estrutura na direção do eixo y
R	Resistência elétrica
k	Rigidez da estrutura
\ddot{y}	Segunda derivada temporal do deslocamento da estrutura na direção do eixo y
\dot{V}	Taxa da tensão elétrica
V	Tensão elétrica
V_{RMS}	Tensão elétrica em valores quadráticos médios
T_i	Tensão mecânica na direção i para as equações constitutivas dos materiais piezelétricos
T_j	Tensão mecânica na direção j para as equações constitutivas dos materiais piezelétricos
P	Terminologia para um par de vórtices
S	Terminologia para único vórtice
U	Velocidade do escoamento
U_{rel}	Velocidade do escoamento relativa

\dot{y}_{RMS}	Velocidade quadrática média no eixo y
V_{rn}	Velocidade reduzida
μ	Viscosidade do fluido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
INTRODUÇÃO	18
CAPÍTULO 2	21
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
CAPÍTULO 3	29
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1 O FENÔMENO DA PIEZOELETRICIDADE.....	29
3.1.1 Equações Constitutivas do Material Piezelétrico	31
3.1.2 Colheita de Energia através de Materiais Piezelétricos	32
3.1.3 Equação do Movimento de um Coletor de Energia através de Materiais Piezelétricos.....	33
3.2 ESCOAMENTO EXTERNO	34
3.2.1 A Camada-Limite.....	35
3.2.2 Número de Reynolds.....	36
3.2.3 Número de Strouhal	36
3.2.4 Arrasto.....	37
3.2.5 Sustentação.....	37
3.3 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES (VIV)	37
3.3.1 Frequência da Esteira de Vórtices (f_s).....	40
3.3.2 Região de <i>lock-in</i>	40
3.3.3 Velocidade Reduzida (V_{rn}).....	41
3.4 OSCILAÇÕES GALOPANTES.....	41
3.4.1 Mecanismo das Oscilações Galopantes com um Grau de Liberdade.....	43
CAPÍTULO 4	45
METODOLOGIA	45
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM COLETOR DE ENERGIA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS SUJEITOS ÀS OSCILAÇÕES GALOPANTES COM 1 GDL	45
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	47
CAPÍTULO 5	55

ANÁLISE NUMÉRICA DAS DIFERENTES GEOMETRIAS DE CORPOS SUJEITOS AO GALOPE	55
5.1 SEÇÃO D.....	55
5.2 QUADRADO	57
5.3 TRIÂNGULO ISÓSCELES ($\Delta = 30^\circ$)	60
5.4 COMPARAÇÃO DAS GEOMETRIAS.....	62
5.4.1 Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico θ	67
5.5 ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS COEFICIENTES a_1 E a_3	69
CAPÍTULO 6.....	72
CONCLUSÃO.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A busca por alternativas energéticas é um dos temas mais importantes de pesquisa do século XXI. A preocupação com os impactos sofridos pela natureza devido à queima de combustíveis fósseis, alagamento de áreas com grandes dimensões, para geração de energia hidroelétrica, e acidentes nucleares chamaram a atenção da comunidade internacional quanto à necessidade de preservar o nosso planeta, pois as alterações climáticas, desaparecimento de espécies e poluição do ar por partículas em suspensão ameaçam o futuro das próximas gerações.

Diante do cenário exposto, um exemplo de alternativa que vai ao encontro da solução do problema são os materiais piezelétricos. Esses são providos de uma característica bem peculiar, a capacidade de transformar energia mecânica vibracional em energia elétrica e vice-versa, portanto o desenvolvimento de pesquisas sobre esse tema visa a ampliação da capacidade de geração energética, culminando em uma maior utilização dessa tecnologia.

A viabilidade econômica de sistemas piezelétricos depende do custo-retorno inerente ao projeto, ou seja, a geração de energia precisa ser suficiente para justificar o investimento. Tal fator motivou diversos estudos sobre a geração de energia com esses materiais através de vibrações induzidas por desprendimento de vórtices em estruturas esbeltas e rombudas.

Algumas contribuições acadêmicas feitas por Franzini e Bunzel (2018), Dai *et al* (2014), Zhang *et al.* (2017) e Akaydin, *et al* (2012) nortearam este estudo, embasando teoricamente os resultados da excitação dependentes do tempo devido à interação fluido-estrutura e as análises paramétricas que pretendem otimizar a geração de energia.

Várias pesquisas para a alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo são feitas utilizando dispositivos capazes de converter energia mecânica em elétrica. A colheita de energia através de correntes de ar, marés, ondas e escoamentos confinados em tubulações é bastante atraente e permite utilizar as vibrações como fonte de excitação. O uso de vibração induzida por fluxo (*flow induced vibration*, FIV) indica que energia pode ser coletada do escoamento em tubulações, fluxo sanguíneo nas artérias ou fluxo de ar nas cavidades de um pneu, por exemplo.

O processo de recuperação das energias presentes no ambiente para converter em energia elétrica e fornecer, ou armazenar, a dispositivos de baixo consumo, é chamado de *colheita de energia (Energy Harvesting)* (UDDIN *et al.*, 2016). A energia mecânica, necessária

para a colheita de energia do ambiente, ocorre em praticamente todos os sistemas de engenharia, pois os geradores de colheita podem usar energia de vibração, movimentos aleatórios, deformação e variação de pressão, escoamento de fluidos (rios, vento e ondas oceânicas, por exemplo) e até mesmo energia do corpo humano. Na Figura 1.1 é apresentado um diagrama esquemático de um sistema de colheita de energia do ambiente.

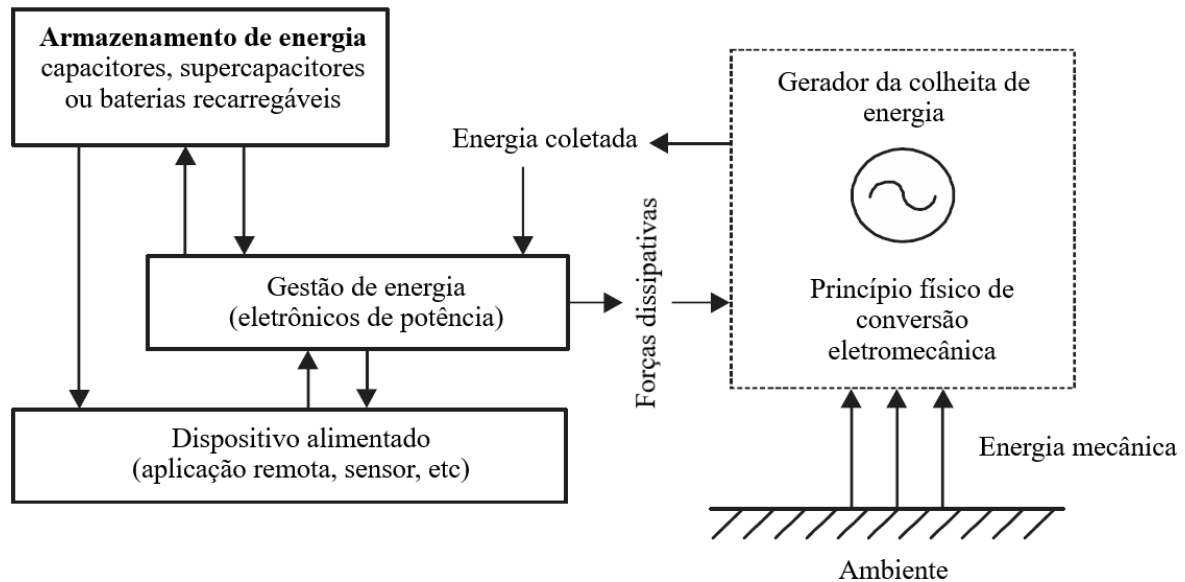


Figura 1.1: Diagrama esquemático de um sistema de colheita de energia (adaptado de Uddin *et al*, 2016)

Através dos Microsistemas Eletromecânicos (*Micro Electro Mechanical Systems*, MEMS), por exemplo, as vibrações mecânicas são uma potencial fonte de energia, facilmente acessíveis para a conversão em energia elétrica. Dentre algumas alternativas, os materiais piezelétricos se apresentam como a melhor opção para o aproveitamento dessas vibrações na conversão em energia elétrica, devido às suas propriedades.

O objetivo do trabalho é realizar um estudo da interação fluido-estrutura de corpos rombudos com diferentes geometrias de seção transversal acoplado a um gerador piezelétrico, com um grau de liberdade, sujeito às oscilações galopantes. Para este fim, será adotado um modelo matemático, já aplicado na literatura, que acopla as equações do movimento dos materiais piezelétricos sujeitos a uma excitação de base e de corpos sujeitos ao galope com um grau de liberdade. A partir desse modelo, análises numéricas serão implementadas variando diferentes condições de escoamento e configurações da geometria do corpo. Por fim, serão realizadas análises paramétricas para a otimização da colheita de energia

Este trabalho é organizado conforme a seguir: no CAPÍTULO 2 é apresentado uma revisão bibliográfica contendo o estado da arte das pesquisas envolvendo a colheita de energia através de materiais piezelétricos associados às vibrações induzidas por fluxo. No CAPÍTULO

3 é feita uma revisão teórica dos conceitos que serão necessários para a implementação do modelo matemático numa solução numérica. No CAPÍTULO 4 é apresentada a metodologia aplicada neste trabalho, em que serão utilizados modelos matemáticos, solucionados numericamente, de um sistema com interação fluido-estrutura acoplado a um gerador piezelétrico e sujeito ao galope. O CAPÍTULO 5 apresenta os resultados e comparações das análises numéricas das diferentes geometrias, além de apresentar análises paramétricas para a otimização da colheita de energia. Por fim, no CAPÍTULO 6 o trabalho é concluído e são feitas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Boa parte dos geradores de energia baseados em vibração utilizando materiais piezelétricos está sob a forma de vigas em balanço (*cantilever*) com uma extremidade engastada na fonte de vibração e a outra extremidade livre para vibrar. As configurações mais comuns das vigas piezelétricas consistem em uma ou duas camadas de material piezelétrico recobrimdo um substrato de material convencional (alumínio, latão, entre outros), sendo assim geralmente denominados unimorfos ou bimorfos (ERTURK e INMAN, 2011).

Conforme Erturk *et al* (2009), a amplitude de saída elétrica de um gerador piezelétrico é máxima quando excitado na frequência de ressonância e é reduzida rapidamente fora deste limite. O ajuste da frequência de ressonância pode ser feito com a adição de uma massa na extremidade livre da viga para adaptar-se a fontes disponíveis no ambiente (sintonia).

Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com sistemas de geração de energia que operam no regime linear, utilizando fontes de vibração harmônicas ou randômicas com diferentes amplitudes e frequências de excitação de forma a verificar parâmetros geométricos, constitutivos, de operação e diferentes circuitos de armazenamento de energia que otimizem a potência de saída (SODANO E INMAN, 2004; DU TOIT, 2005; ZHEN E QING, 2011; SILVA ET AL, 2013; SODANO ET AL., 2015; SILVA ET AL., 2015).

Nos últimos anos, diversos estudos numéricos e experimentais visam o uso desses geradores em presença de escoamento externo produzido por ventos ou correntes marítimas. Abdelkefi *et al* (2014) realizaram uma revisão sobre trabalhos relacionados a colheita de energia induzidas por vibrações aeroelásticas, incluindo galope e VIV (Vibrações Induzidas por Vórtices). A colheita de energia através de galope refere-se a presença de um corpo rombudo que oscila na direção normal ao escoamento, além de estarem sujeitas a fortes excitações pelo desprendimento de vórtices são suscetíveis ao galope. Estes geradores de energia possuem geralmente uma forma retangular ou prismática, conforme mostra a Figura 2.1 do trabalho apresentado por Siroshi e Mahadik (2011). Muitos estudos visam verificar a influência das estruturas com diferentes seções transversais para otimizar o gerador de energia (BLEVINS, 2001; ALONSO *et al*, 2005, 2007; ALONSO *et al*, 2010).

Já os geradores induzidos por vórtices se baseiam em um cilindro imerso em um fluido que produz os vórtices necessários, geralmente devido à presença de um corpo rombudo imediatamente a montante (PAN *et al.*, 2017), ver Figura 2.2.

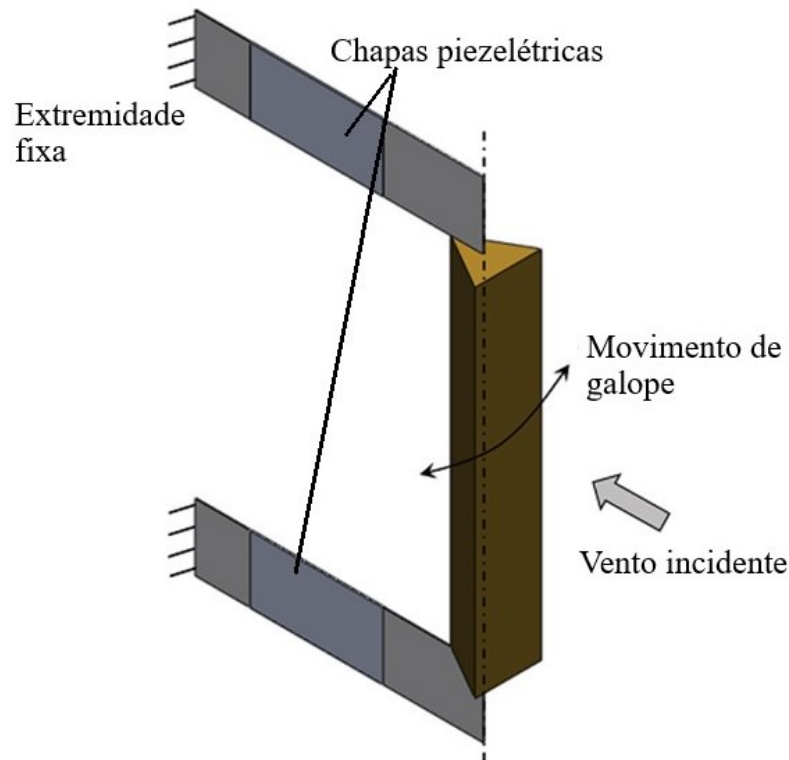


Figura 2.1: Gerador de energia piezelétrico utilizando vibrações aeroelásticas como o galope. (adaptado de Siroshi e Mahadik, 2011)

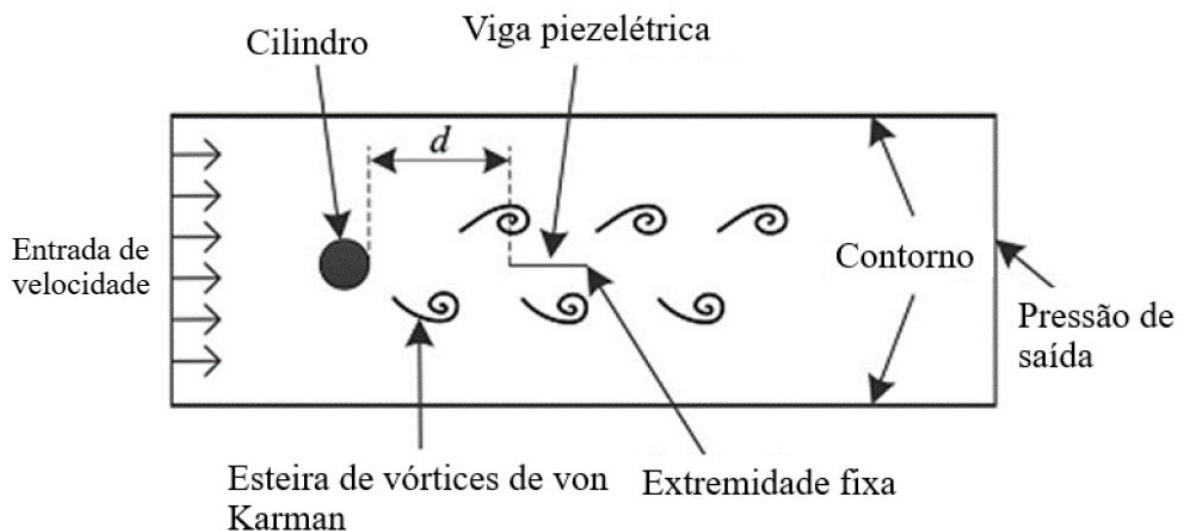


Figura 2.2: Gerador de energia baseado em VIV. (adaptado de Pan *et al.*, 2017)

Tomasini *et al* (2016) investigaram a aplicação de coletores de energia a partir de materiais piezelétricos acoplados a corpos rombudos sujeitos ao galope para a alimentação de sensores sem fio. Estes seriam responsáveis pela medição das acelerações nas caixas de eixos

de trens de carga para detecção de deterioração que podem levar ao descarrilhamento do veículo. Nessa aplicação, a velocidade do ar é relativa à velocidade do trem, que em condições típicas fica em torno de 20 m/s.

Um estudo apresentou a modelagem de um projeto de *cantilever* piezelétrico baseado em microsistemas eletromecânicos (MEMS) utilizando Vibração Induzida por Fluxo (FIV) para microgeradores de baixa potência (UDDIN *et al.*, 2016). A fim de reduzir a frequência de ressonância do *cantilever* piezelétrico, uma massa de prova foi instalada na sua extremidade e foi aplicado um fluxo de fluido ambiente para promover vibrações no corpo. Também, na frente do *cantilever* piezelétrico integrado ao circuito eletrônico foi colocado um corpo rombudo que gerou deslocamentos, provenientes da vibração induzida, na extremidade livre do conjunto. Através da análise tridimensional da geometria, baseado no modelo analítico de vibração, e de simulações por elementos finitos (FEA) do comportamento do conjunto, foi possível obter tensão, deformação, frequência de ressonância, deslocamento, tensão elétrica (entre 2,9 mV e 4,5 mV) e potência de saída. A Figura 2.3 apresenta o diagrama proposto para um sistema de colheita de energia através de materiais piezelétricos utilizando FIV. Na Figura 2.4 é mostrado a montagem do sistema de colheita de energia através do *cantilever* piezelétrico sujeito a vibrações devido aos vórtices gerados pela aplicação de um fluxo de fluido ambiente no corpo rombudo.

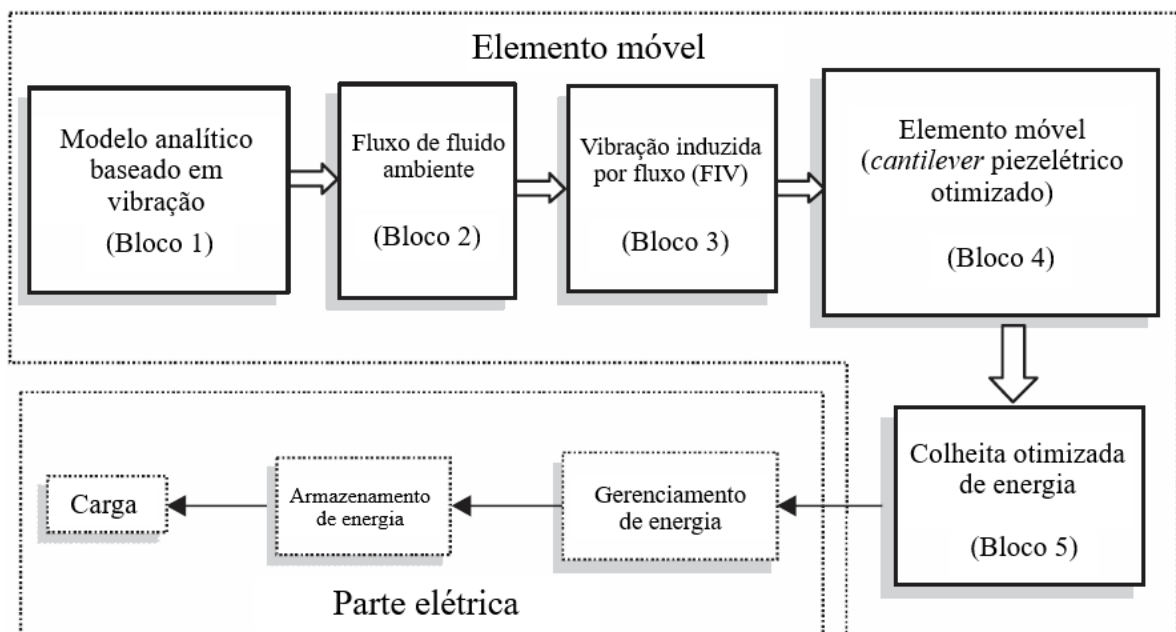


Figura 2.3: Diagrama do sistema coletor de energia utilizando FIV proposto por Uddin *et al.*, 2016.

(adaptado de Uddin *et al.*, 2016).

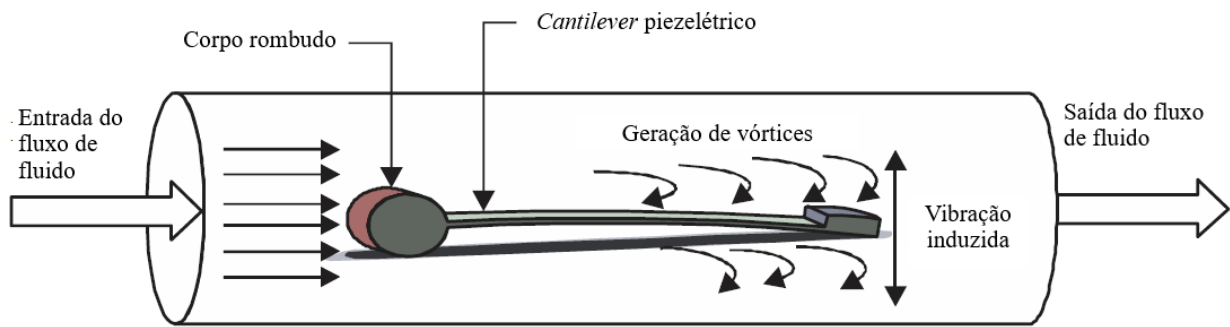


Figura 2.4: Esquema do coletor de energia através de materiais piezelétricos utilizando FIV. (adaptado de Uddin *et al.*, 2016)

Em 2017 foi proposto uma forma de otimizar a potência de saída da “colheita” de energia através de materiais piezelétricos a partir de vibrações induzidas por vórtices ao utilizar forças magnéticas não-lineares (ZHANG *et al.*, 2017). Dois ímãs pequenos com uma força repulsiva foram instalados num suporte inferior e no fundo de um cilindro sujeito a um vento de velocidade uniforme. Ao variar a posição dos ímãs, foi possível alterar consideravelmente a frequência natural do coletor de energia baseado em VIV. Chegou-se à conclusão de que as forças magnéticas não-lineares foram responsáveis por ampliar a região de sincronização, proporcionando um aumento de 138% e 29%, quando comparado à configuração clássica, na colheita da potência de saída. Esses resultados mostraram que com a utilização de forças magnéticas em coletores de energia com piezelétricos, seria possível obter-se sistemas autoalimentados.

Estudos numéricos foram realizados sobre a dinâmica de um cilindro rígido acoplado a suportes elásticos acoplados com coletores piezelétricos e sujeitos a vibrações induzidas por vórtices (VIV). O objetivo principal foi analisar a influência da adição de um grau de liberdade na direção paralela ao escoamento, em que, inicialmente, somente considerava-se oscilações transversais, no sistema fluido-sólido-elétrico. Foi identificado que a presença simultânea de oscilações na direção do escoamento e oscilações transversais estão associadas a um aumento significativo na máxima eficiência de obtenção de energia, de 5% para 15%, ao comparar com um sistema de somente um grau de liberdade. Além disso, um estudo sobre a influência das grandezas adimensionais que caracterizam os coletores piezelétricos identificou que a eficiência na colheita de energia pode ser aumentada em até 50% na velocidade reduzida de $V_{rn} = 6$. (FRANZINI e BUNZEL, 2018)

Experimentos foram conduzidos para analisar a influência das oscilações galopantes, com foco nos efeitos de esteira e da turbulência, em um coletor *cantilever* piezelétrico uniforme com um corpo de seção transversal quadrada em sua extremidade livre. Foram realizados dois

experimentos em que um observou o efeito de se posicionar um coletor na esteira de outro coletor galopante para determinar sua influência. No outro experimento, foi investigado a influência de se colocar malhas fina e grossa que provocaram turbulências a montante do *cantilever* piezelétrico. No primeiro teste, os resultados mostraram que o posicionamento do corpo gerador de esteira à frente do *cantilever* piezelétrico a distâncias maiores que 18 cm e velocidade de vento de 3,05 m/s proporcionou valores quadráticos maiores de tensão elétrica do que somente o *cantilever* piezelétrico. Foi concluído que a presença de uma esteira instável pode gerar um maior amortecimento aerodinâmico, o que promove a instabilidade no coletor com maiores amplitudes de oscilações. No segundo experimento, foi notado que o aumento da espessura dos fios da malha reduz a velocidade do vento, portanto reduz a eficiência na geração de energia do *cantilever* piezelétrico. Também, foi notado que havia o limite de 30 cm de distância, entre o *cantilever* e a malha, em que o efeito da turbulência gerada pela malha desaparece, reduzindo consideravelmente a tensão elétrica quadrática média obtida. Sob espaçamento menor do que 30 cm, valores maiores de tensão elétrica foram obtidos. (ABDELKEFI *et al.*, 2014)

Investigações relacionadas ao uso simultâneo de excitações na base e vibrações induzidas por vórtices (VIV) para a geração de energia através de coletores de energia com materiais piezelétricos foram realizadas em 2014 por Dai *et al.* Eles utilizaram um coletor composto por um *cantilever* piezelétrico de multicamadas com um cilindro de seção circular acoplado à sua extremidade livre sujeito ao escoamento uniforme de ar e sujeito a excitações harmônicas diretas. Para prever a performance do coletor, um modelo baseado no princípio de Euler-Lagrange e de discretização de Garlekin foi desenvolvido. A modelagem do coeficiente de sustentação foi feita através do oscilador de van der Pol, representado por uma equação diferencial de segunda ordem que descreve oscilações com amortecimentos não-lineares. Foi identificado que somente quatro modos na discretização de Garlekin foram necessários para prever o comportamento do coletor. Para identificar os efeitos da resistência elétrica e velocidade do vento na frequência de acoplamento e amortecimento eletromecânico. Observou-se que quando a velocidade do vento está na região de pré ou pós-sincronização, ocorre um aumento no amortecimento eletromecânico e há uma redução na energia coletada. Quando a velocidade do vento está na região de *lock-in* ou de sincronização combinada com uma excitação de base e vibrações induzidas por vórtices, há um aumento de até 150% na energia coletada ao se comparar com o uso de dois coletores isolados. (DAI, ABDELKEFI e WANG, 2014)

Um sistema de auto excitação para conversão de energia através de materiais piezelétricos foi testado experimentalmente por Akaydin, *et al.* (2012). Nesse trabalho, as condições de escoamento sob a estrutura do sistema a ser estudado era de fluxo laminar uniforme. Além disso, o sistema era composto de um cilindro ligado à extremidade livre de uma alavanca, onde foi acoplado um material piezelétrico. O cilindro foi sujeito às forças oscilatórias, devido aos fenômenos de interação fluido-estrutura. Nesse sentido, os elementos piezelétricos ficaram submetidos a esforços, desenvolvendo assim cargas elétricas. O sistema foi testado em um túnel de vento e foi constatado, uma geração de aproximadamente 0,1 mW de energia elétrica não-retificada a uma velocidade de 1,192 m/s. Além disso, foi calculada a eficiência aeroeletromecânica à ressonância, e constatou-se um valor de 0,72%, enquanto a potência por volume do dispositivo foi de 23,6 mW/m³ e a potência por volume piezelétrico foi 233 W/m³. As medidas de deformação foram obtidas durante os testes e foram utilizadas para prever a saída de tensão empregando um modelo de parâmetro distribuído. O efeito de ligação não-rígida na transferência de tensão também foi investigado. Enquanto a suposição de um modelo de ligação gerou uma superestimativa na energia medido (>60%), um modelo de ligação não-rígida deu um melhor resultado (AKAYDIN, ELVIN e ANDREOPOULOS, 2012)

Além disso, para caracterizar a geração de energia, Akaydin, *et al* (2012) realizaram testes de vibração livre e testes de túnel de vento. A tensão desenvolvida perto da base no calço foi medida para prever a saída de tensão piezelétrica usando um modelo de parâmetro distribuído. Os autores observaram que considerando uma ligação rígida entre os elementos piezelétricos e a estrutura de suporte pode superestimar significativamente a tensão transferida da estrutura para os elementos piezelétricos. Nesse sentido, a fim de considerar efeitos de ligação não rígida, um modelo de transferência de deformação foi incorporado ao modelo de parâmetros distribuídos. Os autores constataram que isto levou a uma melhoria significativa nas previsões de tensão elétrica e potência.

Nessa perspectiva, foi empregado um modelo de um grau de liberdade sobre uma grande variedade de resistências, usando a variação do primeiro módulo de frequência de ressonância e coeficiente de amortecimento. Além disso, as medidas de deformação por si só podem ser usadas para prever a tensão de uma colheitadeira sem usar materiais piezelétricos no caso de um acoplamento eletromecânico fraco.

Os testes de túnel de vento em várias velocidades de fluxo mostraram que um máximo de 0,1 mW de potência elétrica não retificada foi atingido a uma velocidade de fluxo de cerca de 1,192 m/s. Nesta velocidade, a frequência e a amplitude da vibração eram 3,14 Hz e ± 14

milímetros. A magnitude e a frequência da força de elevação foram significativamente diferentes do que seria antecipado usando uma suposição estacionária cilindro

Além disso, a frequência de forçamento nesta velocidade era ligeiramente mais elevada do que a frequência da ressonância estrutural. Assim, pode-se concluir que as interações aeroelásticas desempenham um papel significativo nas colheitadeiras de energia fluídico e que esse acoplamento é crítico na modelagem futura. A fixação de um corpo de indução de vibração à ponta do feixe de colheitadeira resultou em um tremendo aumento na eficiência aeroelástica da colhedora. A velocidade de fluxo necessária para a potência máxima também é muito reduzida, o que é desejável para detecção em fluxos de baixa velocidade, como aqueles em sistemas de HVAC.

O aproveitamento do efeito das vibrações induzidas por vórtices em estruturas como um cabo tracionado ou um cilindro rígido na geração de energia foi estudado por Grouthier *et al* (2012). Foram analisadas as eficiências (η) obtidas a determinadas velocidades de escoamento (U) em um cilindro rígido, um cabo sob tração constante e um cabo com tração induzida por arrasto. A Figura 2.5 apresenta os resultados obtidos pelo estudo. Nota-se que o cilindro rígido (linha preta sólida e vermelha tracejada) apresentou a maior eficiência na região de sincronização, porém com uma largura de pico pequena. O cabo sob tração constante (linha preta traço-ponto) apresentou valores de eficiência que dependiam muito da velocidade de escoamento, com pico de eficiência menor que o do cilindro rígido e, em determinadas velocidades, a eficiência era nula. No cabo tracionado por arrasto (linha sólida azul), o pico de eficiência, embora menor que o do cilindro rígido, possui uma largura da região muito maior. Esse resultado mostra que, aparentemente, o cabo tracionado por arrasto é a melhor solução já que a eficiência foi mantida elevada para uma faixa grande de velocidades.

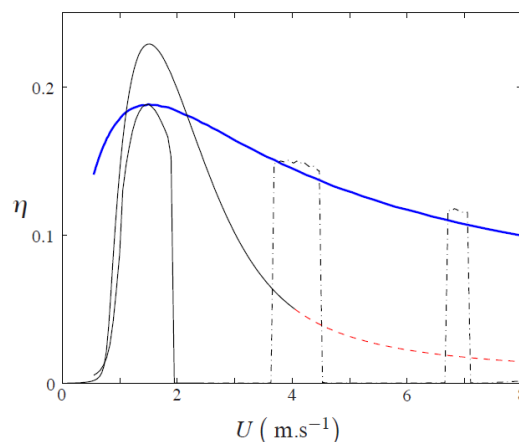


Figura 2.5: Aumento da eficiência η com a velocidade de escoamento. Cilindro rígido (linha preta + vermelha tracejada); Cabo com tração constante (linha preta traço-ponto); Cabo com tração induzida por arrasto (linha azul). (Grouthier *et al*, 2012)

Na Tabela 2.1, é apresentado os valores obtidos da largura de pico para os três casos estudados mostrando que a largura de pico na última configuração é, pelo menos, 3,38 vezes maior do que as outras.

Tabela 2.1: Largura do pico ao logo da velocidade ótima de escoamento $w = \Delta U/\bar{U}$.

Configuração	Largura do pico w
Cilindro rígido	0,73
Cabo – tração constante	0,54
Cabo – tração induzida por arrasto	2,47

Fonte: Grouthier *et al* (2012)

Neste trabalho, pretende-se estudar as interações fluido-estrutura de diferentes corpos rombudos sujeitos ao galope com um grau de liberdade e acoplados a um gerador piezelétrico. Será adotado um modelo matemático, proposto por Abdelkefi *et al* (2013), que acopla as equações do movimento dos materiais piezelétricos às das oscilações galopantes e será solucionado numericamente. Também, serão realizadas parametrizações a fim de otimizar a colheita de energia do material piezelétrico e poder contextualizar a aplicação desse modelo em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O FENÔMENO DA PIEZOELETRICIDADE

A piezeletricidade é o fenômeno de utilizar cristais para converter energia mecânica em energia elétrica, ou vice-versa. Os piezelétricos são uma classe de materiais dielétricos que podem ser polarizados ao serem submetidos a esforços mecânicos ou na presença de um campo elétrico.

Na Figura 3.1 é mostrado um modelo simplificado de uma molécula de cristal piezelétrico. Nele, os centros das cargas negativas e positivas coincidem, o que torna a molécula eletricamente neutra, Figura 3.1(a). Ao submeter a molécula a carregamentos externos, a molécula sofre uma deformação o que provoca um deslocamento dos centros das cargas positivas e negativas, gerando dipolo, conforme a Figura 3.1(b). Conforme mostrado na Figura 3.1(c), os polos opostos de cada molécula se cancelam no cristal piezelétrico e cargas fixas surgem na superfície. O material é então polarizado e este efeito é chamado de efeito piezelétrico direto.

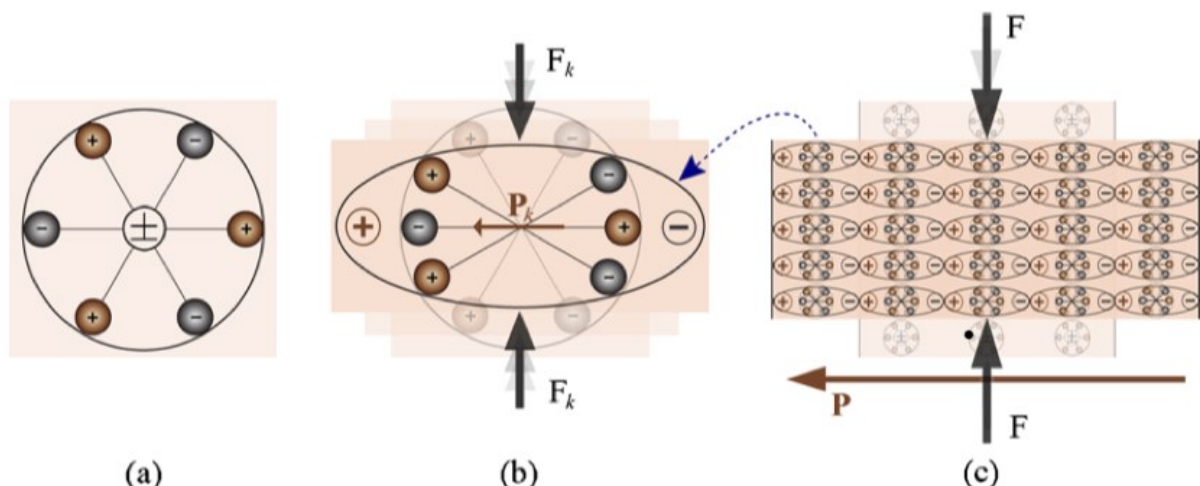


Figura 3.1: Modelo molecular de exemplificação do efeito piezelétrico. (a) Molécula eletricamente neutra, cargas elétricas com centros coincidentes; (b) Polarização P_k resultante da força aplicada F_k . (c) Efeito da polarização na superfície do cristal piezelétrico. (Dahiya *et al*, 2013)

Existe a possibilidade de se obter, de alguns tipos de cristais, o efeito piezelétrico reverso, em que uma deformação ocorre quando o material está sujeito a um campo elétrico. Assim, é possível transformar energia elétrica em energia mecânica. Este efeito tem fundamental importância em dispositivos nanoposicionadores, por exemplo.

É importante notar que cessado o esforço mecânico ou a tensão elétrica aplicada num circuito, a polarização no cristal piezelétrico é desfeita. Portanto, o material volta ao seu estado original.

Os materiais piezelétricos são naturalmente anisotrópicos, portanto, apresentam propriedades elétricas, mecânicas e eletromecânicas diferentes ao longo de diferentes direções. Assim, após a seleção do material piezelétrico para determinada aplicação, é necessário identificar os eixos mecânicos e elétricos de operação e, sistematicamente, tabular as propriedades em cada direção. Usualmente, esses eixos são numerados e são escolhidos durante o “*poling*”, processo que induz as propriedades piezelétricas no material piezelétrico. O eixo de “*poling*” determina as orientações dos eixos mecânicos e elétricos. Esse processo altera de forma permanente as dimensões do cristal piezelétrico, conforme mostrado na Figura 3.2(b). Em alguns materiais, é necessário o “*poling*” para se obter o efeito piezelétrico.

Completado o processo de “*poling*”, a aplicação de uma tensão elétrica provoca alterações nas dimensões do cristal piezelétrico enquanto essa é mantida. Uma tensão elétrica com a mesma polaridade da tensão elétrica de “*poling*” provoca um alongamento adicional ao longo do eixo de “*poling*”, o efeito inverso também ocorre quando a tensão elétrica possui polaridade invertida, conforme mostrado na Figura 3.2 (c) e (d), respectivamente. Também é possível notar o comportamento do cristal piezelétrico através das curvas P-E e S-E da Figura 3.2(a). Ao se aplicar um campo E de “*poling*” através do material, tanto a polarização quanto a deformação mecânica seguem o caminho (i)-(ii) em ambas as curvas. Após removido o campo E , o caminho (ii)-(iii) é seguido e nota-se que o material piezelétrico retém uma certa polarização e sofre uma deformação permanente. A partir disso, o ponto de início muda de (i) para (iii). Então, quando uma tensão elétrica de mesma polaridade do “*poling*” for aplicada, as curvas P-E e S-E seguirão o caminho (iii)-(ii). Com a aplicação de uma tensão elétrica de polaridade oposta, as curvas P-E e S-E seguirão o caminho (iii)-(iv), resultando em uma deformação negativa.

Se uma carga compressiva ou trativa for aplicada ao material após o “*poling*”, será gerada uma tensão elétrica, conforme mostrado na Figura 3.2 (e) e (f).

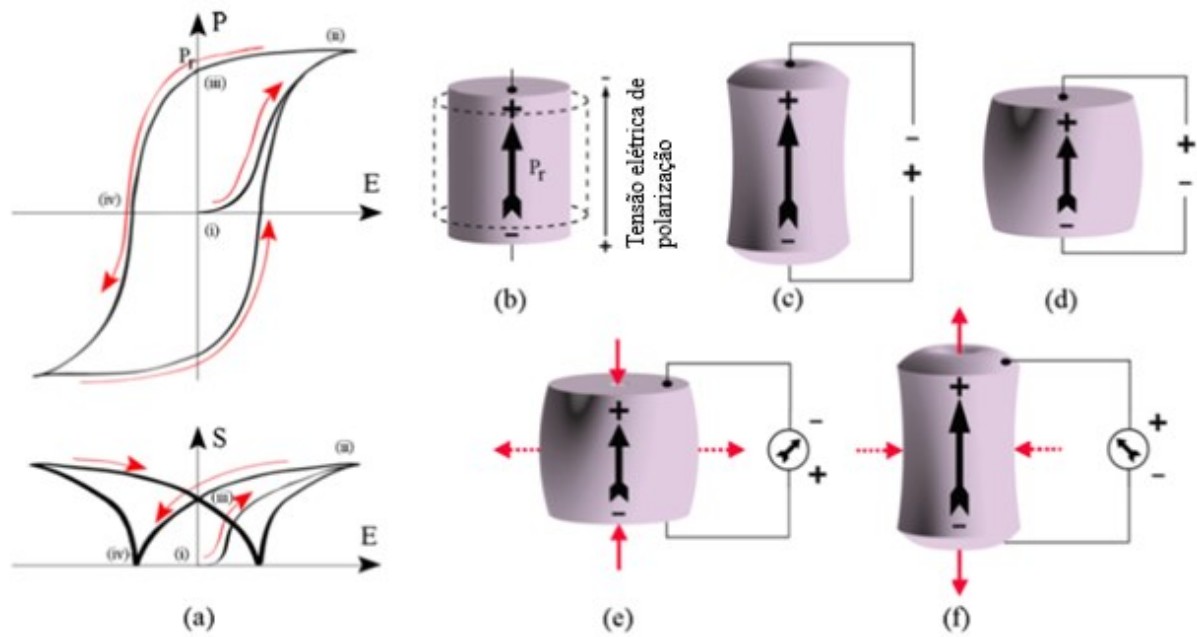


Figura 3.2: (a) Gráfico de histerese Polarização x Campo elétrico, P-E (acima) e gráfico de Deformação x Campo elétrico, S-E (embaixo); (b) material piezelétrico antes (linha tracejada) e após o “*poling*”; (c) deformação decorrente da aplicação de tensão elétrica de mesma polaridade do “*poling*”; (d) deformação decorrente da tensão elétrica de polaridade invertida; (e) geração de tensão elétrica com polaridade similar ao do “*poling*” devido aplicação de carga compressiva; (f) geração de tensão elétrica com polaridade inversa em relação ao “*poling*” devido aplicação de carga trativa no cristal. (adaptado de Dahiya *et al*, 2013)

3.1.1 Equações Constitutivas do Material Piezelétrico

Para descrever o comportamento tridimensional dos materiais piezelétricos, consideramos S_i como a deformação, T_i e T_j representam as tensões mecânicas, D_m denota o deslocamento elétrico e E_k e E_m denotam os campos elétricos aplicados. s_{ij}^E é o inverso do tensor elástico sob campo elétrico nulo ou constante, d_{mi} é o coeficiente de deformação piezelétrica e ε_{mk}^T é a permissividade elétrica sob tensão nula ou constante. Os subscritos “*i*”, “*j*”, “*k*” e “*m*” são as direções. Assim, as equações constitutivas são dadas por

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (3.1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (3.2)$$

em que a Equação (3.1) está associada ao efeito reverso e a Equação (3.2), ao efeito direto.

Normalmente, as direções no material piezelétrico são identificadas com números de 1 a 6, conforme Figura 3.3.

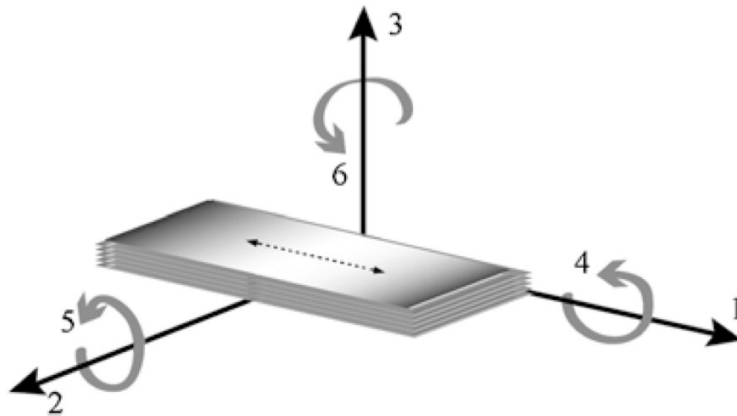
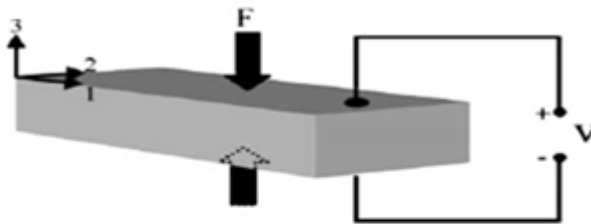


Figura 3.3: Direções do tensor para definição das relações constitutivas. (Dahiya *et al*, 2013)

A capacidade do material piezoelétrico transformar energia mecânica em energia elétrica depende do modo de acoplamento piezoelétrico utilizado no sistema de colheita de energia. Dois modos práticos de acoplamento piezoelétrico são mostrados na Figura 3.4. No modo d_{33} , a força é aplicada perpendicularmente à direção de polarização e no modo d_{31} , a força é aplicada paralela à direção de polarização. O modo d_{33} possui um coeficiente de acoplamento maior do que o modo d_{31} . (RAFIQUE, 2018)

(a) Modo d_{33}



(b) Modo d_{31}

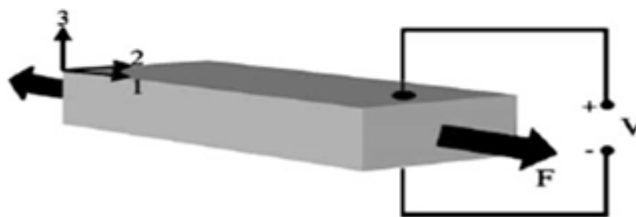


Figura 3.4: Dois modos de acoplamento piezoelétrico. (a) Modo d_{33} . (b) Modo d_{31} (adaptado de Rafique, 2018)

3.1.2 Colheita de Energia através de Materiais Piezoelétricos

Uma forma de se aproveitar o efeito direto dos materiais piezoelétricos é através de um sistema de colheita de energia que converte a energia mecânica das vibrações (fonte de deformações no piezoelétrico) em energia elétrica. A Figura 3.5 mostra um diagrama esquemático desse tipo de sistema.

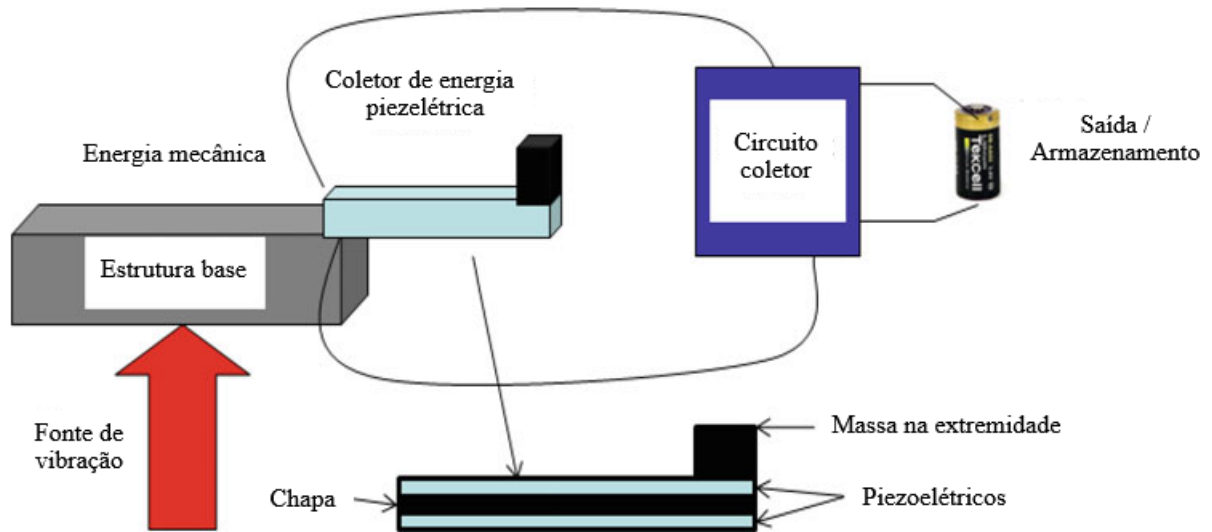


Figura 3.5: Diagrama esquemático de um sistema de colheita de energia através de materiais piezelétricos (adaptado de Rafique, 2018)

Geralmente, o sistema de colheita de energia através de materiais piezelétricos é composto por uma viga engastada de material não-piezelétrico, responsável pela rigidez e resistência do *cantilever*, com uma ou mais camadas piezelétricas. Esses componentes são fixados em uma estrutura base que é a fonte de vibração e provocará deformações dinâmicas nas camadas piezelétricas em que serão geradas tensões elétricas alternadas através de eletrodos.

3.1.3 Equação do Movimento de um Coletor de Energia através de Materiais Piezelétricos

Um modelo típico para descrever um sistema de colheita de energia baseado em vibrações consiste em um sistema mecânico conectado a um circuito elétrico por um elemento piezelétrico, que é responsável pela conversão eletromecânica, conforme mostrado na Figura 3.6. Um oscilador massa-mola-amortecedor com massa m , rigidez k , e coeficiente de amortecimento viscoso b , representa o sistema mecânico. O sistema está sujeito a uma excitação de base $u = u(t)$, o deslocamento da massa é representado por y , e z é o deslocamento da massa em relação à base. Uma resistência elétrica R e capacitância C_p representa o circuito elétrico. V denota a tensão elétrica através do material piezelétrico. O acoplamento eletromecânico proveniente do elemento piezelétrico é representado por θ . (CELLULAR, SAVI e SILVA, 2016)

Os símbolos $(\dot{\quad})$ e $(\ddot{\quad})$ denotam a primeira e segunda derivadas temporais, respectivamente.

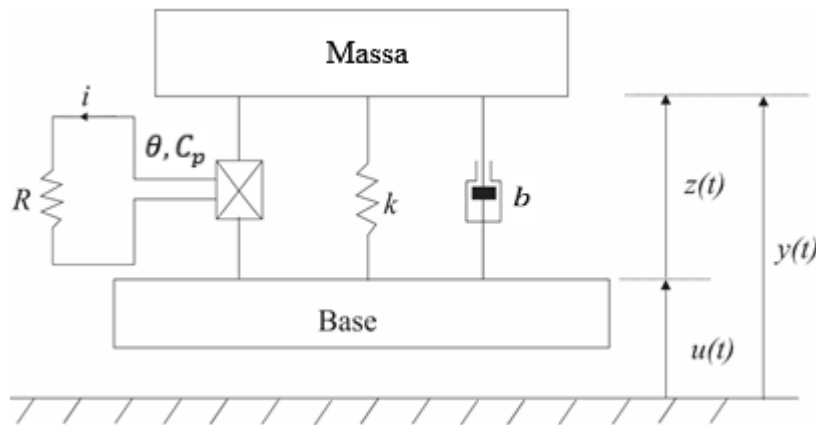


Figura 3.6: Modelo típico de um sistema de colheita de energia baseado em vibrações (adaptado de Cellular, Savi e Silva, 2016)

Assim, o sistema dinâmico pode ser descrito pelas seguintes equações diferenciais de movimento

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz - \theta V = -m\ddot{u} \quad (3.3)$$

$$C_p \dot{V} + \frac{1}{R} V + \theta \dot{z} = 0 \quad (3.4)$$

3.2 ESCOAMENTO EXTERNO

Os escoamentos que correm em um corpo imerso em um fluido sem fronteiras são chamados de escoamentos externos. A partir da Figura 3.7 é possível observar diversos fenômenos que ocorrem sobre um corpo no escoamento externo, neste caso um aerofólio, com alto número de Reynolds de um fluido viscoso. É possível observar que após atingir o ponto de estagnação, o escoamento se divide e surge uma camada-limite ao redor do corpo. Esta é inicialmente laminar e se torna turbulenta após atingir determinada distância do ponto de estabilização. A camada-limite turbulenta surge após o local de transição e cresce mais rápido do que a camada-limite laminar. Após passar pelos pontos de separação, o fluido forma a esteira viscosa.

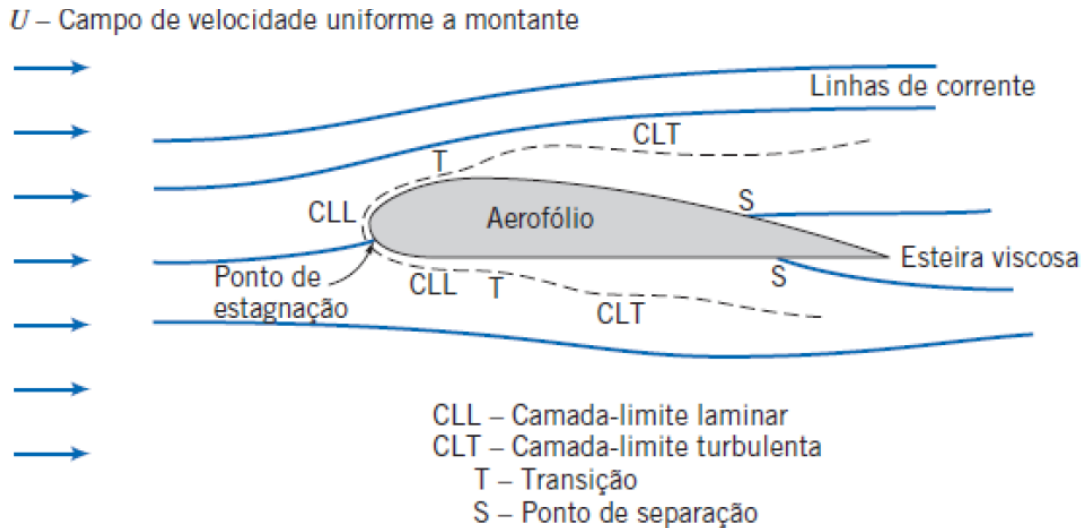


Figura 3.7: Escoamento viscoso em torno de um aerofólio. (Fox, 2014)

3.2.1 A Camada-Limite

Em 1906, Ludwig Prandtl mostrou que era possível analisar muitos escoamentos viscosos dividindo o escoamento em duas regiões, uma perto das fronteiras sólidas e a outra no restante do escoamento. Ele observou que o efeito da viscosidade somente era importante numa fina região adjacente à fronteira sólida, esta que ficou conhecida como camada-limite. Fora desta região, a viscosidade já não é mais considerável então o fluido pode ser considerado como invíscido.

Na camada-limite, as forças de inércia e as forças viscosas têm importância. Devido a isso, o número de Reynolds é utilizado para descrever o regime de escoamento na camada-limite.

O escoamento na camada-limite pode ser considerado como laminar ou turbulento e a transição entre o primeiro para o segundo ocorre em variados números de Reynolds que são afetados por: gradiente de pressão, rugosidade superficial, transferência de calor, forças de campo e perturbações da corrente livre.

A forma mais simples de se ilustrar a camada limite é com o exemplo de um escoamento externo sobre uma placa plana, conforme Figura 3.8. Nele, a velocidade U é constante fora da camada-limite e o gradiente de pressão é zero. Na figura é possível observar que a camada-limite em regime laminar ocorre no início da placa, surge uma região de transição e então o escoamento na camada-limite passa a ser turbulento.

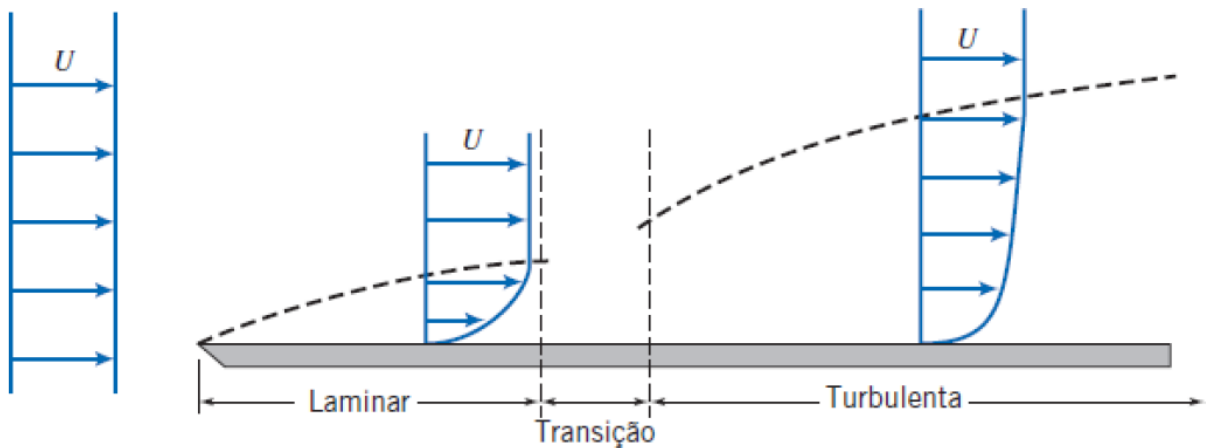


Figura 3.8: A camada-limite sobre uma placa plana. (Fox, 2014)

3.2.2 Número de Reynolds

Em 1880, Osborne Reynolds, estudou a transição entre os regimes laminar e turbulento em um tubo e descobriu o parâmetro mostrado na Equação (3.5), posteriormente chamado de número de Reynolds em sua homenagem

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu} \quad (3.5)$$

em que ρ é a massa específica do fluido, U é a velocidade do fluido, l é comprimento característico descritivo da geometria do campo de escoamento e μ é a viscosidade do fluido. O número de Reynolds é o critério que permite determinar o regime do escoamento e que, após experiências, foi mostrado que ele também pode ser aplicado para outros casos de escoamento. Valores relativos elevados desse parâmetro adimensional caracteriza um escoamento turbulento. Nos escoamentos com forças inerciais pequenas em relação às forças viscosas, esses são normalmente escoamento laminares.

3.2.3 Número de Strouhal

O número de Strouhal (St) é um importante parâmetro adimensional para os problemas transitórios que possuem oscilações. Ele indica a relação entre forças de inércia devidas à transitoriedade do escoamento (aceleração local) e as forças de inércia devidas à variação de velocidade entre pontos do campo de escoamento (aceleração convectiva) (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004). O escoamento transitório pode se desenvolver quando um fluido escoar em volta de um corpo sólido. Um escoamento periódico é desenvolvido a jusante de um cilindro sob um escoamento uniforme, a determinada faixa de número de Reynolds. Essa esteira de vórtices cria um escoamento oscilatório com uma frequência discreta.

A Equação (3.6) apresenta a formulação matemática do número de Strouhal:

$$St = \frac{f_s l}{U} \quad (3.6)$$

onde f_s é a frequência de oscilação do escoamento, l é o comprimento característico e U é a velocidade da corrente livre.

3.2.4 Arrasto

A força paralela à direção de movimento relativo que atua sobre um corpo é conhecida como arrasto. Sua forma funcional é dada por

$$F_D = f_1(d, U, \mu, \rho)$$

onde F_D é a força de arrasto.

A definição do coeficiente de arrasto (C_D) é dado pela Equação (3.7).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3.7)$$

3.2.5 Sustentação

Pode-se definir a sustentação como a força do fluido na direção perpendicular ao movimento do fluido. O coeficiente de sustentação C_L é definido como

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3.8)$$

Uma forma de explicar a sustentação aerodinâmica é pelo exemplo de um aerofólio que sofre um aumento na velocidade sobre sua superfície superior (região de baixa pressão) e redução na velocidade na superfície inferior (aumento de pressão). Esse fenômeno explica o porquê de os aviões voarem.

3.3 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES (VIV)

As Vibrações Induzidas por Vórtices (*Vortex-Induced Vibrations*, VIV) estão presentes em diversos sistemas de engenharia. Elas influenciam na dinâmica dos *risers* ao levar o óleo do fundo do mar para a superfície, pode causar vibrações nos tubos de trocadores de calor, têm importância nos projetos estruturais de pontes e pode causar vibrações de grande amplitude em estruturas amarradas no oceano, por exemplo.

Considerando as oscilações em um cilindro rígido, o aumento da velocidade de escoamento U , pode provocar uma resposta do corpo quando a frequência da esteira de vórtices

f_s fica muito próxima da frequência natural f_n do cilindro. Nessa condição, é possível alguns padrões de esteira como o modo 2S (dois vórtices por ciclo) e o modo 2P (dois pares de vórtices a cada ciclo) (WILLIAMSON e GOVARDHAN, 2004). Foi observado também, que vibrações forçadas podem levar a outros modos como o P + S, o qual não provoca uma vibração livre no corpo.

A Equação (3.9), chamada de equação do movimento, é utilizada para representar as vibrações induzidas por vórtices de um cilindro oscilando na direção transversal à direção de escoamento de um fluido

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F \quad (3.9)$$

onde m é a massa da estrutura, c é o amortecimento estrutural, k é a constante da mola e F é a força do fluido na direção normal ao escoamento.

Quando a frequência de vibração do corpo e o modo periódico da esteira de vórtices estão sincronizados é possível aproximar a força e deslocamento às Equações (3.10) e (3.11), respectivamente.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (3.10)$$

$$F(t) = y_0 \sin(\omega t) \quad (3.11)$$

Na Figura 3.9 são mostradas algumas condições de escoamento, de acordo com o número de Reynolds, sobre um cilindro circular.

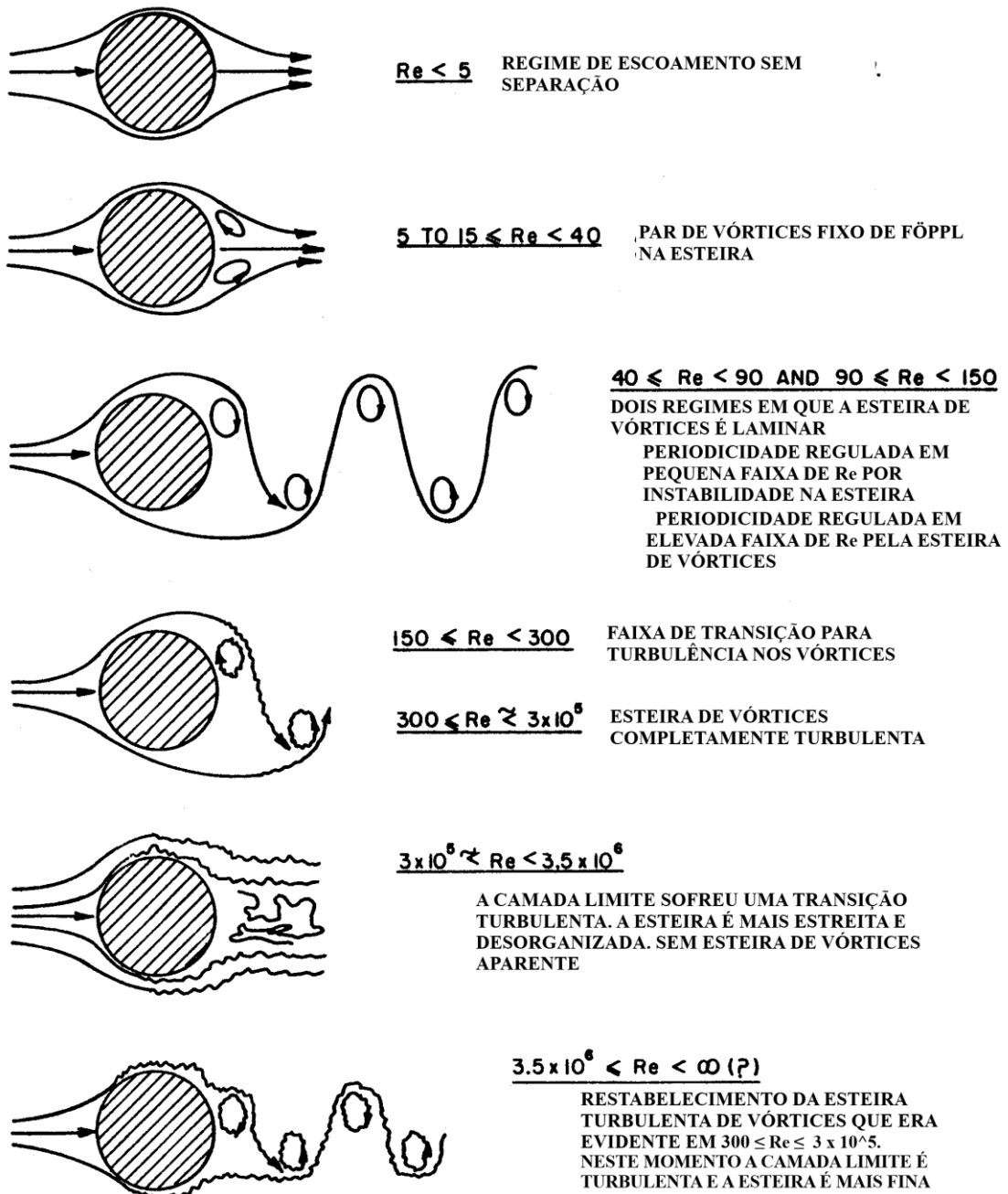


Figura 3.9: Regime de escoamento ao sobre cilindros circulares. (adaptado de Lienhard, 1966)

Na Figura 3.10 é mostrado um mapa dos modos da esteira de vórtices 2S, 2P e P + S. Em que S representa os vórtices únicos e P, os pares de vórtices. A/D é a amplitude e λ/D , o comprimento de onda da esteira de vórtices.

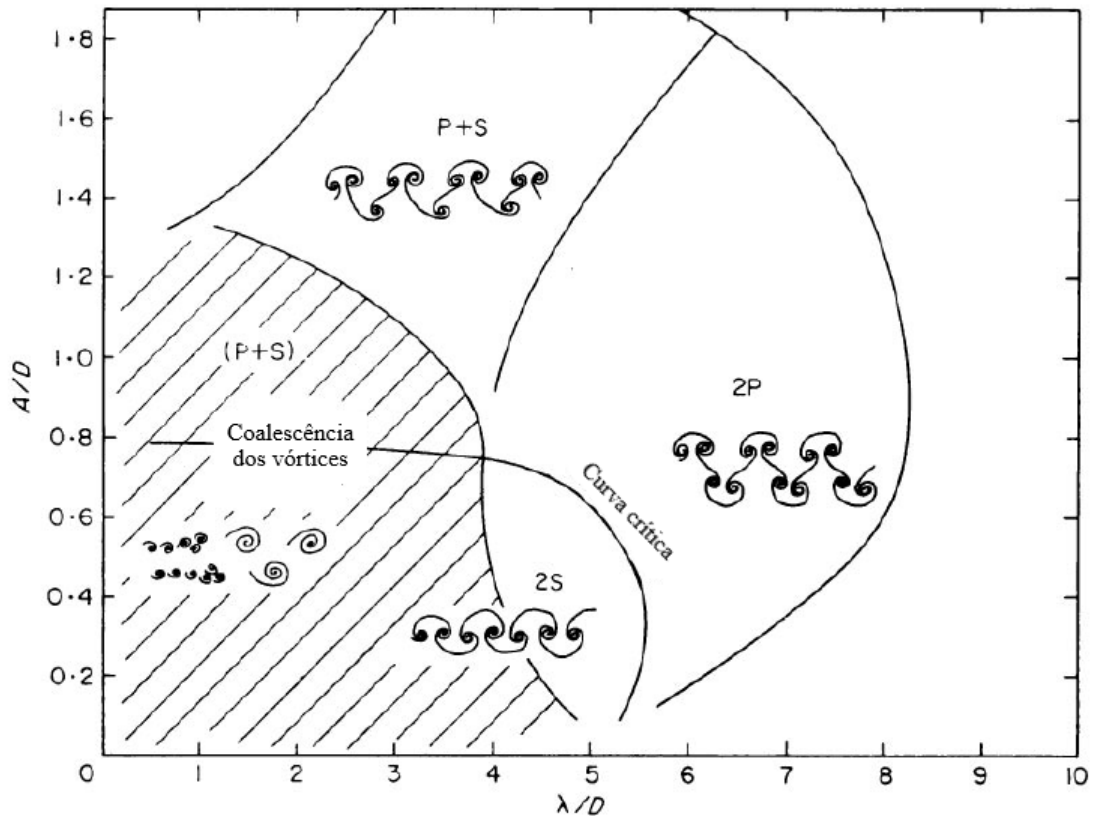


Figura 3.10: Mapa dos modos da esteira de vórtices, mostrando os modos 2S, 2P e P+S. (adaptado de Williamson e Govardhan, 2004)

3.3.1 Frequência da Esteira de Vórtices (f_s)

A frequência da esteira de vórtices, f_s , para um cilindro é dada pela Equação (3.12)

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \quad (3.12)$$

onde U é a velocidade do fluxo e D é o diâmetro do cilindro.

3.3.2 Região de *lock-in*

Quando um objeto está na região de *lock-in* (ou sincronização), sua frequência de oscilação é igual a frequência da esteira de vórtices. Nesse ponto, ocorre a maior amplitude de oscilação.

$$f^* = \frac{f_s}{f_n} \cong 1$$

Estudos recentes mostram que um corpo pode vibrar com uma elevada amplitude mesmo quando sujeito a centenas de vezes a sua frequência natural. (WILLIAMSON e GOVARDHAN, 2004).

3.3.3 Velocidade Reduzida (V_{rn})

A velocidade reduzida num cilindro é dada pela Equação (3.13)

$$V_{rn} = \frac{U}{f_n d} \quad (3.13)$$

Onde V_{rn} é a velocidade reduzida, f_n é a frequência natural de um corpo e d é o diâmetro de um cilindro.

3.4 OSCILAÇÕES GALOPANTES

Estruturas com seções transversais não-circulares experimentam uma força proveniente de um fluido que muda com a orientação do escoamento. Com a vibração da estrutura, sua orientação muda e a força do fluido oscila. Se a oscilação da força tende a aumentar a vibração, a estrutura se torna instável aerodinamicamente e vibrações de amplitudes muito grandes podem ocorrer. (BLEVINS, 2001)

Todos os corpos de seção transversal não circular são sujeitos às oscilações galopantes ou oscilações do tipo “*flutter*”. Alguns exemplos são: linhas de transmissão revestidas de gelo sofrem oscilações de galope em ventos de inverno; o mesmo fenômeno ocorre em pontes (ver fotografia da ponte Tacoma Narrows na Figura 3.11); estruturas marítimas podem oscilar em movimento de galope em correntes do oceano; asas de aviões sofrem oscilações do tipo *flutter*; pás de turbinas estão sujeitas a grandes amplitudes de vibrações devido ao *flutter*.

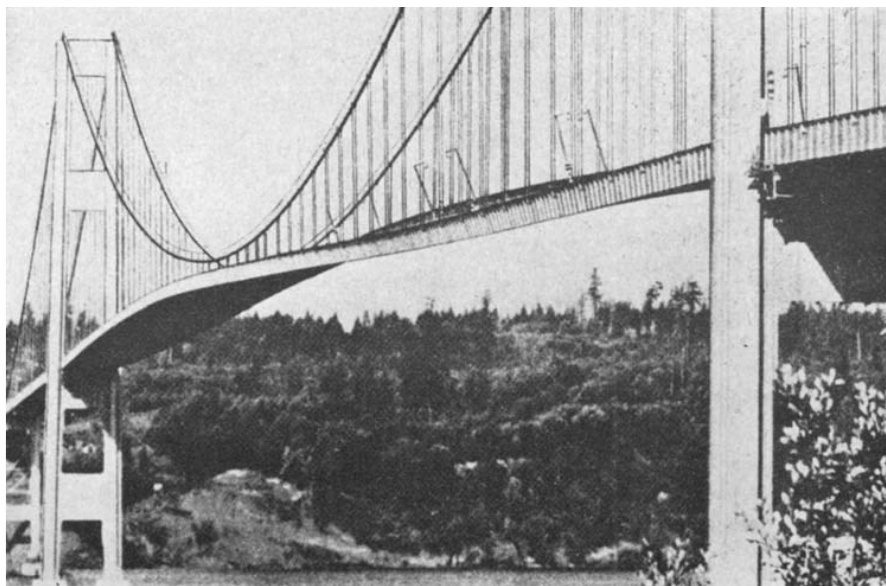


Figura 3.11: Fotografia da ponte Tacoma Narrows durante as oscilações galopantes que a levaram ao seu colapso (Païdoussis, Price e Langre, 2011).

Uma ilustração que justifica a não ocorrência de oscilações galopantes em corpos de seção transversal circular e a ocorrência do fenômeno em corpos de seção não-circular é dada pela Figura 3.12. Num fio de linha de transmissão, não revestido de gelo, sua forma é aproximadamente um cilindro circular, Figura 3.12(a), e a força devido ao escoamento não muda sua magnitude e está sempre na direção do escoamento. Assim, com o corpo em movimento, sua velocidade e a componente da força na direção do deslocamento se opõem, o que anula a possibilidade de manter a vibração devido ao escoamento. Já no exemplo de uma linha de transmissão congelada, cuja seção transversal é não-circular (ver Figura 3.12(b)), há a possibilidade da velocidade \dot{y} e da força F_y estarem na mesma direção e a energia pode ser transmitida para a estrutura.

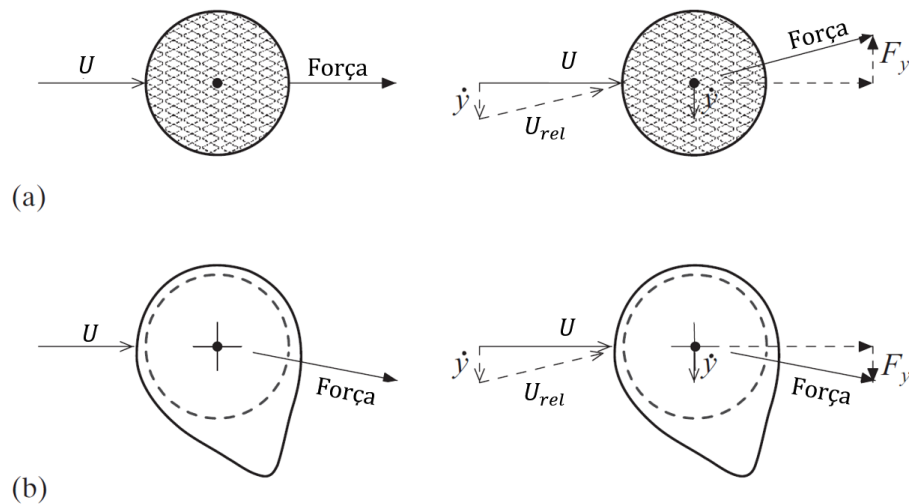


Figura 3.12: (a) Força aerodinâmica em um cilindro circular (por exemplo, fio da linha de transmissão) devido do escoamento; (b) força aerodinâmica num condutor revestido de gelo (adaptado de Païdoussis, Price e Langre, 2011)

Na maior parte das análises de oscilações galopantes é utilizada a dinâmica dos fluidos quase-estacionário, em que a força do fluido na estrutura é determinada somente pela velocidade relativa instantânea. Assim, as forças do fluido podem ser medidas num túnel de vento em modelos estacionários posicionados em diversos ângulos. A hipótese de um sistema quase-estacionário somente é válida se a frequência das componentes periódicas da força do fluido, associada à frequência da esteira de vórtices, é muito acima da frequência de vibração da estrutura ($f_s \gg f_n$). De acordo com Blevins (2001), este requisito é geralmente atendido em altas velocidades reduzidas como

$$\frac{U}{f_n D} > 20 \quad (3.14)$$

onde U é a velocidade do escoamento, f_n é a frequência natural de vibração e D é a dimensão da seção transversal do corpo normal ao escoamento livre.

3.4.1 Mecanismo das Oscilações Galopantes com um Grau de Liberdade

Um modelo massa-mola-amortecedor, com a mola de rigidez k_y por unidade de comprimento, exposto a um escoamento estacionário de velocidade U e densidade ρ é mostrado na Figura 3.13.

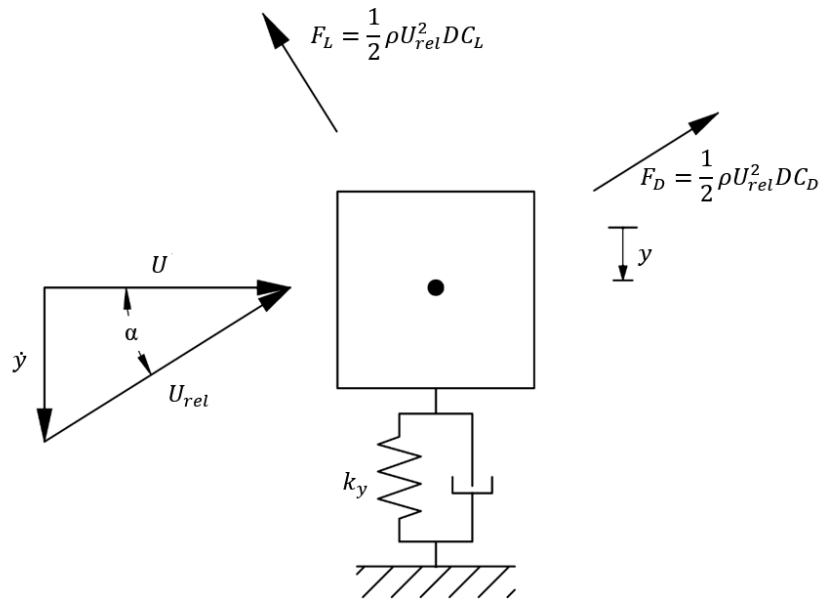


Figura 3.13: Modelo para oscilações galopantes com um grau de liberdade (adaptado de Blevins, 2001)

As forças da fluidodinâmica estacionária são a força de sustentação F_L e a força de arrasto F_D , ambas por unidade de comprimento, em que:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 D C_L \quad (3.15)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 D C_D \quad (3.16)$$

A força de sustentação é perpendicular à direção da velocidade média de escoamento e a força de arrasto tem direção paralela à velocidade média de escoamento. A largura D é a dimensão usada como referência para adimensionalizar os coeficientes aerodinâmicos C_L e C_D .

A estabilidade do modelo é analisada considerando a hipótese de um modelo quase-estacionário para a força aerodinâmica e examinando sua resposta em pequenas perturbações da posição de equilíbrio. Para um deslocamento para baixo do modelo, o ângulo de ataque α é dado por

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y}}{U} \right) \quad (3.17)$$

em que $\alpha = 0^\circ$ é associado à posição de equilíbrio $y = 0$. O deslocamento para baixo na direção do eixo y é considerado positivo.

Uma força no plano vertical F_y é um vetor resultante das forças de sustentação e de arrasto, sendo positiva para baixo, dada pela equação

$$F_y = -F_L \cos \alpha - F_D \sin \alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_y \quad (3.18)$$

de onde o coeficiente da força vertical C_y pode ser dado por

$$C_y = -(C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (3.19)$$

em C_y é uma função da forma, do ângulo de ataque e do número de Reynolds. Para um ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$, o coeficiente da força vertical é dado pelo negativo do coeficiente de sustentação ($C_y = -C_L$).

A equação de movimento para o modelo massa-mola-amortecedor da Figura 3.13 em resposta a força aerodinâmica é

$$m\ddot{y} + 2m\tilde{\xi}_y\omega_y\dot{y} + k_y y = F_y = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_y \quad (3.20)$$

em que m é a massa por unidade de comprimento e o fator de amortecimento devido à dissipação na estrutura é $\tilde{\xi}_y$.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Na continuidade deste trabalho, serão realizados estudos de corpos rombudos com seções transversais em D, quadrado e triângulo isósceles com $\delta = 30^\circ$ sujeitos às oscilações galopantes com um grau de liberdade (GDL). Para efetuar as análises, um modelo matemático que acopla o sistema eletromecânico e representa a interação elétrico-fluido-estrutura, será adotado e solucionado através de integração numérica. Inicialmente será realizada uma validação do método de solução numérica através da comparação com a literatura e depois os estudos dessas geometrias serão aprofundados.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM COLETOR DE ENERGIA ATRAVÉS DE MATERIAIS PIEZELÉTRICOS SUJEITOS ÀS OSCILAÇÕES GALOPANTES COM 1 GDL

O modelo matemático adotado no presente trabalho foi proposto por Abdelkefi *et al* (2013), em que o coletor de energia é composto de uma estrutura prismática sujeita às oscilações galopantes transversais à direção de escoamento do fluido, conforme mostrado na Figura 4.1.

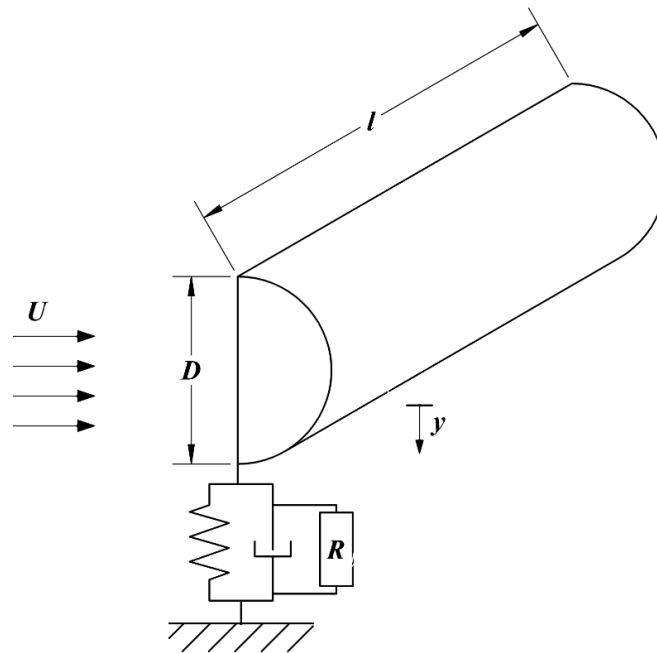


Figura 4.1: Modelo de estrutura elástica coletora de energia através de materiais piezelétricos com um grau de liberdade (adaptado de Abdelkefi *et al*, 2013)

As equações de governo do sistema acoplado eletromecanicamente, considerando o transdutor piezelétrico e a carga resistiva do circuito elétrico, são:

$$m(\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2y) - \frac{\theta}{l}V = F_y = \frac{1}{2}\rho U^2 DC_y \quad (4.1)$$

$$C_p\dot{V} + \frac{V}{R} + \theta\dot{y} = 0 \quad (4.2)$$

onde y é o deslocamento da estrutura, m é a massa total por unidade de comprimento, D é a dimensão característica do prisma normal à direção de escoamento, U é a velocidade do escoamento, ρ é a densidade do fluido, ω_n é frequência natural, ξ é a razão de amortecimento mecânico, l é o comprimento da estrutura, θ é o coeficiente de acoplamento eletromecânico, V é a tensão elétrica coletada, R é a carga resistiva, C_p é a capacitância da camada piezelétrica, F_y é a força aerodinâmica por unidade de comprimento e C_y é o coeficiente da força aerodinâmica na direção normal ao escoamento. Os símbolos $(\dot{\quad})$ e $(\ddot{\quad})$ se referem a primeira e segunda derivadas temporais, respectivamente.

O modelo é aplicado para oscilações forçadas de 1 GDL em que o forçamento é dado pela força aerodinâmica na direção do eixo y e o termo $-\frac{\theta}{l}V$ acopla eletromecanicamente as equações (4.1) e (4.2).

Adotando-se a hipótese de um escoamento quase-estacionário, é feito uma avaliação dos carregamentos aerodinâmicos. O coeficiente aerodinâmico C_y está associado aos coeficientes de sustentação C_L e de arrasto C_D conforme a relação

$$C_y = -[C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)] \quad (4.3)$$

em que $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{y}}{U}\right)$ é o ângulo de ataque, conforme Figura 4.2.

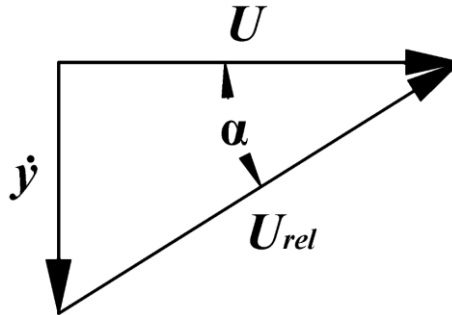


Figura 4.2: Relação entre o ângulo de ataque α , velocidade na direção do eixo y , velocidade do escoamento U e a velocidade de escoamento relativa U_{rel} . (adaptado de Blevins, 2001)

Mostrado por Barrero-Gil *et al* (2010) e aplicado por Abdelkefi *et al* (2013), a força aerodinâmica F_y , para corpos de seções transversais simétricos em relação a uma linha na mesma direção do escoamento, pode ser aproximada pela função polinomial cúbica

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U^2 D \left[a_1 \frac{\dot{y}}{U} + a_3 \left(\frac{\dot{y}}{U} \right)^3 \right] \quad (4.4)$$

para casos em que o número de Reynolds é relativamente alto. Os termos a_1 e a_3 são coeficientes empíricos obtidos de uma curva de C_y em função de $\frac{\dot{y}}{U}$.

Para que o galope ocorra, é necessário que $a_1 > 0$. O coeficiente a_3 está relacionado à dependência não-linear de C_y com α e seu valor é negativo. Ambos os coeficientes a_1 e a_3 mostram dependências com diversos fatores, como: geometria da seção transversal, razão de aspecto do corpo rombudo l/D e características do escoamento incidente. (BARRERO-GIL, ALONSO e SANZ-ANDRES, 2010)

Por fim, a potência elétrica instantânea (P) gerada no sistema de colheita de energia pode ser avaliada através da seguinte relação $P = V^2/R$.

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Para validar os estudos realizados no presente trabalho, tentou-se obter resultados similares aos encontrados por Abdelkefi *et al* (2013) em que, neste trabalho, as equações (4.1) e (4.2) foram solucionadas numericamente através do método de Runge-Kutta de 4ª Ordem com o código escrito em FORTRAN. As geometrias comparadas e que serão abordadas ao longo do trabalho são mostradas na Figura 4.3.

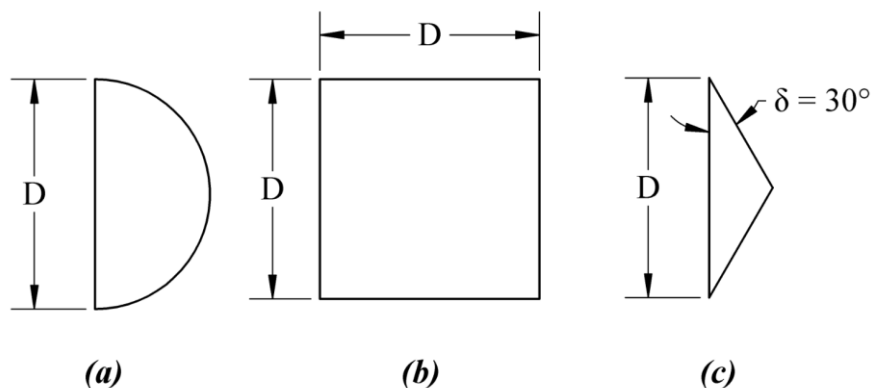


Figura 4.3: Geometrias dos corpos rombudos estudados no presente trabalho. (a) Seção D; (b) Quadrado; (c) Triângulo isósceles com $\delta = 30^\circ$ (Fonte própria)

Na Tabela 4.1 são dados os valores dos parâmetros para as respectivas seções transversais que são comparadas com os resultados obtidos no artigo de referência.

Tabela 4.1: Valores dos parâmetros adotados na solução numérica para comparação com Abdelkefi *et al* (2013).

Parâmetro \ Seção	Seção D	Quadrado	Triângulo Isósceles ($\delta = 30^\circ$)
a_1	0,79	2,3	2,9
a_3	-0,19	-18	-6,2
C_p [F]	120×10^{-9}	120×10^{-9}	120×10^{-9}
D [m]	0,015	0,015	0,015
l [m]	1,00	1,00	1,00
m [kg]	0,44	0,44	0,44
θ [N/V]	$1,55 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^{-3}$
ξ	0,0013	0,0013	0,0013
ρ [kg/m ³]	1,184	1,184	1,184
f_n [Hz]	10	10	10

Fonte própria

Da Figura 4.4 até a Figura 4.13 são apresentadas as curvas obtidas para o deslocamento máximo $y_{m\acute{a}x}$, potência máxima por unidade de comprimento $P_{m\acute{a}x}$ em função da velocidade do escoamento U e da resistência elétrica do circuito R para as geometrias: seção D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). As curvas de referência, em linha contínua, foram digitalizadas com o software OriginPro e sobrepostas com os resultados da solução numérica deste trabalho, em linha tracejada.

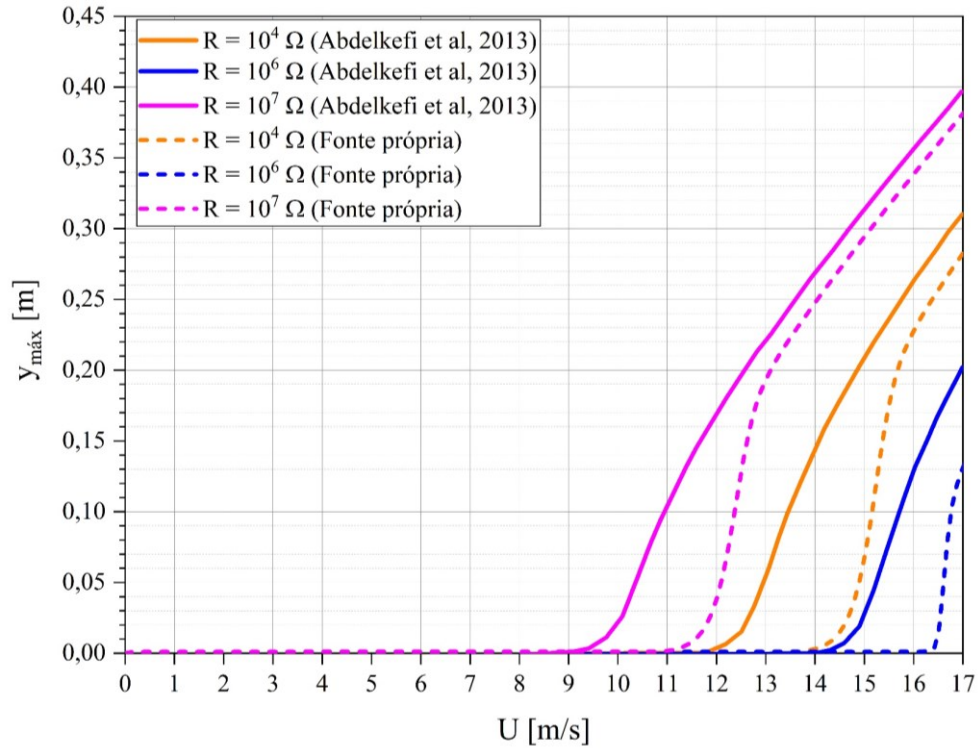


Figura 4.4: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção D em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013); Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

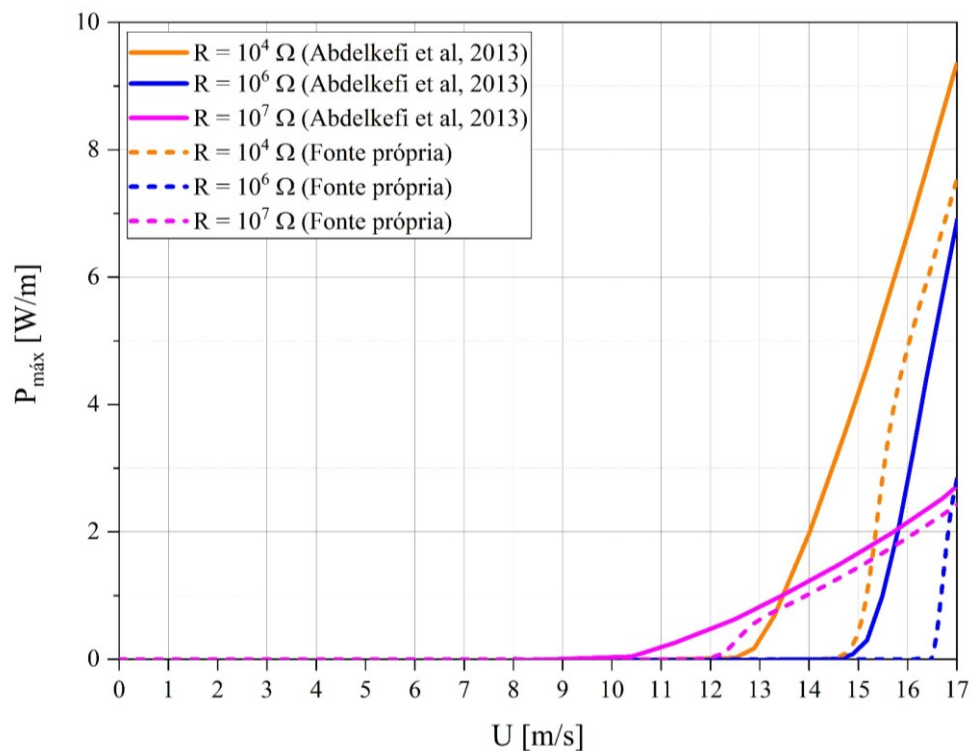


Figura 4.5: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção D em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

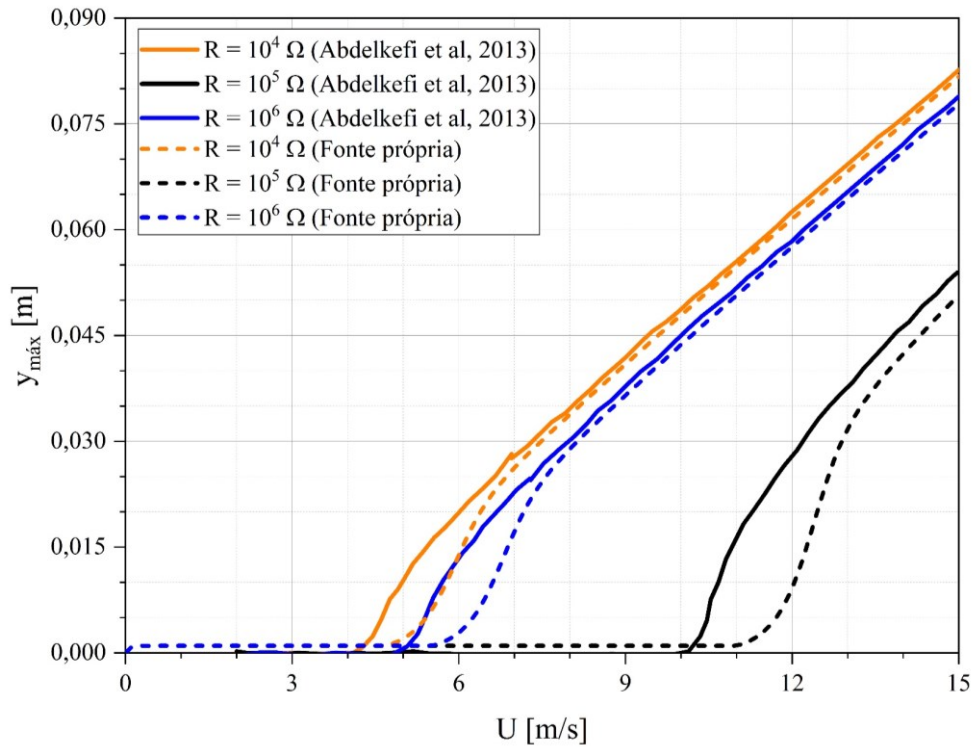


Figura 4.6: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção quadrada em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

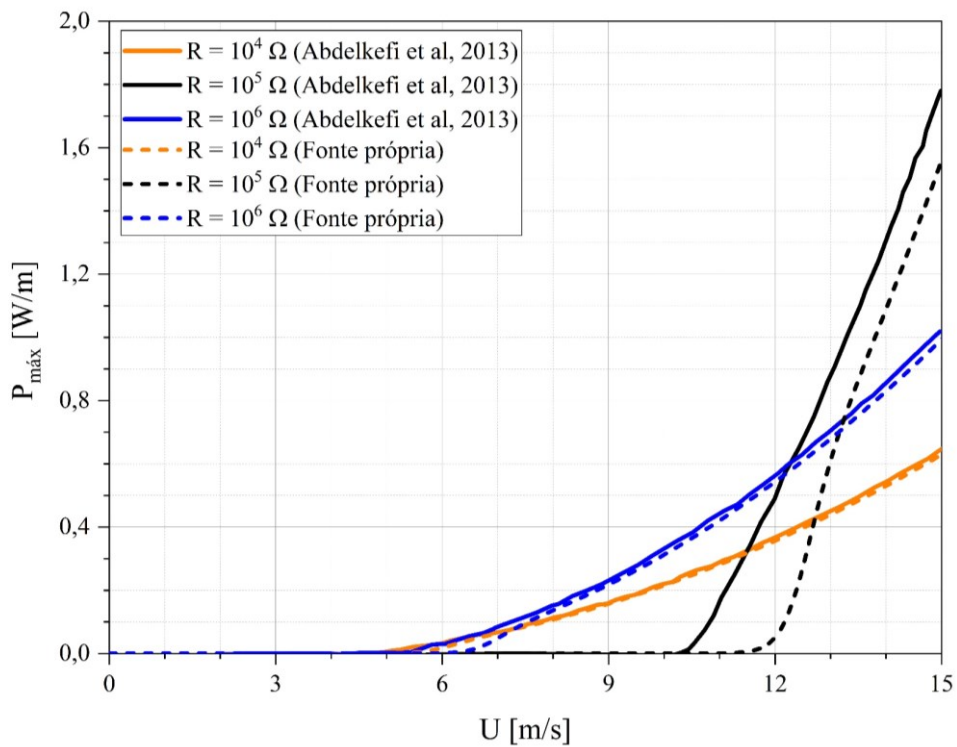


Figura 4.7: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção quadrada em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

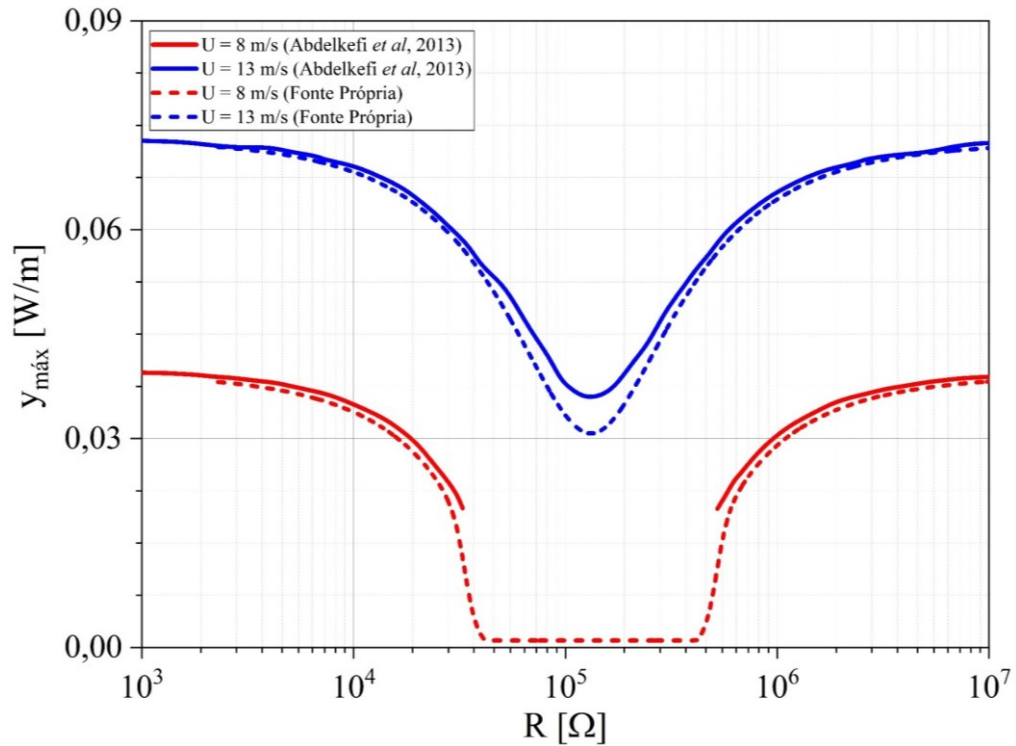


Figura 4.8: Comparação dos deslocamentos máximos em função da resistência elétrica para a seção quadrada em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

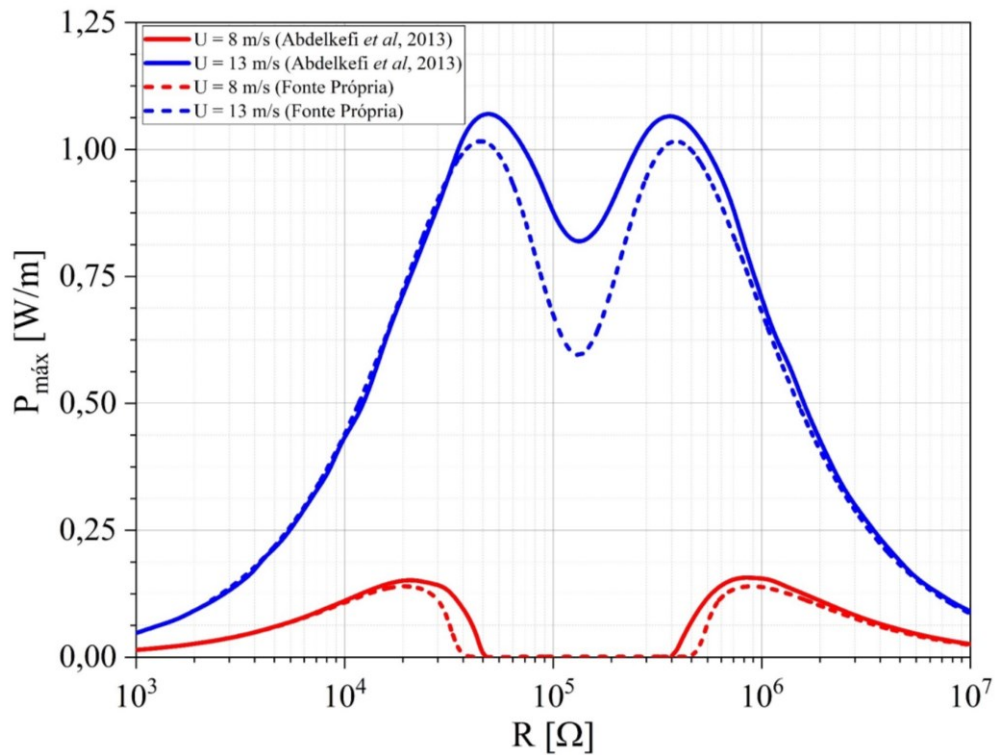


Figura 4.9: Comparação da potência máxima em função da resistência elétrica para a seção quadrada em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

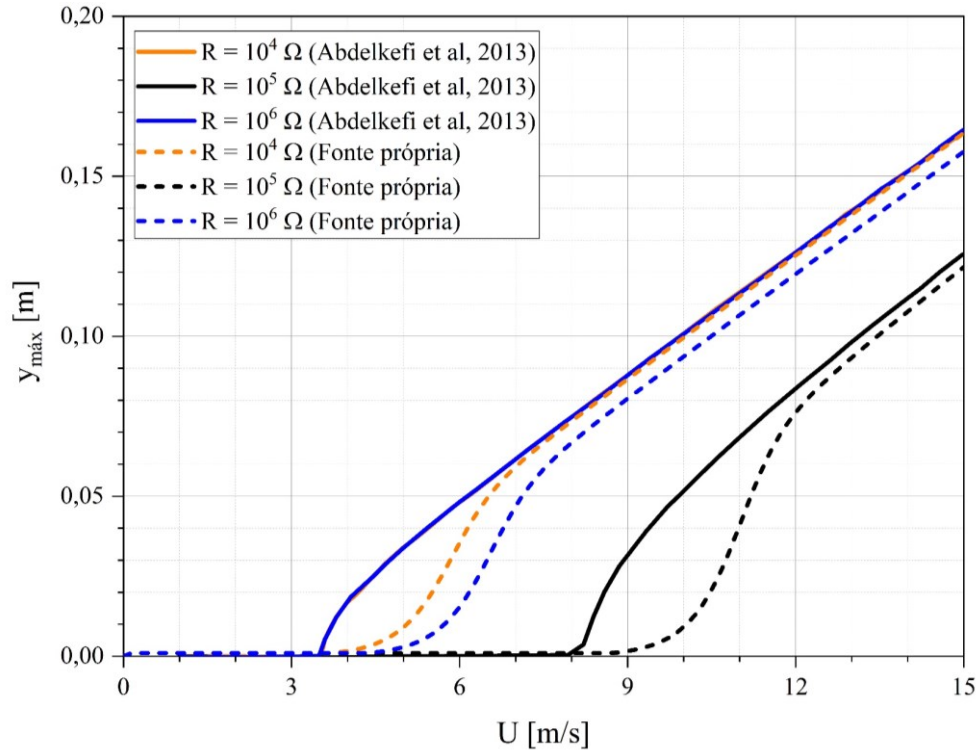


Figura 4.10: Comparação dos deslocamentos máximos em função da velocidade do escoamento para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

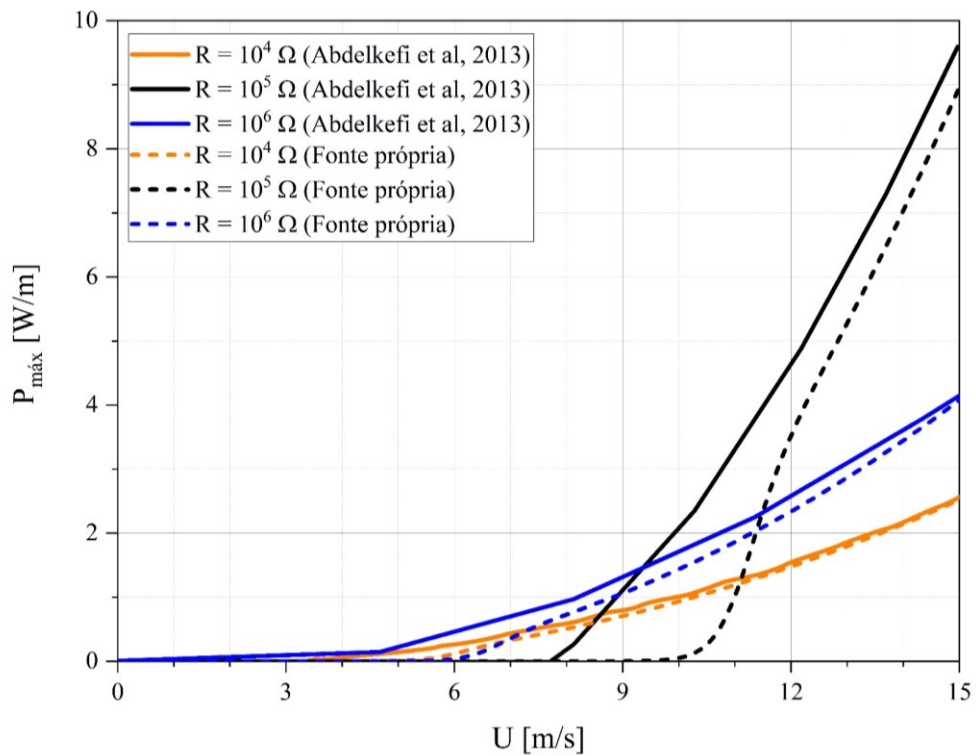


Figura 4.11: Comparação da potência máxima em função da velocidade do escoamento para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de R . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

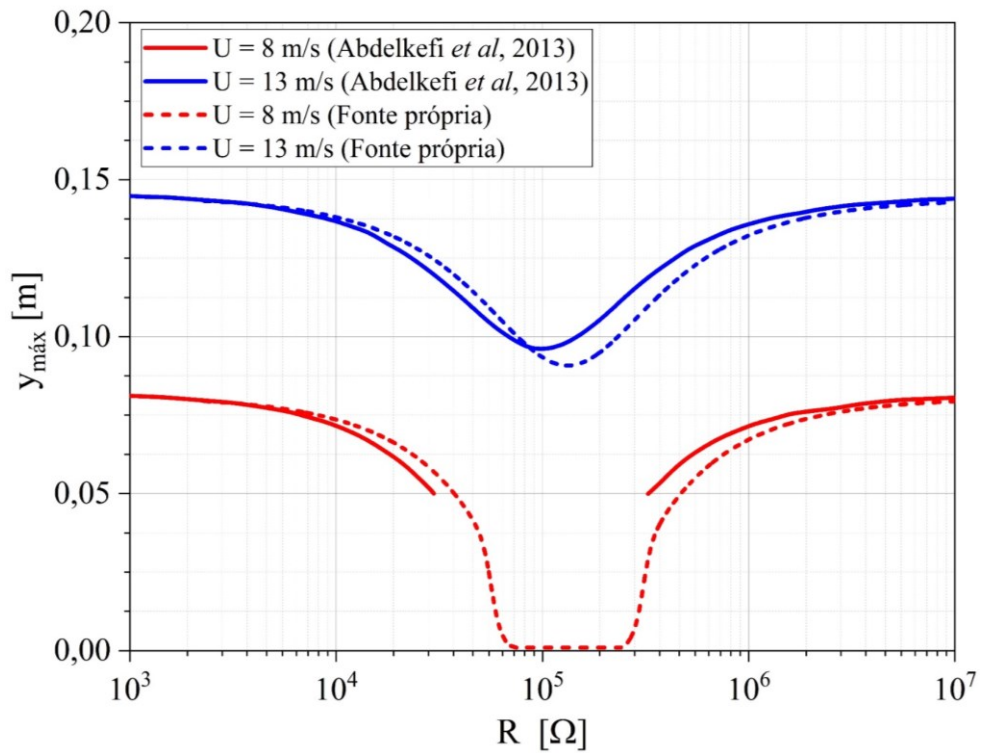


Figura 4.12: Comparação dos deslocamentos máximos em função da resistência elétrica para seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

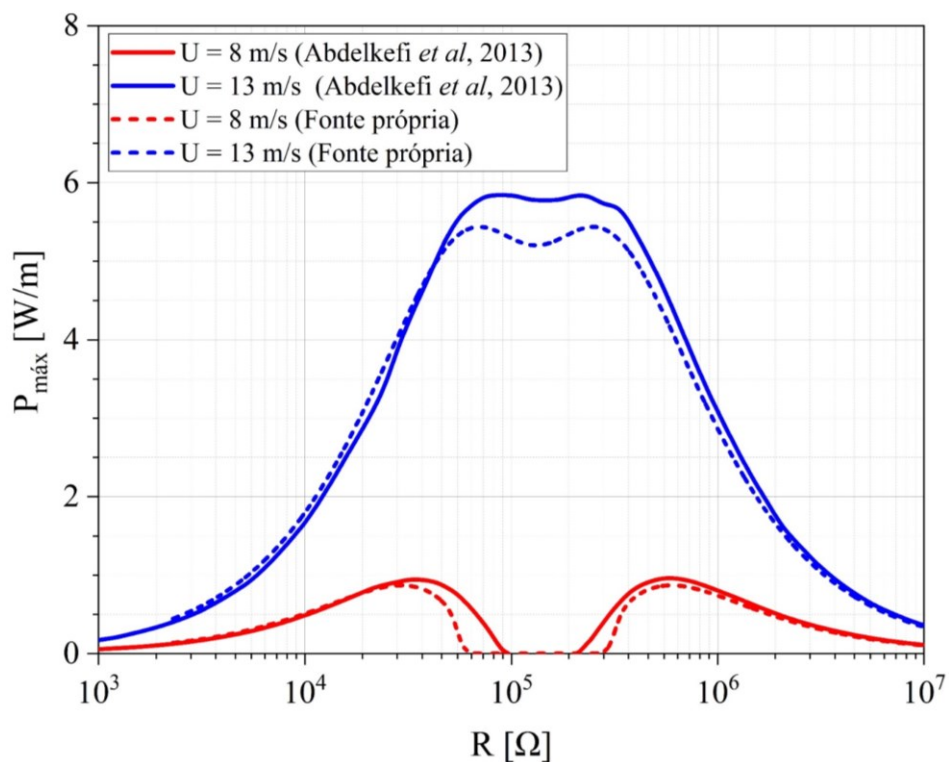


Figura 4.13: Comparação da potência máxima em função da resistência elétrica para a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) em diferentes valores de U . Linha contínua: Abdelkefi *et al* (2013) / Linha tracejada: presente trabalho (Fonte própria)

É possível observar que os resultados obtidos através da solução numérica do presente trabalho são relativamente próximos aos resultados do artigo de referência. Dessa forma, pode-se considerar que o método de solução do presente trabalho foi validado. Cabe ressaltar que no artigo em comparação, não é evidenciado que os valores de deslocamento e de potência por unidade de comprimento são valores máximos. Porém, em função da proximidade dos resultados obtidos, estes serão considerados ao longo do trabalho.

Nas análises a seguir, serão descritos os comportamentos e potencial de maior geração de energia das três diferentes geometrias.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE NUMÉRICA DAS DIFERENTES GEOMETRIAS DE CORPOS SUJEITOS AO GALOPE

Nas análises a seguir são aprofundados os estudos feitos por Abdelkefi *et al* (2013) para as geometrias mostradas na Figura 4.3. Para cada caso, foram selecionados os valores de resistência elétrica R , a partir das figuras 4.5, 4.7 e 4.11, que proporcionam maior potência. Após isso, são feitos estudos paramétricos para identificar a influência dos coeficientes a_1 e a_3 na colheita de energia elétrica.

5.1 SEÇÃO D

Para corpos de seção transversal D, nas condições dadas pela Tabela 4.1, o valor de resistência elétrica que apresentou maior potência máxima, no intervalo $0 \text{ m/s} \leq U \leq 17 \text{ m/s}$, foi $R = 10^4 \Omega$. A Figura 5.1 mostra a variação do deslocamento, velocidade, tensão elétrica por unidade de comprimento e potência por unidade de comprimento no intervalo de 0 s a 400 s.

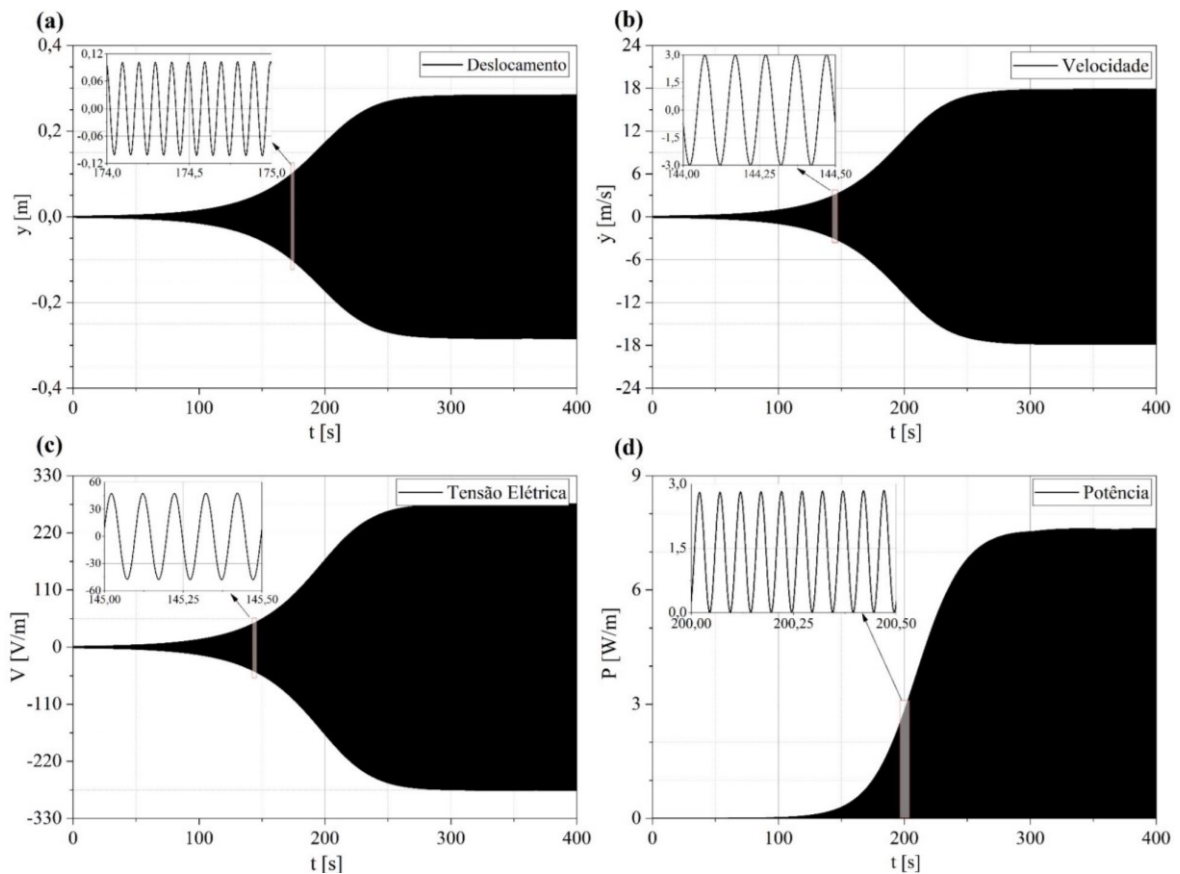


Figura 5.1: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal em D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

Na Figura 5.2, é mostrado a evolução do plano de fase nos intervalos de 7,5 s a 10 s e 300 s a 400 s. Neste, é possível observar a solução estacionária do sistema.

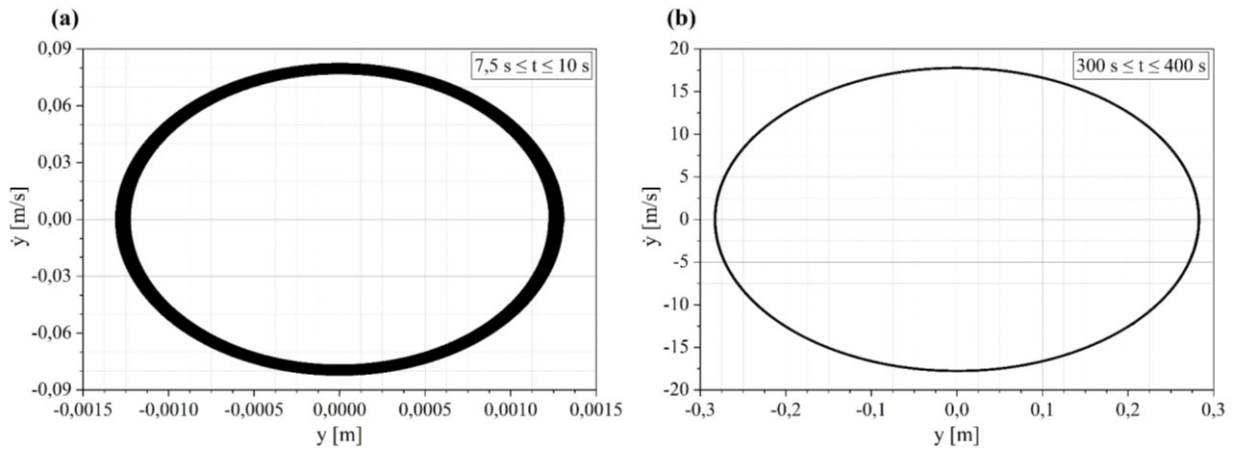


Figura 5.2: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal em D com $R = 10^4 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 300 s a 400 s. (Fonte própria)

A variação dos valores quadráticos médios (RMS, *root mean square*) com a velocidade de escoamento U de cada parâmetro, é mostrado na Figura 5.3.

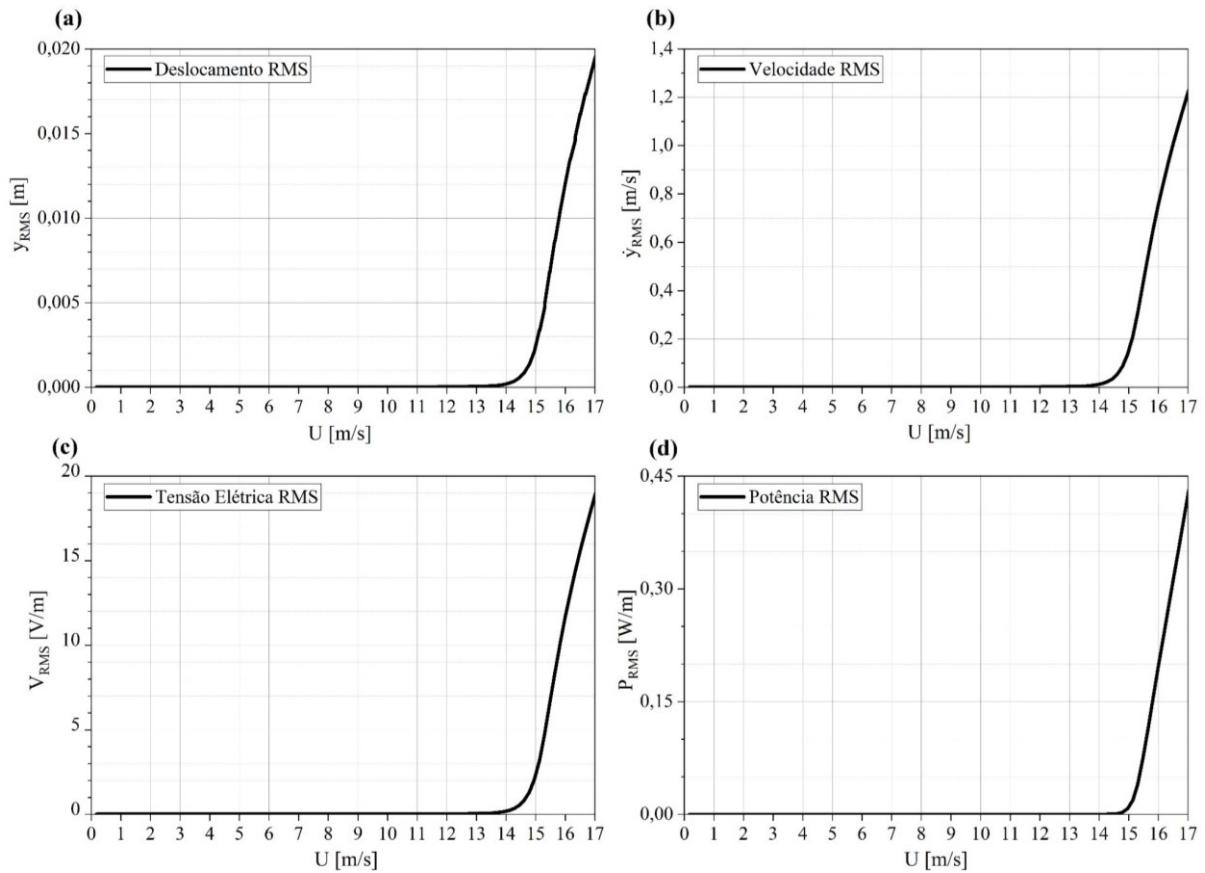


Figura 5.3: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

A Figura 5.4 apresenta a variação dos deslocamentos máximos e potências máximas com a velocidade do escoamento U .

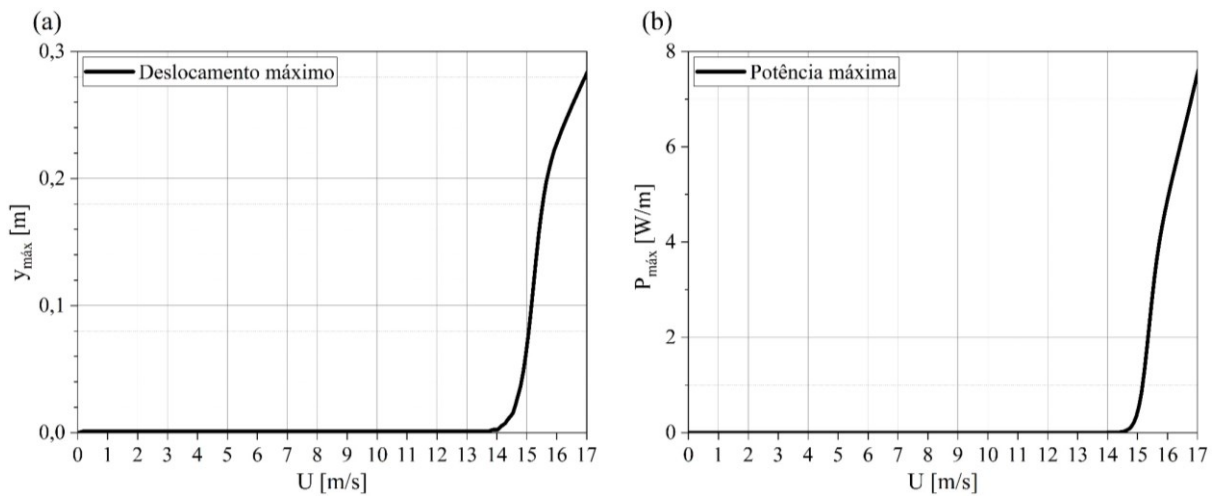


Figura 5.4: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção D com $R = 10^4 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)

5.2 QUADRADO

Nos corpos de seção transversal quadrada, o valor de resistência elétrica que apresentou maior potência máxima, no intervalo $0 \text{ m/s} \leq U \leq 15 \text{ m/s}$, foi $R = 10^5 \Omega$. A Figura 5.5 mostra a variação do deslocamento, velocidade, tensão elétrica por unidade de comprimento e potência por unidade de comprimento no intervalo de 0 s a 100 s.

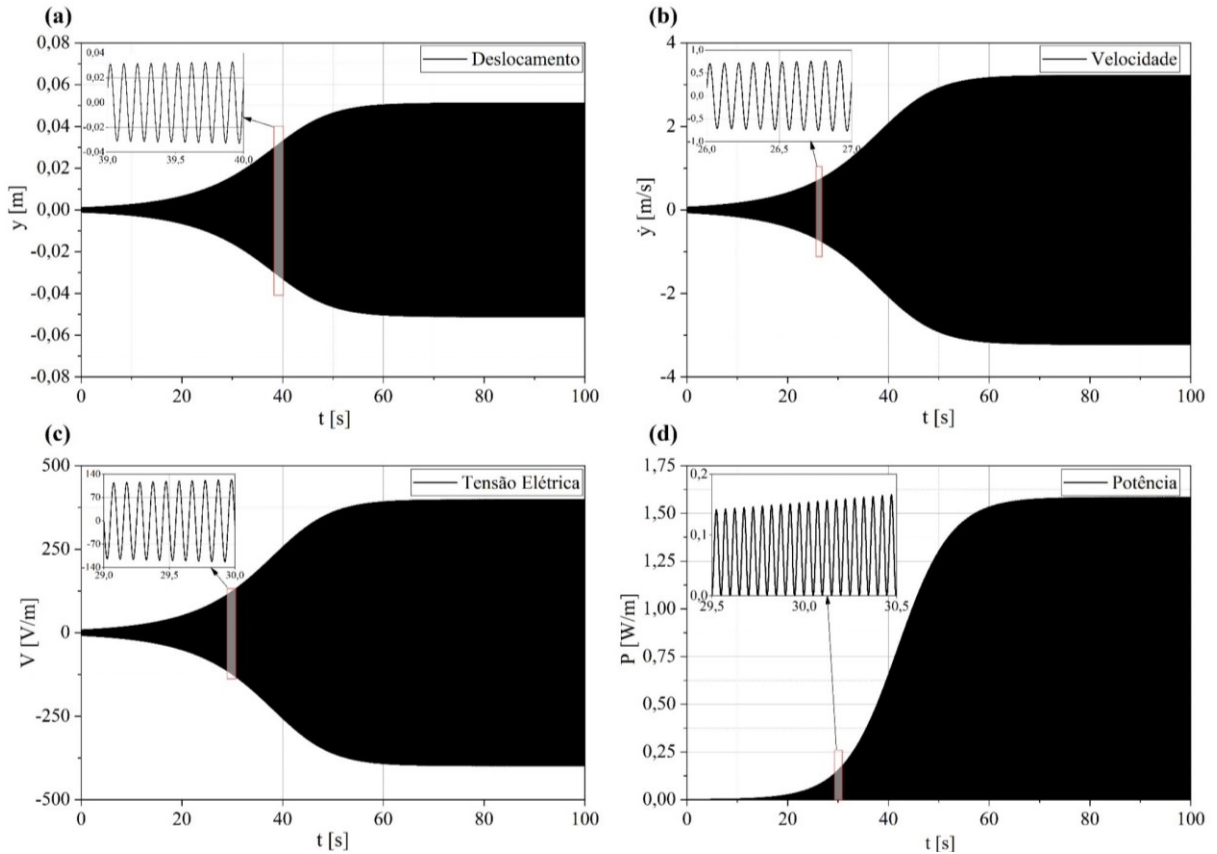


Figura 5.5: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

Na Figura 5.6, é mostrado a evolução do plano de fase nos intervalos de 7,5 s a 10 s e 75 s a 100 s, onde observa-se a solução estacionária do sistema.

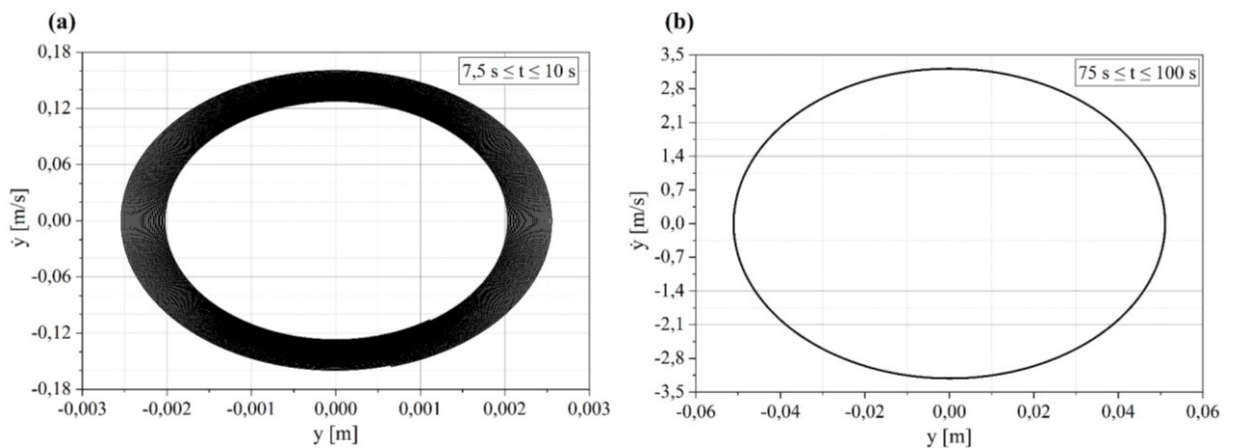


Figura 5.6: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 75 s a 100 s. (Fonte própria)

A variação dos valores RMS com a velocidade de escoamento U de cada parâmetro, é mostrado na Figura 5.7.

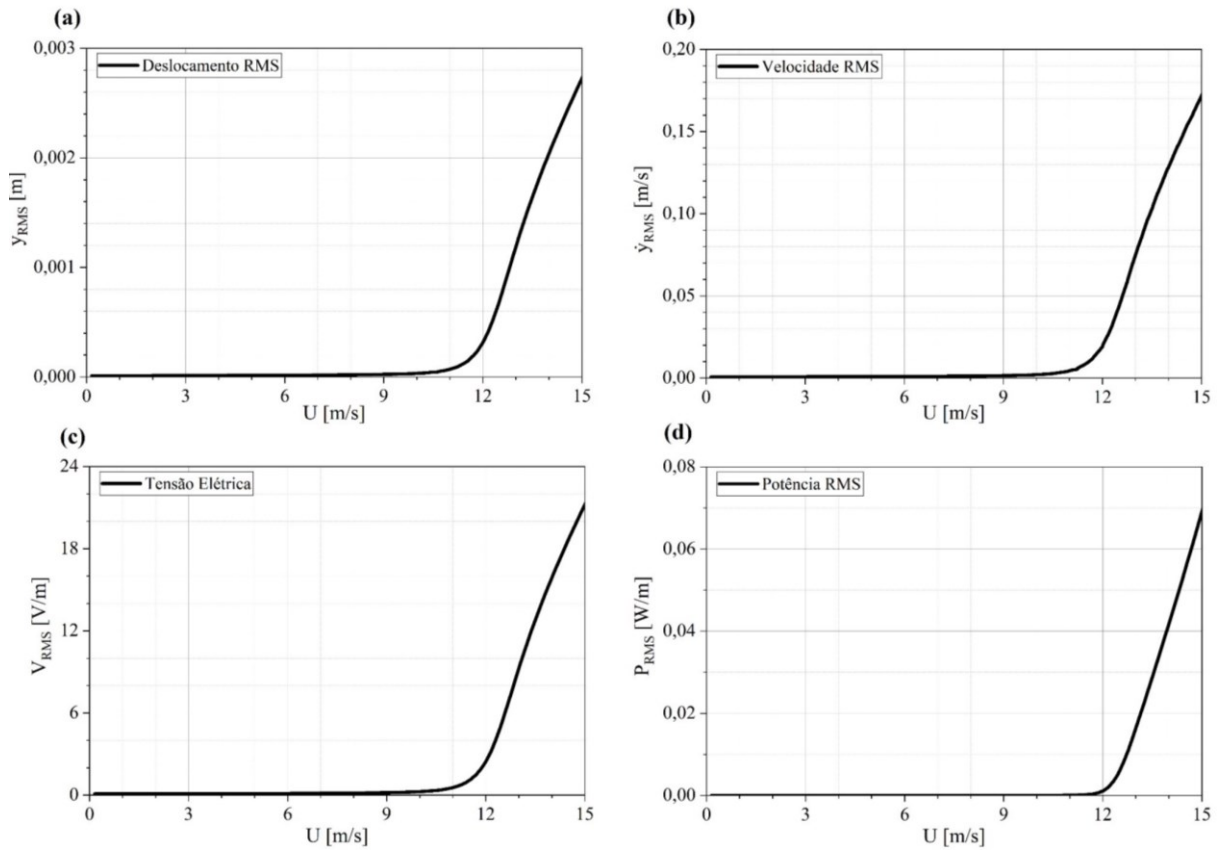


Figura 5.7: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

A variação do deslocamento máximo e potência máxima com U é mostrado na Figura 5.8.

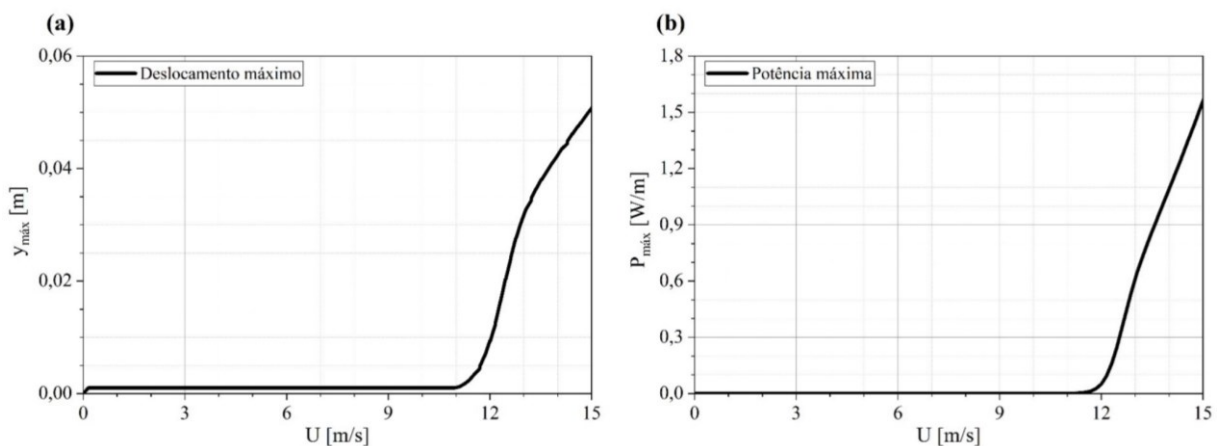


Figura 5.8: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção transversal quadrada com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)

5.3 TRIÂNGULO ISÓSCELES ($\delta = 30^\circ$)

Nos corpos de seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$), o valor de resistência elétrica que apresentou maior potência máxima, no intervalo $0 \text{ m/s} \leq U \leq 15 \text{ m/s}$, foi $R = 10^5 \Omega$. A variação do deslocamento, velocidade, tensão elétrica por unidade de comprimento e potência por unidade de comprimento no intervalo de 0 s a 60 s é mostrado na Figura 5.9.

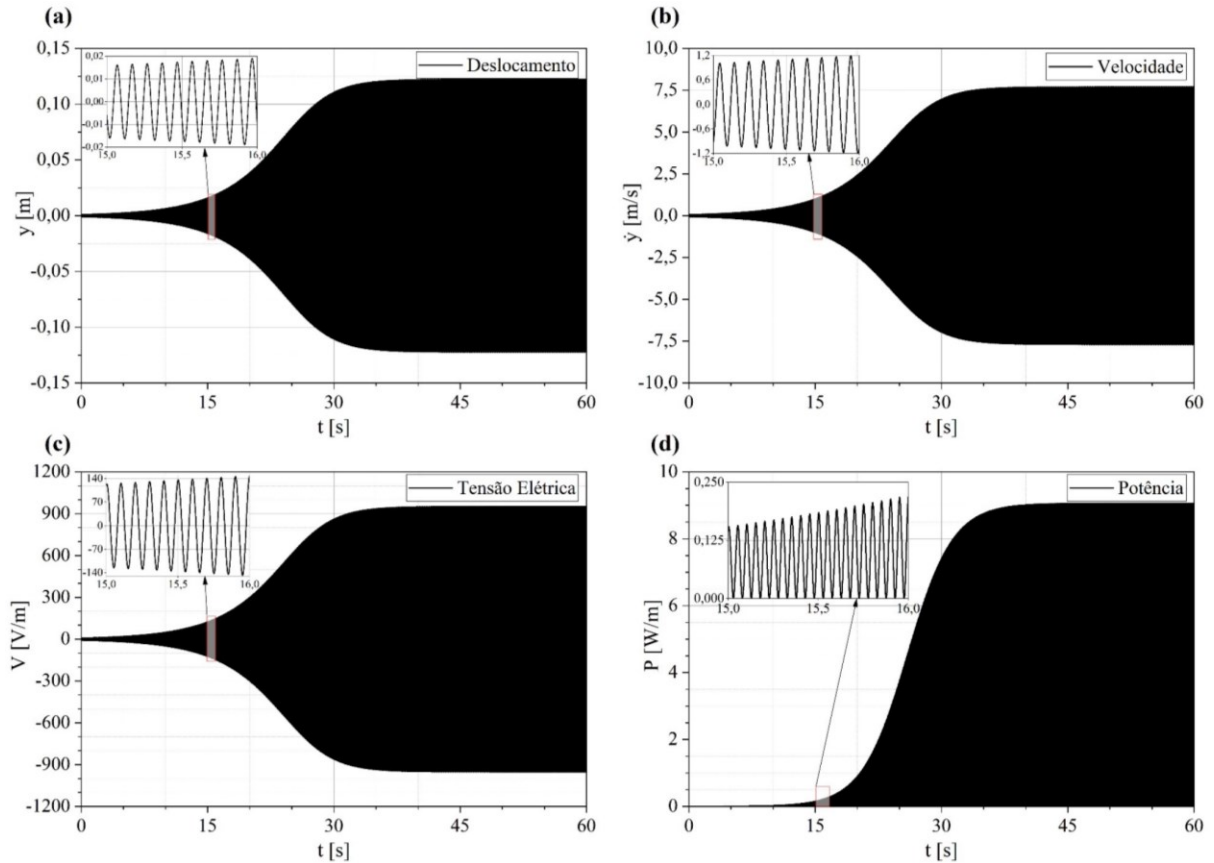


Figura 5.9: Variação dos parâmetros ao longo do tempo para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

Na Figura 5.10, é mostrado a evolução do plano de fase nos intervalos de 7,5 s a 10 s e 45 s a 60 s, onde observa-se a solução estacionária do sistema.

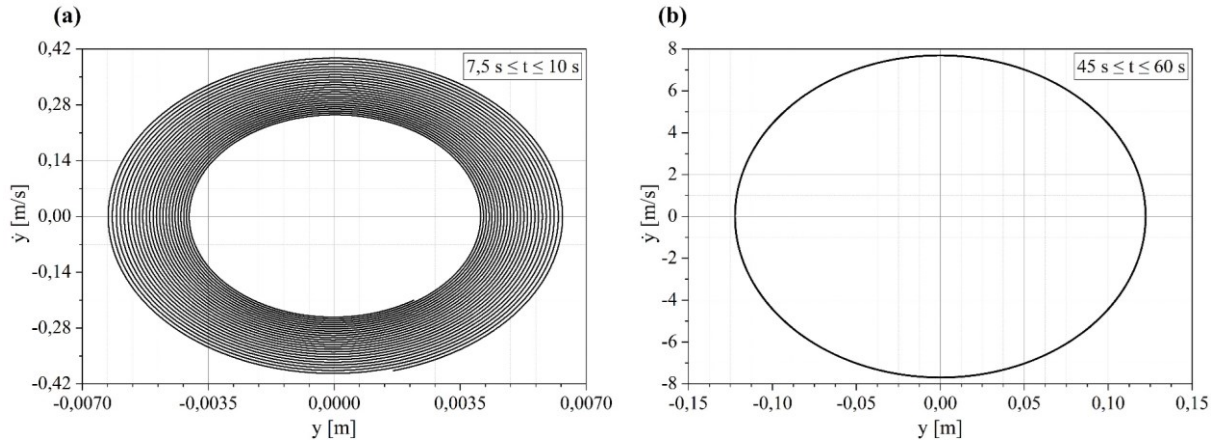


Figura 5.10: Plano de fase de dois intervalos de tempo para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) 7,5 s a 10 s. (b) 45 s a 60 s. (Fonte própria)

A variação dos valores RMS com a velocidade de escoamento U de cada parâmetro, é mostrado na Figura 5.11.

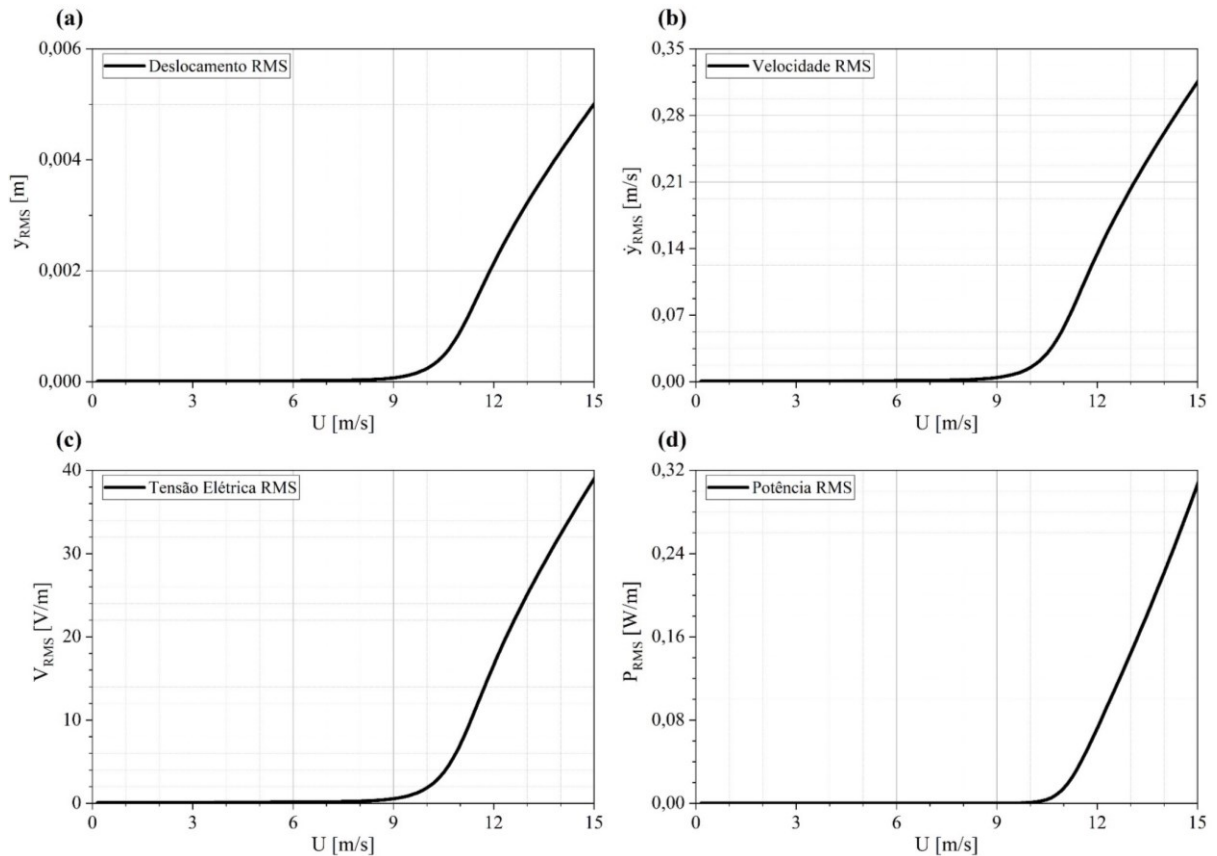


Figura 5.11: Variação dos valores RMS em função da velocidade do escoamento para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Velocidade. (c) Tensão elétrica. (d) Potência (Fonte própria)

A variação do deslocamento máximo e potência máxima com U é mostrado na Figura 5.12.

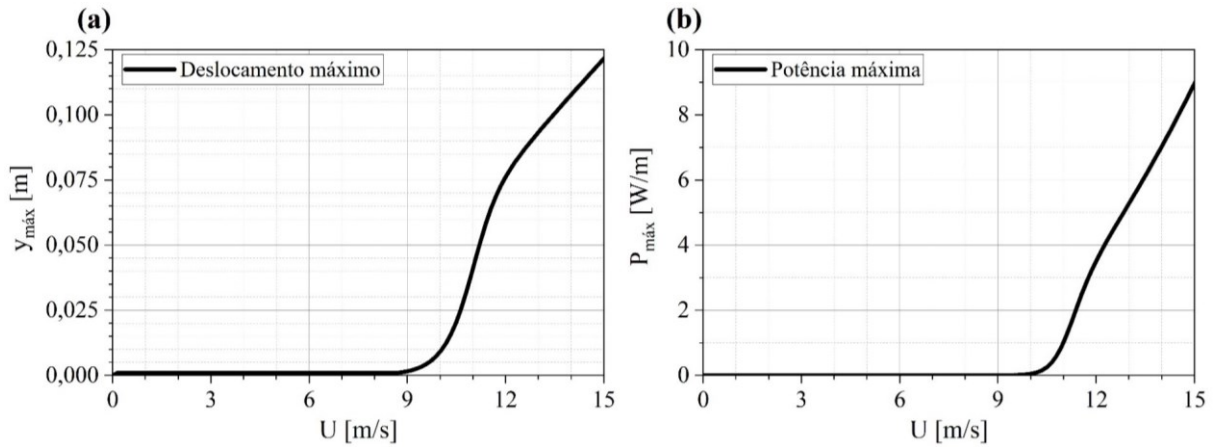


Figura 5.12: Valores máximos dos parâmetros em função da velocidade do escoamento para a seção transversal de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) com $R = 10^5 \Omega$. (a) Deslocamento. (b) Potência (Fonte própria)

5.4 COMPARAÇÃO DAS GEOMETRIAS

A seguir, as geometrias de seção transversal D, quadrada e de um triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) são comparadas a fim de identificar qual apresenta o maior potencial para colheita de energia elétrica.

A Figura 5.13 e Figura 5.14 apresentam gráficos comparativos dos deslocamentos máximos e potências máximas em função de U , respectivamente. É possível observar que a seção transversal de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) o maior pico de potência no intervalo considerado.

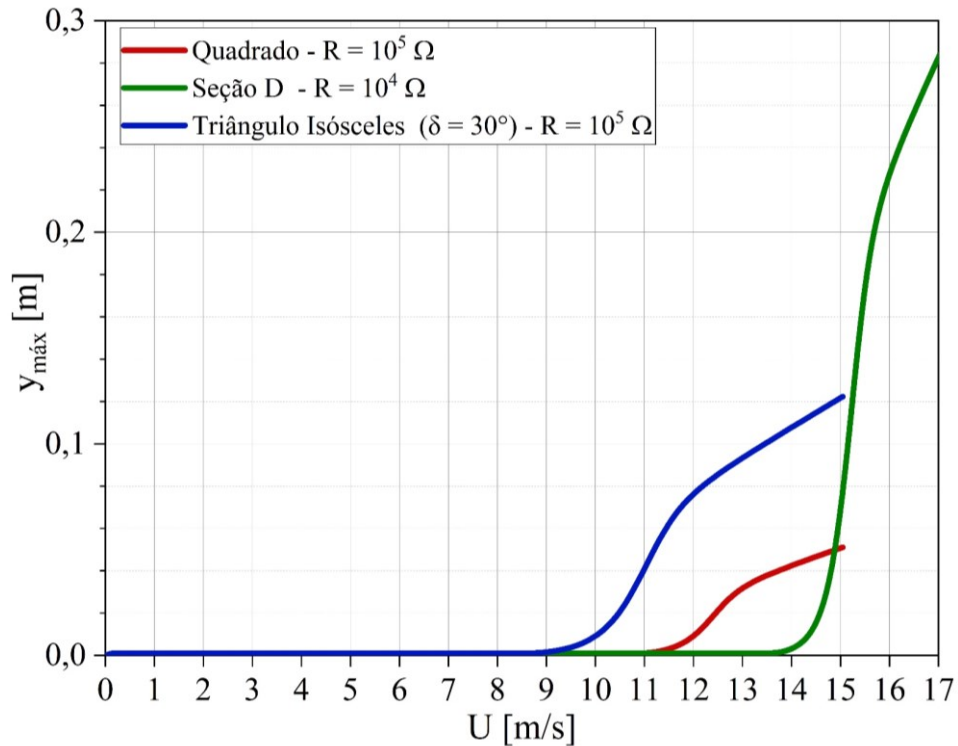


Figura 5.13: Comparação dos deslocamentos máximos para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)

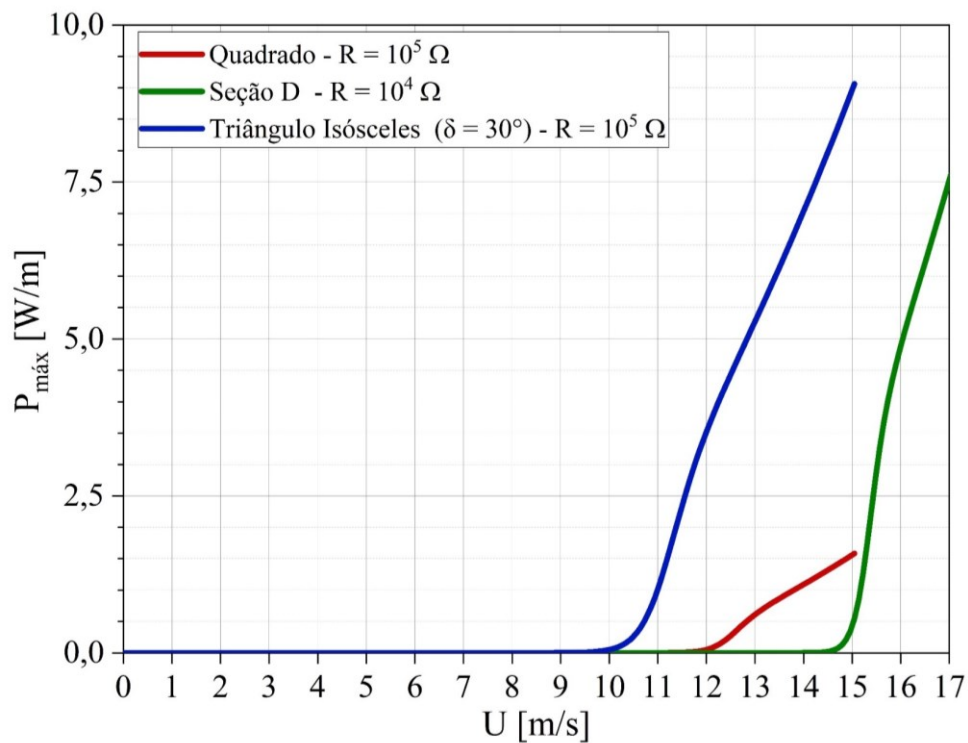


Figura 5.14: Comparação das potências máximas para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)

As figuras 5.15-5.17 comparam os valores RMS do deslocamento, tensão elétrica por unidade de comprimento e potência por unidade de comprimento, respectivamente.

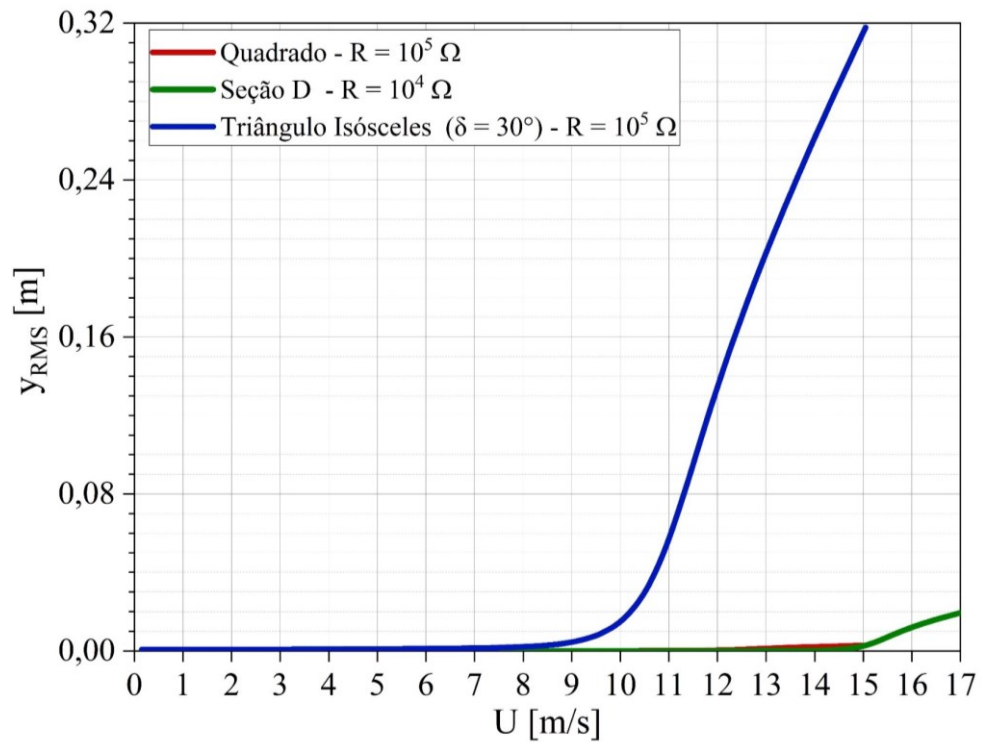


Figura 5.15: Comparação dos deslocamentos RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)

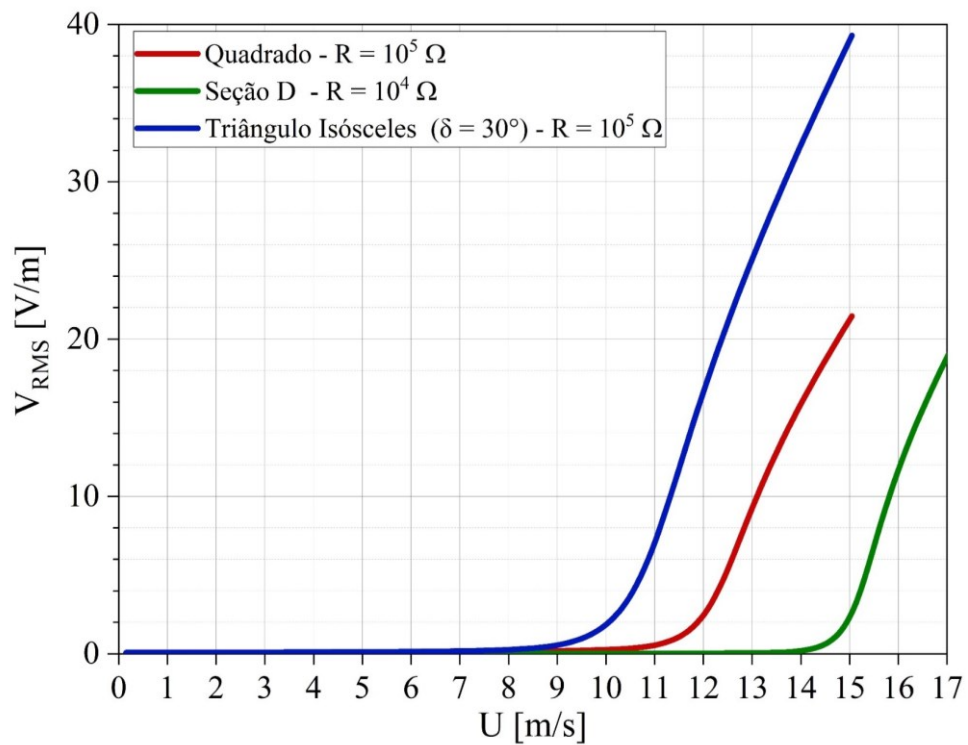


Figura 5.16: Comparação das tensões elétricas RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)

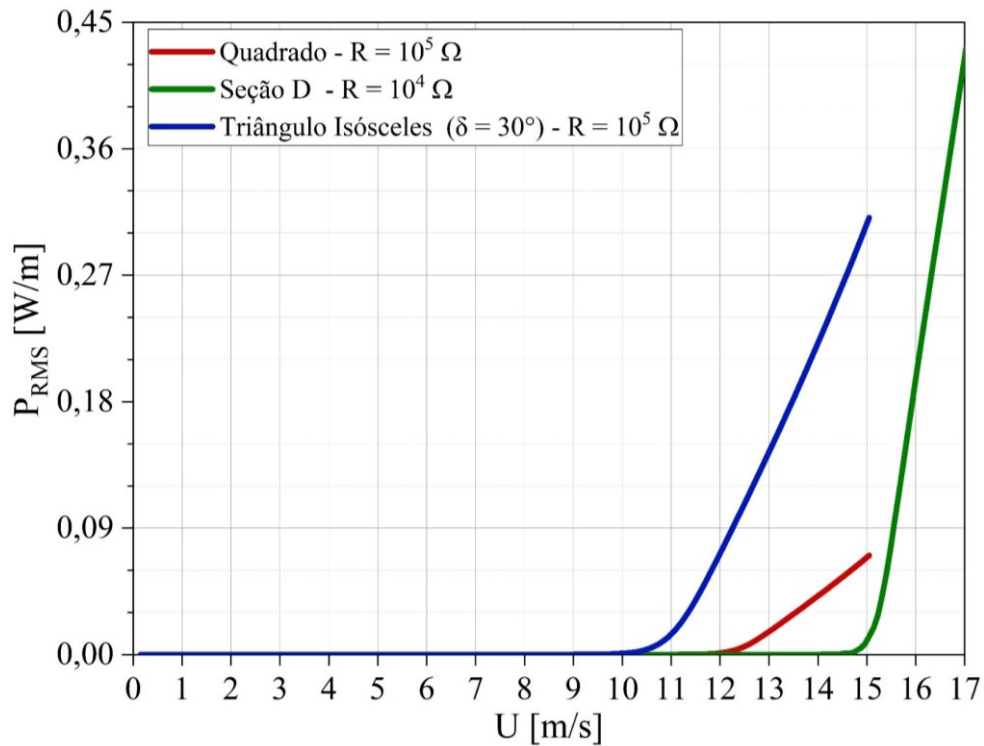















Figura 5.17: Comparação das potências RMS para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$). (Fonte própria)

A partir da comparação das potências RMS, a seção transversal D apresenta valores quadráticos médios maiores no intervalo considerado. No entanto, o início da colheita de energia para essa geometria se dá com valores de $U = \pm 15$ m/s. De acordo com a escala de Beaufort (Tabela 5.1), que relaciona a velocidade do vento com os efeitos físicos observáveis, essa velocidade, caracterizada como “vento forte” não ocorre com tanta frequência na natureza. Assim, a seção de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$), cujo início da colheita de energia se dá para valores de $U = \pm 10$ m/s (“vento fresco”, facilmente encontrado na natureza), apresenta o maior potencial na colheita de energia.

Tabela 5.1: Escala de Beaufort

Nº de Beaufort	Vel. do Vento [m/s]	Descrição		Efeitos em terra
0	< 0,5	Calmaria		Calmo, fumaça sobre verticalmente
1	0,5 – 1,5	Bafagem		Fumaça mostra a direção do vento; cata-vento não gira
2	1,6 – 3,3	Aragem		Sente-se o vento na face; cata-vento começa a girar
3	3,4 – 5,5	Vento fraco		Folhas e pequenos galhos se mexem; bandeirolas se estendem
4	5,5 – 7,9	Vento moderado		Poeira, folhas e papéis voam; bandeiras tremulam; galhos se curvam.
5	8 – 10,7	Vento fresco		Pequenas árvores começam a balançar
6	10,8 – 13,8	Vento muito fresco		Grandes galhos em movimento; escuta-se assobios dos fios
7	13,9 – 17,1	Vento forte		Árvores inteiras se agitando; sente-se resistência ao andar contra o vento
8	17,2 – 20,7	Vento muito forte		Galhos de árvores se quebram
9	20,8 – 24,4	Vendo duro		Pequenos danos estruturais; casas destelhadas
10	24,5 – 28,4	Tempestade		Árvores quebradas ou arrancadas; dano estrutural considerável
11	28,5 – 32,6	Tempestade violenta		Danos em larga escala em árvores e construções
12	≥ 32,7	Furacão		Danos graves e generalizados

Fonte: adaptado de OAHU EMERGENCY REACT

Sob velocidade de escoamento constante $U = 10$ m/s, o corpo de geometria com seção transversal de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$), é capaz de produzir $818 \mu\text{W/m}$. Seria possível alimentar alguns dispositivos, atualmente alimentados por bateria, como um marcapasso cardíaco, relógio de quartzo e relógio eletrônico ou calculadora, conforme mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Consumo de diversos dispositivos alimentados por bateria

Dispositivo	Consumo
Aparelho auditivo	1 mW
Marcapasso cardíaco	50 μ W
MP3 player	50 mW
Relógio de quartzo	5 μ W
Relógio eletrônico ou calculadora	1 μ W
Smartphone	1 W
Transmissor Bluetooth	45 mW

Fonte: adaptado de Rafique (2018) e Ilyas (2018)

É importante notar que os valores de potência obtidos para essas diferentes seções transversais somente consideram uma camada piezelétrica. Para aplicação em maiores escalas, pode-se acoplar diversas camadas de material piezelétrico em vários corpos rombudos, dessa forma torna-se a colheita de energia mais efetiva com a obtenção de maiores potências.

5.4.1 Variação do Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico θ

Um estudo paramétrico para obtenção de maior eficiência na colheita de energia é a variação do coeficiente de acoplamento eletromecânico θ . Foram considerados os mesmos valores de resistência elétrica R dos itens 5.1-5.3. A velocidade do escoamento considerada foi $U = 10$ m/s, em função da sua facilidade de ocorrência na natureza. A variação da potência máxima com θ é mostrada na Figura 5.18 e na Figura 5.19 é mostrada a variação da potência RMS.

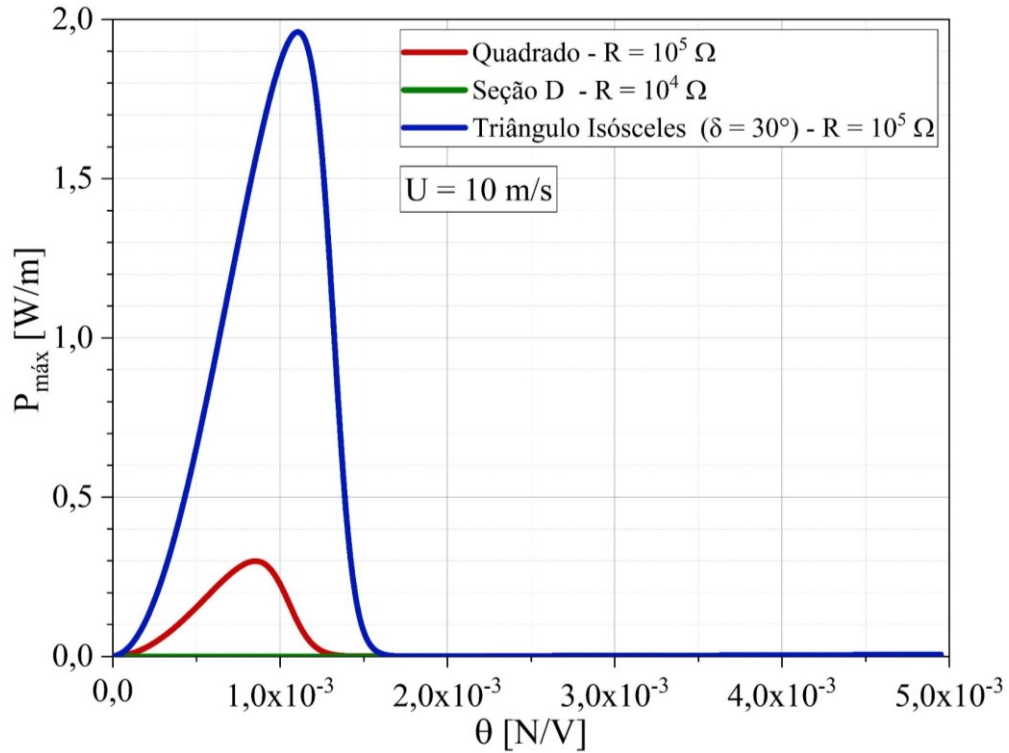


Figura 5.18: Variação da potência máxima com o coeficiente de acoplamento eletromecânico para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) e $U = 10$ m/s. (Fonte própria)

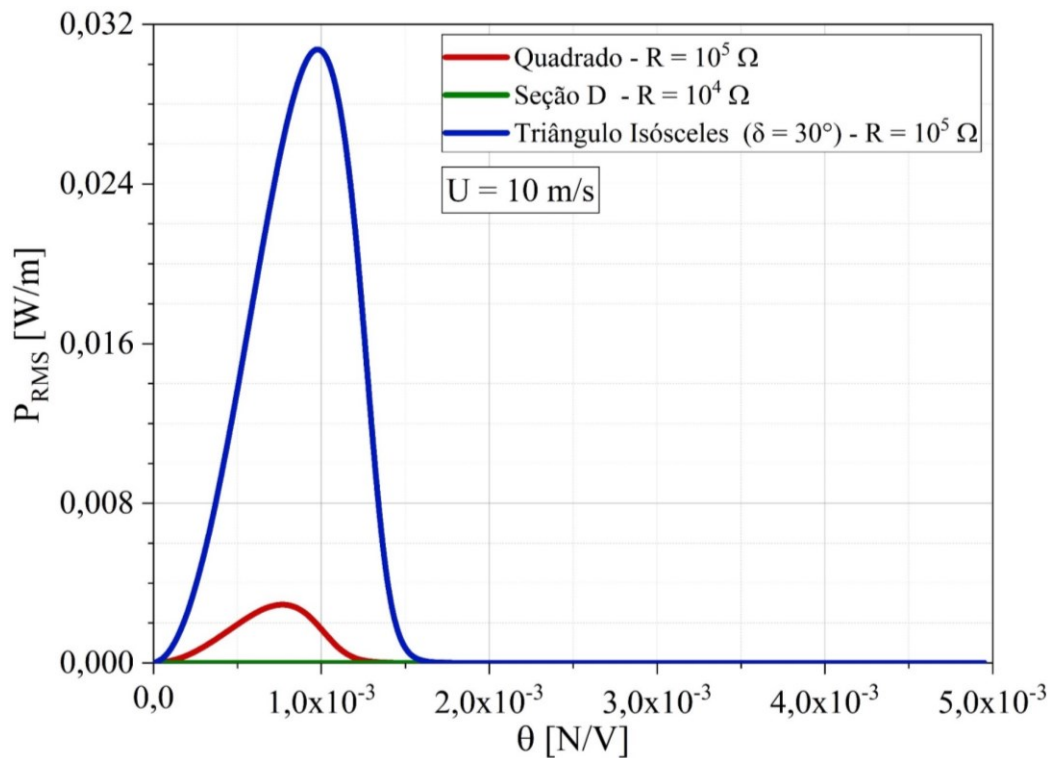


Figura 5.19: Variação da potência RMS com o coeficiente de acoplamento eletromecânico para valores fixos de resistência que geram maior potência nas seções D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$) e $U = 10$ m/s. (Fonte própria)

Observa-se que, como esperado, a seção transversal de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$), apresentou valores maiores de potência máxima e potência RMS nas condições dadas. A potência RMS gerada cresce até um limite de 30,74 mW/m para um coeficiente $\theta = 9,78 \times 10^{-4}$ N/V, então decresce até que a potência gerada seja nula.

5.5 ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS COEFICIENTES a_1 E a_3

De forma a possibilitar a identificação e desenvolver corpos rombudos com geometria da seção transversal que promovam maior eficiência na colheita de energia, foram analisadas as variações dos coeficientes de C_y , a_1 e a_3 , com os outros parâmetros dados pela Tabela 4.1. Na variação da potência máxima e RMS com a_1 , foram plotadas situações com valores de resistência elétrica de $10^3 \Omega$, $10^4 \Omega$ e $10^5 \Omega$, $U = 10$ m/s e três diferentes valores negativos de a_3 , conforme figuras 5.20-5.22.

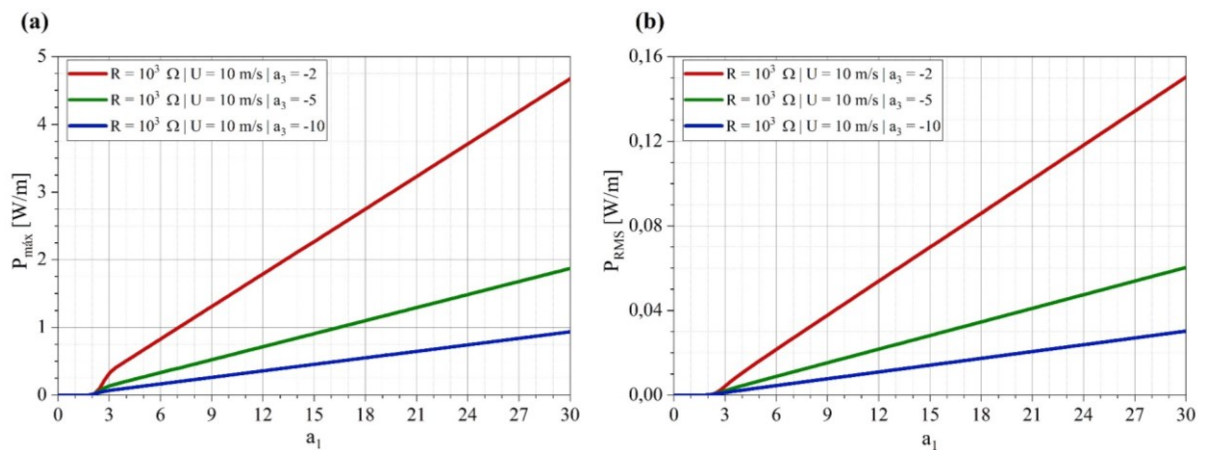


Figura 5.20: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^3 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

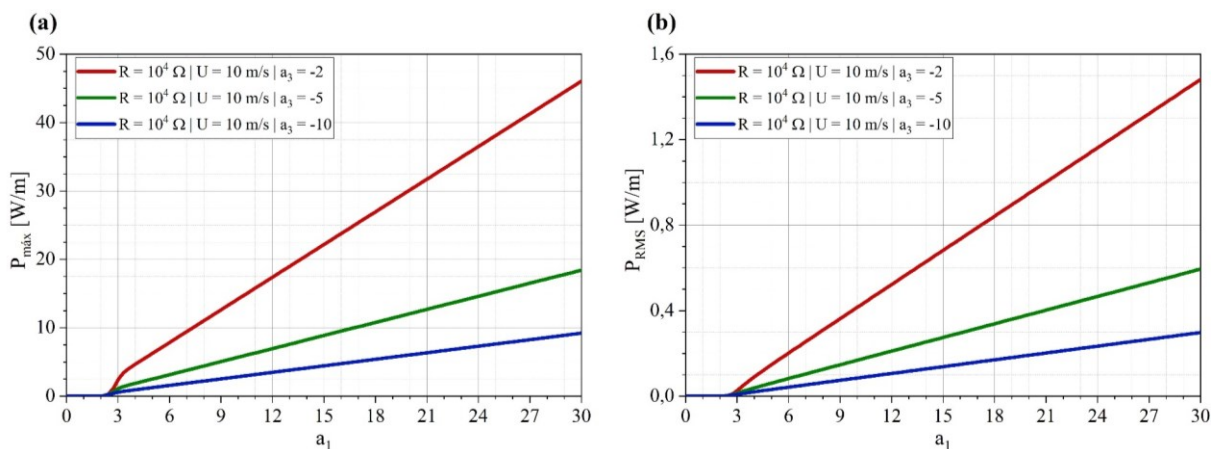


Figura 5.21: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^4 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

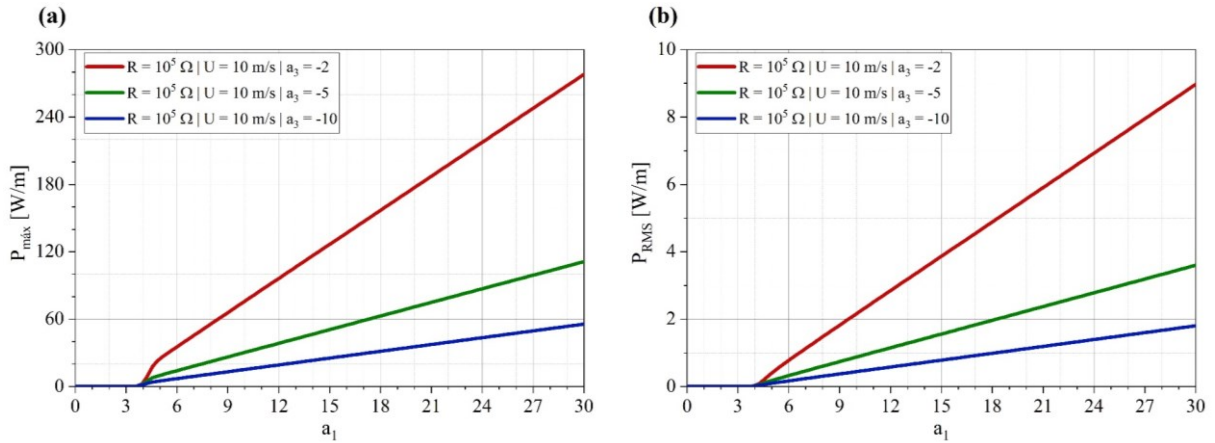


Figura 5.22: Variação da potência com o coeficiente a_1 em diferentes valores de a_3 para $R = 10^5 \Omega$ e $U = 10 \text{ m/s}$. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

Para a variação da potência máxima e RMS com a_3 , considerou-se os mesmos valores de resistência elétrica e de U anteriores. Também, foram plotados casos com três valores positivos de a_1 , como mostrado nas figuras 5.23-5.25.

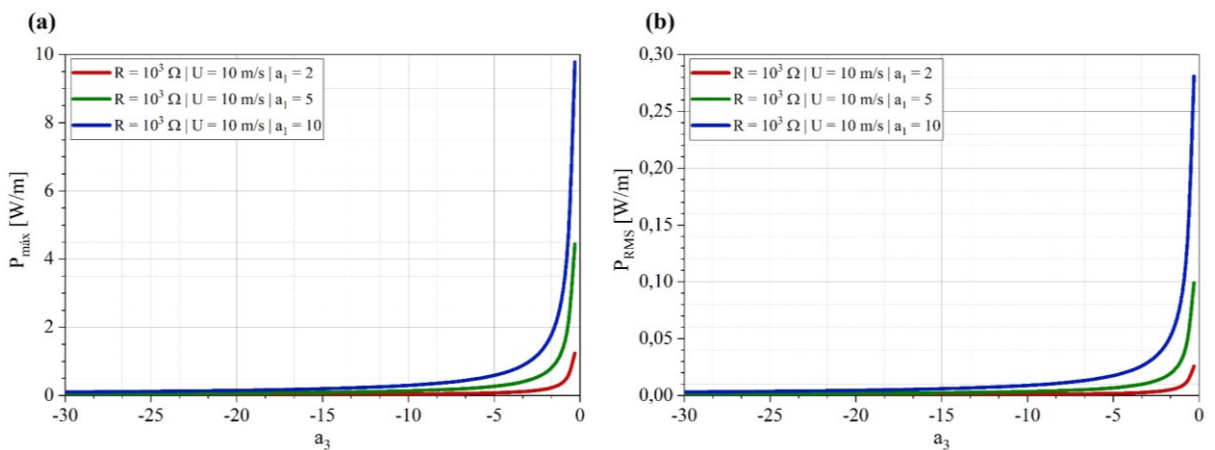


Figura 5.23: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^3 \Omega$ e $U = 10 \text{ m/s}$. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

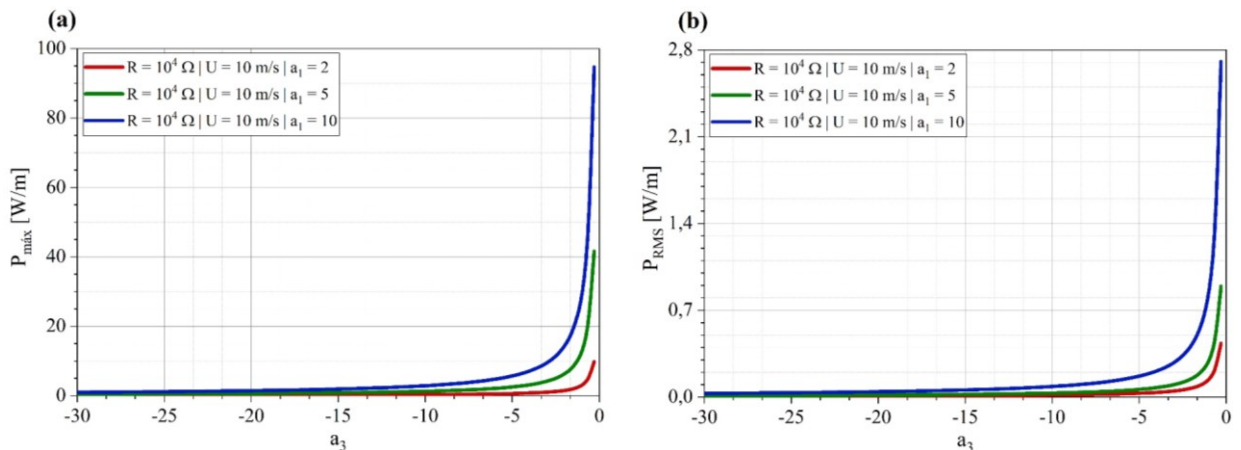


Figura 5.24: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^4 \Omega$ e $U = 10 \text{ m/s}$. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

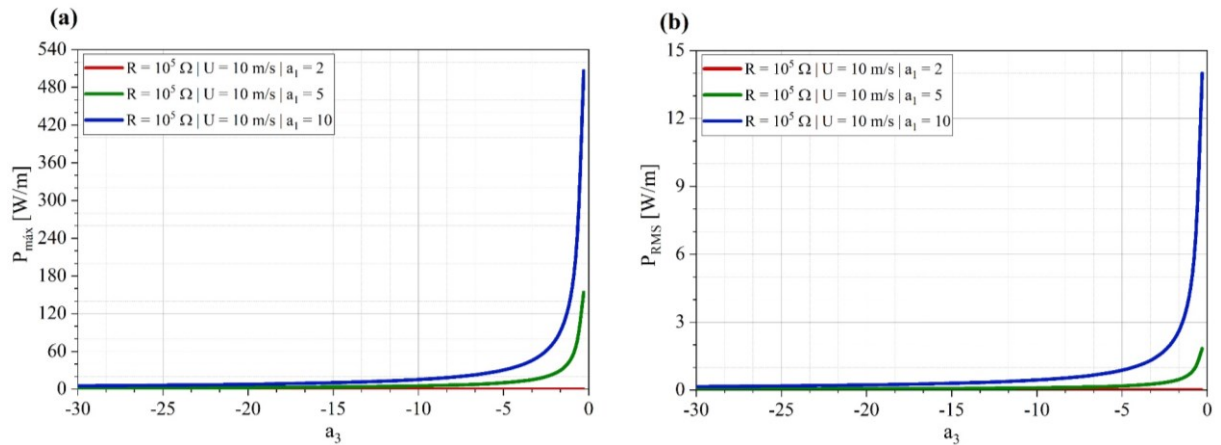


Figura 5.25: Variação da potência com o coeficiente a_3 em diferentes valores de a_1 para $R = 10^5 \Omega$ e $U = 10$ m/s. (a) Potência máxima. (b) Potência RMS. (Fonte própria)

Da variação da potência com a_1 , as curvas apresentam um comportamento crescente predominantemente linear, em que quanto maior esse coeficiente, maior será a potência gerada. Para a variação da potência com a_3 , as curvas apresentam um comportamento assintótico em que quanto menor for o valor negativo de a_3 , menor será a potência gerada. Quanto maior o valor negativo desse coeficiente, maior será potência gerada, com tendência ao infinito ao se aproximar de zero. Portanto, pode-se inferir que, para esses valores negativos próximos de zero, o coeficiente a_3 apresenta uma maior influência na colheita de energia em relação a a_1 .

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Os sistemas de colheita de energia através de materiais piezelétricos sujeitos às oscilações galopantes são possíveis fontes de energia limpa no futuro. A energia mecânica das vibrações, que seria perdida para o ambiente, pode ser aproveitada para alimentação de outros dispositivos, podendo substituir baterias.

As análises numéricas dos corpos sujeitos ao galope com geometria da seção transversal em D, quadrado e triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$), demonstraram que, nas condições estudadas, este último apresenta maior potencial para a colheita de energia como capacidade de se obter $818 \mu\text{W}/\text{m}$ em valores quadráticos médios com $U = 10 \text{ m/s}$. Com essa potência RMS, há a possibilidade de alimentar dispositivos como: marcapasso cardíaco, relógio de quartzo e relógio eletrônico ou calculadora. Para as mesmas condições e variando-se o coeficiente de acoplamento eletromecânico θ , demonstrou-se que é possível se obter $P_{RMS} = 30,74 \text{ mW}/\text{m}$ para um coeficiente $\theta = 9,78 \times 10^{-4} \text{ N/V}$ e seção transversal de triângulo isósceles ($\delta = 30^\circ$).

A parametrização dos coeficientes de C_y demonstrou que quanto maior a_1 , maior será a geração de energia elétrica e as curvas de potência em função de a_1 são, predominantemente, lineares crescentes. No caso de a_3 , valores negativos maiores e próximos a zero proporcionam maior geração de potência elétrica e suas curvas apresentam comportamento assintótico. Também, conclui-se que para valores negativos de a_3 próximos a zero, sua influência na colheita de energia é muito superior em relação à a_1 .

Para trabalhos futuros, ficam como sugestões a realização de análises experimentais dos resultados obtidos no presente trabalho para comparação, análises em fluidodinâmica computacional e experimental para a obtenção de uma geometria ótima de corpo rombudo para maior eficiência no sistema de colheita de energia a partir de materiais piezelétricos sujeitos às oscilações galopantes.

BIBLIOGRAFIA

- ABDELKEFI, A. et al. Incident flow effects on the performance of piezoelectric energy harvesters from galloping vibrations. **THEORETICAL & APPLIED MECHANICS LETTERS**, n. 4, 2014.
- ABDELKEFI, A.; HAJJ, M. R.; NAYFEH, A. H. Piezoelectric energy harvesting from transverse galloping of bluff bodies. **Smart Materials and Structures**, n. 22, 2013.
- ABDELKEFI, A.; YAN, Z.; HAJJ, M. R. Modeling and nonlinear analysis of piezoelectric energy harvesting from transverse galloping. **Smart Materials and Structures**, n. 22, 2013.
- AKAYDIN, H. D.; ELVIN, N.; ANDREOPOULOS, Y. The performance of a self-excited fluidic energy harvester. **Smart Materials and Structures**, New York, n. 21, 2012.
- ALONSO RODRIGO, G. et al. On the galloping instability of two-dimensional bodies having elliptical cross sections. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 98, n. 8-9, p. 438-448, 2010.
- ALONSO, G.; MESEGUER, J.; PÉREZ-GRANDE, I. Galloping instabilities of two-dimensional triangular cross-section bodies. **Experiments in Fluids**, n. 38, p. 789-795, 2005.
- BARRERO-GIL, A.; ALONSO, G.; SANZ-ANDRES, A. Energy harvesting from transverse galloping. **Journal of Sound and Vibration**, n. 329, p. 2873–2883, 2010.
- BLEVINS, R. D. **Flow-Induced Vibrations**. 2nd. ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 2001.
- CELLULAR, A. C.; SAVI, M. A.; SILVA, L. L. D. Influence of the Piezoelectric Constitutive and Mechanical Duffing-type Nonlinearities on Vibration-based Energy Harvesting. **CILAMCE 2016: XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, Brasília, 2016.
- DAHIYA, R. S.; VALLE, M. **Robotic Tactile Sensing**. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2013.
- DAI, H. L.; ABDELKEFI, A.; WANG, L. Piezoelectric energy harvesting form concurrent vortex-induced vibrations and base excitations. **Nonlinear Dyn**, n. 77, p. 967-981, 2014.
- DE MARQUI JUNIOR, C.; ERTURK, A.; JINMAN, D. An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates. **Journal of Sound and Vibration**, v. 327, p. 9-25, 2009.
- DU TOIT, N. E. **Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester**. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. [S.l.]. 2005.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. **Smart Materials and Structures**, v. 18, 2009.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. Chichester: Wiley, 2011.

- FACCHINETTI, M. L.; LANGRE, E. D.; BIOLLEY, F. Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations. **Journal of Fluids and Structures**, v. 19, p. 123-140, 2004.
- FLEISCHER, C. How Piezoelectricity Works. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/piezoelectricity/>>. Acesso em: 14 Maio 2019.
- FOX, R. W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª. ed. [S.l.]: LTC, 2014.
- FRANZINI, G. R.; BUNZEL, L. O. A numerical investigation on piezoelectric energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations with one and two degrees of freedom. **Journal of Fluids and Structures**, São Paulo, n. 77, p. 196-212, 2018.
- GROUTHIER, C.; MICHELIN, S.; LANGRE, E. D. **OPTIMAL ENERGY HARVESTING BY VORTEX-INDUCED VIBRATIONS IN CABLES**. Flow-Induced Vibration. Dublin: [s.n.]. 2012. p. 291-298.
- ILYAS, M. A. **Piezoelectric Energy Harvesting: Methods, Progress, and Challenges**. New York: Momentum Press Energy Physics and Engineering Collection, 2018.
- LIENHARD, J. H. **Synopsis of lift, drag and vortex frequency data for rigid circular cylinders**. Pullman: Washington State University. College of Engineering. Research Division, 1966.
- MEHMOOD, A. et al. Piezoelectric energy harvesting from vortex-induced vibrations of circular cylinder. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, p. 4656-4667, 2013.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 1ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- OAHU EMERGENCY REACT. Beaufort Scale Wind Speed Reference Chart. **Oahu Emergency REACT**. Disponível em: <<https://www.oahureact.org/beaufort-scale-chart>>. Acesso em: 24 out. 2019.
- OGINK, R. H. M.; METRIKINE, A. V. A wake oscillator with frequency dependent coupling for the modeling of vortex-induced vibration. **Journal of Sound and Vibration**, v. 329, p. 5452–5473, 2010.
- PAÏDOUSSIS, M.; PRICE, S.; LANGRE, E. D. **Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities**. New York: Cambridge University Press, 2011.
- PAN, F. et al. Designed Simulation and Experiment of a Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Vortex-Induced Vibration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 4, p. 3890-3897, July/August 2017.
- RAFIQUE, S. **Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments**. [S.l.]: Springer, 2018.
- SILVA, L. L. et al. Effect of the piezoelectric hysteretic behavior on the vibration-based energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems**, v. 24(10), p. 1278-1285, 2013.
- SILVA, L. L. et al. On the Nonlinear Behavior of the Piezoelectric Coupling on Vibration-Based Energy Harvesters. **Shock and Vibration**, 2015. ISSN Article ID 739381.

- SIROHI, J.; MAHADIK, R. Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, n. 22 (18), p. 2215-2228, 2011.
- SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials. **The Shock and Vibration Digest**, v. 36 (3), p. 197-205, 2004.
- SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 16 (10), p. 799-807, 2005.
- TOMASINI, G.; GIAPPINO, S.; COSTA, A. Galloping-based piezo-aeroelastic energy harvester for wireless sensors to be installed on freight trains. **Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems**, Milano, v. 9799, 2016.
- UDDIN, M. N. et al. Modeling of MEMS based piezoelectric cantilever design using flow. **Asian Journal of Scientific Research**, n. 9, p. 71-81, 2016.
- VIANA, R. L. Oscilações de Relaxação e suas Aplicações - II. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 3, 2011.
- WILLIAMSON, C. H. K.; GOVARDHAN, R. Vortex-Induced Vibrations. **Annual Review of Fluid Mechanics**, n. 36, p. 413-455, 2004.
- ZHANG, L. B. et al. Design and experimental analysis of broadband energy harvesting from vortex-induced vibrations. **Journal of Sound and Vibration**, n. 408, p. 210-219, 2017.
- ZHEN, Y.; QING, H. A Review of Piezoelectric Vibration Generator for Energy Harvesting. **Applied Mechanics and Materials**, v. 44-47, p. 2945-2949, 2011.