

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELO JORGE FILHO

**Análise de transdutor eletromagnético para coleta de energia em
aeroelasticidade**

São João da Boa Vista

2020

MARCELO JORGE FILHO

**Análise de transdutor eletromagnético para coleta de energia em
aeroelasticidade**

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Curso de Mestrado Acadêmico, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia do Campus de Sorocaba e o Campus Experimental de São João da Boa Vista.

Área de concentração: Sistemas Mecatrônicos

Orientador: Prof. Dr. Rui Marcos Grombone de Vasconcellos

Coorientador: Prof. Dr. André Alves Ferreira

São João da Boa Vista

2020

J82a

Jorge Filho, Marcelo

Análise de transdutor eletromagnético para coleta de energia em
aeroelasticidade / Marcelo Jorge Filho. -- São João da Boa Vista, 2020
80 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa
Vista

Orientador: Rui Marcos Grombone de Vasconcellos

Coorientador: André Alves Ferreira

1. Indução eletromagnética. 2. Transdutores. 3. Aeroelasticidade. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus
Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Análise de transdutor eletromagnético para coleta de energia em aeroelasticidade".

AUTOR: MARCELO JORGE FILHO

ORIENTADOR: RUI MARCOS GROMBONE DE VASCONCELLOS

COORDENADOR: ANDRE ALVES FERREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RUI MARCOS GROMBONE DE VASCONCELLOS (Participação Virtual)
Coordenadoria de Curso de Engenharia Aeronáutica / Câmpus de São João da Boa Vista



Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO (Participação Virtual)
Coordenadoria Executiva / Câmpus Experimental de São João da Boa Vista - UNESP



Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Sorocaba, 12 de novembro de 2020

Agradecimentos

Ao professor Rui Marcos Grombone de Vasconcellos pela oportunidade, orientação e pelo conhecimento compartilhado.

Ao professor André Alves Ferreira, também pelo apoio e principalmente pela experiência e conhecimento que tem me passado.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

À minha família, especialmente aos meus pais, Marcelo e Sueli, apoiaram em todas as etapas da minha vida, principalmente nos estudos.

À Gabrielly, que estava sempre ao meu lado nesta etapa da vida, sempre me motivando e auxiliando no que fosse preciso.

Finalmente, a Deus que permitiu todas as minhas conquistas.

Resumo

A coleta de energia a partir de oscilações de estruturas imersas em um fluido em movimento tem recebido muita atenção da comunidade científica nos últimos anos. Particularmente, oscilações resultantes de efeitos não lineares dinamicamente estáveis, induzidos ou não, favorecem essa coleta. Existem inúmeras aplicações para a coleta de energia da oscilação de estruturas aeronáuticas, entre elas, alimentação de sensores e outros dispositivos eletrônicos, em locais de difícil acesso, ou a alimentação de sistemas auxiliares em micro veículos aéreos. A coleta de energia proposta neste trabalho utiliza como transdutor um sistema de indução eletromagnética que pode ser acoplado à estrutura de uma seção aeroelástica típica. O transdutor é composto por bobina e ímãs, e foi pensado para implementação em um sistema aeroelástico com um grau de liberdade em torção exposta ao escoamento em altos ângulos de ataque. São apresentados estudos de arquiteturas de transdutores eletromagnéticos do ponto de vista de fluxo eletromagnético, tensão induzida e geração de energia. A partir disso, após seleção da arquitetura de maior geração de energia e sua comprovação experimental, é feito uma análise em que se avalia a possível influência do transdutor no sistema aeroelástico, em que, como exemplo, novas frequências predominantes podem aparecer no sistema.

Palavras Chave: Coleta de energia; Sistema aeroelástico; Estol dinâmico; Indução eletromagnética.

Abstract

Energy harvesting from oscillations of structures immersed in a fluid in motion has received much attention from the scientific community in recent years. Particularly, oscillations resulting from dynamically stable nonlinear effects, induced or not, favor this collection. There are numerous applications for the collection of energy from the oscillation of aeronautical structures, including the supply of sensors and other electronic devices, in places of difficult access, or the supply of auxiliary systems in aerial micro vehicles. The energy harvesting proposed in this work uses an electromagnetic induction system as a transducer that can be attached to the structure of a typical aeroelastic section. The transducer consists of coils and magnets, and was designed for implementation in an aeroelastic system with a degree of freedom in torsion exposed to flow at high angles of attack. Studies of electromagnetic transducer architectures are presented from the standpoint of electromagnetic flow, induced voltage and power generation. Based on this, after selecting the architecture with the highest power generation and proving it experimentally, an analysis is made in which the possible influence of the transducer in the aeroelastic system is evaluated, in which, as an example, new predominant frequencies may appear in the system.

Keywords: Energy Harvesting; Aeroelastic system; Dynamic stall; Electromagnetic induction.

Lista de figuras

Figura 1 – Exemplo de modelo experimental de um sistema aeroelástico com material piezoelétrico acoplado.	16
Figura 2 – Exemplo de modelo experimental de um sistema aeroelástico com transdutor eletromagnético acoplado.	17
Figura 3 – Projeto Stingray.	18
Figura 4 – Modelo experimental de aproveitamento de energia em um barco autônomo.	19
Figura 5 – Transdutor para geração de energia de um sensor para medição de qualidade da água.	20
Figura 6 – Esquema do conjunto experimental do sistema aeroelástico com transdutor acoplado ao sistema aeroelástico.	21
Figura 7 – Terminologia básica para aerofólios.	25
Figura 8 – Grandezas de estudo em um aerofólio.	26
Figura 9 – Esquema dos campos de escoamento no estol dinâmico e seus estágios com (a) representação gráfica do fenômeno e (b) representação ilustrativa do aerofólio e escoamento.	29
Figura 10 – Estol dinâmico moderado.	30
Figura 11 – Estol dinâmico profundo.	30
Figura 12 – Dimensões de referência de uma bobina com multicamadas.	34
Figura 13 – (a) Diagrama esquemático de um coletor de energia eletromagnético típico, (b) ilustrações qualitativas do movimento mecânico, (c) formas de onda de fluxo magnético e (d) de tensão elétrica correspondentes.	35
Figura 14 – Retificador de onda completa em ponte com capacitor de filtro.	35
Figura 15 – Caminhos de condução considerando (a) polaridade positiva e (b) polaridade negativa.	36
Figura 16 – Arquiteturas de transdutores com ímãs em linha.	37
Figura 17 – Esquema do modelo para melhor aproveitamento do movimento do ímã por forças restauradoras não lineares	38
Figura 18 – Ciclos limite.	41
Figura 19 – Configurações iniciais para simulação.	45

Figura 20 – Aparato experimental para comparação dos resultados obtidos por simulação.	47
Figura 21 – Aparato referente ao experimento onde foi obtido o movimento osci- latório do servo.	48
Figura 22 – Série temporal do movimento oscilatório do servo.	49
Figura 23 – Modelos para análise considerando (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina. . . .	50
Figura 24 – Campo eletromagnético dos modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina. . . .	51
Figura 25 – Análise do fluxo eletromagnético na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.	52
Figura 26 – Análise da tensão na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.	53
Figura 27 – Análise da potência gerada na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.	53
Figura 28 – Análise dos fluxos eletromagnéticos do transdutor com polos que se repelem com espaçamento de 5 mm e 10 mm.	54
Figura 29 – Análise do fluxo eletromagnético na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.	55
Figura 30 – Análise da tensão induzida na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.	56
Figura 31 – Análise da energia gerada na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.	57
Figura 32 – Comparação da energia gerada no transdutor com polos que se repelem conforme a variação do espaçamento.	58

Figura 33 – Análise experimental da tensão na bobina considerando um único ímã atravessando a bobina.	59
Figura 34 – Análise experimental da tensão na bobina considerando dois ímãs atravessando a bobina.	59
Figura 35 – Análise experimental da tensão na bobina considerando dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 5 mm atravessando a bobina. . .	60
Figura 36 – Tensão no transdutor obtida (I) experimentalmente; e por (II) simulação em software	61
Figura 37 – Comparação no deslocamento e tensão induzida no transdutor	63
Figura 38 – Análise do espectro de frequência do sinal enviado ao servo	63
Figura 39 – Análise do espectro de frequência do sinal da tensão induzida na bobina	64
Figura 40 – Espaço de estados do movimento oscilatório do servo.	65
Figura 41 – Espaço de estados do sinal obtido no transdutor.	66
Figura 42 – Espaço de estados reconstruído do sinal obtido no transdutor.	67
Figura 43 – Perfil NACA 0012.	74
Figura 44 – Sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.	75
Figura 45 – Projeção com detalhes do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.	76
Figura 46 – Projeção com detalhes traseiros do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.	76
Figura 47 – Sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista superior.	77
Figura 48 – Modelo de experimento de sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia e posicionamento no túnel de vento.	78
Figura 49 – Modelo de experimento de sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia e posicionamento no túnel de vento vista isométrica.	79
Figura 50 – Aparato experimental do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia construído.	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação quantitativa entre trabalhos com coletores de energia relacionados à aeroelasticidade.	18
Tabela 2 – Comparação experimental do transdutor eletromagnético.	61

Lista de abreviaturas e siglas

ALPA	Associação de Pilotos de Linhas Aéreas (do inglês <i>Air Line Pilots Association</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>)
LCO	Oscilações em ciclo limite (do inglês <i>Limit Cycle Oscillation</i>)
MOD	Método das coordenadas defasadas
SDV	Decomposição em valores singulares (do inglês <i>Singular Value Decomposition</i>)
VIV	Vibração induzida por vórtice (do inglês <i>Vortex-Induced Vibration</i>)

Lista de símbolos

α	Ângulo de ataque
ϵ	Força eletromotriz
ϕ	Fluxo eletromagnético
b	Fator de amortecimento
c	Corda
C	Capacitor
C_d	Coeficiente de arrasto
C_l	Coeficiente de sustentação
C_m	Momento em um aerofólio
D	Diodo
i	Corrente
k	Constante de elástica
L	Indutor
L	Indutância
m	Massa
M	Momento em um aerofólio
N	Norte
N	Número de caminhos coincidentes
o	Distância entre o raio central da bobina e a metade de seu enrolamento
p	Tamanho do enrolamento da bobina correspondendo entre o raio de início do enrolamento e o raio final do enrolamento
q	Largura da bobina

R	Resistor
S	Sul
t	Tempo
U_{∞}	Velocidade do escoamento
U.A.	Unidade arbitrária
v_L	Tensão induzida
v	Velocidade relativa do imã
v_1	Velocidade do quadro de um transdutor eletromagnético típico
v_2	Velocidade do imã

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	21
1.1.1	Objetivos Específicos	22
1.2	Organização do trabalho	22
2	AEROELASTICIDADE	24
2.1	Fenômenos aeroelásticos	26
2.1.1	Estol dinâmico	27
3	TRANSDUTORES ELETROMAGNÉTICOS	32
3.1	Arquiteturas e configurações	36
4	SISTEMAS DINÂMICOS	39
4.1	Sistemas dinâmicos lineares	39
4.2	Sistemas dinâmicos não-lineares	40
4.3	Reconstrução do espaço de estados	42
5	Materiais e métodos	43
5.1	Análise das arquiteturas	44
5.2	Análise experimental do transdutor eletromagnético	46
5.3	Análise qualitativa da influência do transdutor no sistema ae- roelástico	49
6	RESULTADOS	50
6.1	Análises preliminares das arquiteturas	50
6.2	Análise paramétrica do transdutor com polos que se repelem .	54
6.3	Análise experimental do transdutor eletromagnético	58
6.4	Análise qualitativa da possível influência do transdutor com imãs de polos que se repelem no sistema aeroelástico	62
7	CONCLUSÕES	68
	Referências Bibliográficas	70

Apêndice A – Projeto do sistema aeroelástico	74
--	----

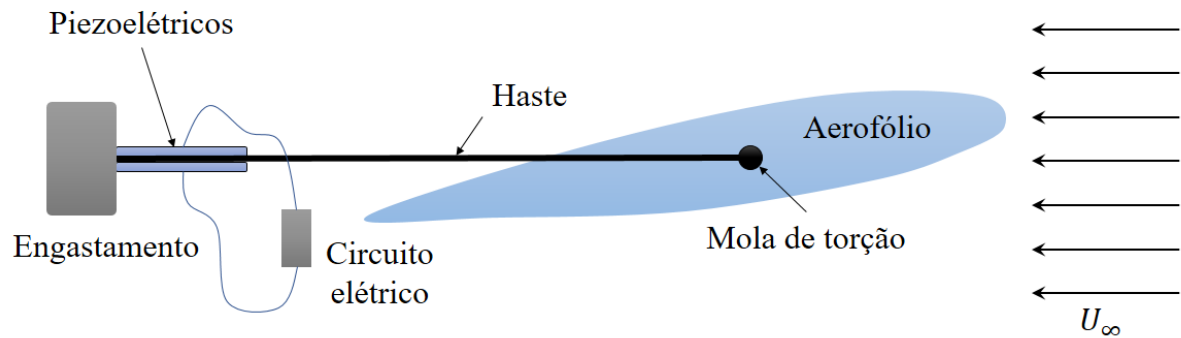
1 INTRODUÇÃO

A coleta de energia (do inglês: *Energy Harvesting*) tem como seu principal objetivo converter uma forma de energia em outra que possa ser aproveitada, como fonte de alimentação de dispositivos eletrônicos ou armazenada em baterias para uso posterior. Existem diversas fontes de energia que podem ser encontradas no ambiente, dentre elas, são exemplos: energia por radiofrequência, solar, térmica, baseada em fluxo e vibração (HARB, 2011)(PRAUZEK et al., 2018).

Nesse sentido, estudos sobre coleta de energia a partir de vibrações aeroelásticas tem início em 2008 (ABDELKEFI, 2016). Especificamente quando trata-se da coleta a partir de materiais piezoelétricos em estruturas aeronáuticas, uma literatura bem limitada está disponível (ERTURK et al., 2010; ABDELKEFI, 2016), sendo que frequentemente é associada à utilização de materiais piezoelétricos para coleta de energia nessas estruturas (DEMARQUI Jr.; ERTURK, 2012; ABDELKEFI, 2016). Essa relação pode ser explicada, pois tal material pode ser introduzido na construção dessas estruturas, tornando-se parte dela. Como exemplo, o revestimento externo de uma asa ou superfície estabilizadora pode conter material piezoelétrico em sua composição. Geralmente, camadas de material piezoelétrico são coladas ou, depositadas sobre as estruturas sujeitas à oscilação.

A Figura 1 mostra um esquema de modelo experimental de um sistema aeroelástico com material piezoelétrico acoplado. A estrutura, ou aerofólio, é imersa em um fluido com velocidade U_∞ e em condições específicas, que serão discutidas posteriormente, ocorre o fenômeno de estol dinâmico, caracterizado por oscilações autossustentadas de amplitude significativa, o que permite coleta de energia de forma contínua do sistema aeroelástico. Essas oscilações fazem com que a haste deforme o material piezoelétrico gerando energia.

Figura 1 – Exemplo de modelo experimental de um sistema aeroelástico com material piezoelétrico acoplado.

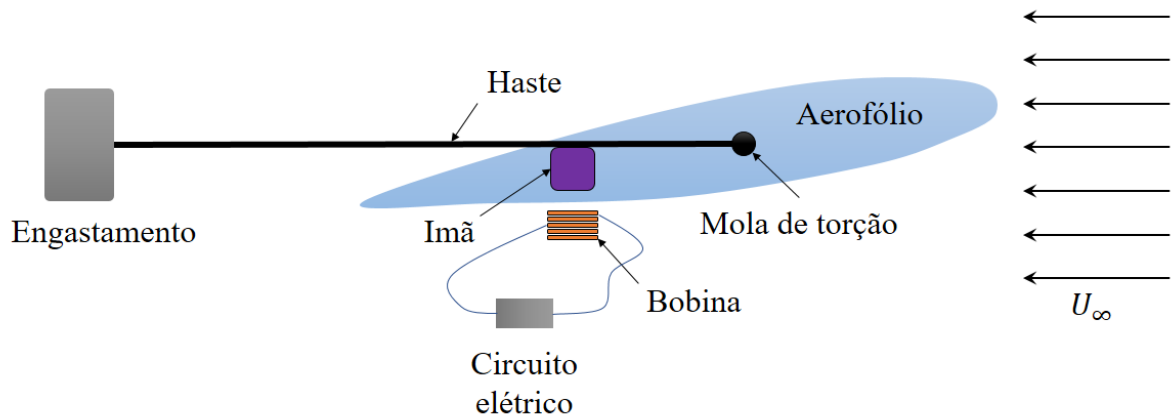


Fonte: Adaptado de (DEMARQUI Jr.; ERTURK, 2012).

Uma forma alternativa de se realizar a coleta de energia seria com conversores eletromecânicos de energia, ou transdutores eletromagnéticos, dispositivos estes que operam com energia armazenada em campos eletromagnéticos. Estes conversores são formados geralmente por uma bobina tubular e um cilindro de material ferromagnético (ímã, por exemplo), que pode se deslocar pelo interior da bobina. O cilindro encontra-se ligado ao sistema oscilatório e quando há uma variação no campo eletromagnético gerado pelo movimento do ímã, este interage com o circuito produzindo corrente elétrica (SIMONE; CREPPE, 2010).

De Marqui Jr., em seus estudos, também mostrou um sistema aeroelástico com um conversor de energia eletromecânico composto por ímã e bobina como mostra a Figura 2 (DEMARQUI Jr.; ERTURK, 2012).

Figura 2 – Exemplo de modelo experimental de um sistema aeroelástico com transdutor eletromagnético acoplado.



Fonte: Adaptado de (DEMARQUI Jr.; ERTURK, 2012).

Novamente a estrutura é exposta ao escoamento e oscilações autossustentadas resultantes de fenômenos aeroelásticos não lineares de amplitude controlada permitem que o ímã se movimente em relação à bobina gerando energia. Ainda, neste modelo há uma enorme dependência das amplitudes de oscilações do sistema, considerando que a bobina não faz parte do sistema, o que exige amplitudes controladas para que a aproximação do ímã seja suficiente para alterar o campo eletromagnético em torno da bobina e gerar energia.

Além desses modelos típicos, outros autores têm estudado de forma teórica e empírica a coleta de energia, considerando diferentes fenômenos e configurações. Abdelkefi (2016) faz uma comparação desses estudos considerando o tipo de fenômeno, o modelo, o material piezoelétrico utilizado e a potência gerada, como mostra a Tabela 1 (ABDELKEFI, 2016).

Tabela 1 – Comparação quantitativa entre trabalhos com coletores de energia relacionados à aeroelasticidade.

Fenômeno	Perfil	Tipo de material piezoelétrico	Potência (mW)
<i>Flutter</i> ^a	NACA 0012	Quickpack QP10N	2,2
<i>Flutter</i> ^b	Simétrico	PSI-5A4E	0,2
VIV ^c	Circular	PVDF	0,004
VIV ^d	Circular	PZT-5A	0,1
<i>Galloping</i> ^e	Equilateral	PSI-5H4E	50
<i>Galloping</i> ^f	Quadrado	DuraAct P-876.A12	8,4
<i>Galloping</i> ^g	Quadrado	MFC-M8514-P2	0,22

^a(BRYANT; GARCIA, 2011), ^b(ABDELKEFI; HAJJ, 2013), ^c(AKAYDIN; ELVIN; ANDREOPOULOS, 2010), ^d(AKAYDIN; ELVIN; ANDREOPOULOS, 2012), ^e(SIROHI; MAHADIK, 2011), ^f(YANG; ZHAO; TANG, 2013), ^g(BIBO; ABDELKEFI; DAQAQ, 2015)

Fonte: Adaptado de (ABDELKEFI, 2016).

Nestes casos, VIV significa vibração induzida por vórtice (do inglês *Vortex-Induced Vibration*) e tanto os fenômenos de *Flutter*, quanto *Galloping* serão discutidos futuramente.

Além desses estudos, há outros autores que apresentam algumas aplicações práticas mais realistas da coleta de energia em estruturas aeronáuticas, como é o caso de Rostami e Armandei (2017). Estes apresentam tecnologias que foram desenvolvidas para coleta de energia também em ambiente aquático com aerofólios submersos (ROSTAMI; ARMANDEI, 2017). Os aerofólios se movimentam a partir do deslocamento da água, podendo ser empregados nos oceanos, rios, mares, entre outros. A Figura 3 apresenta o projeto experimental Stingray que possuía capacidade de 150 kW (ROSTAMI; ARMANDEI, 2017)(AQUARET, 2002.), porém foi abandonado por conta da inviabilidade econômica.

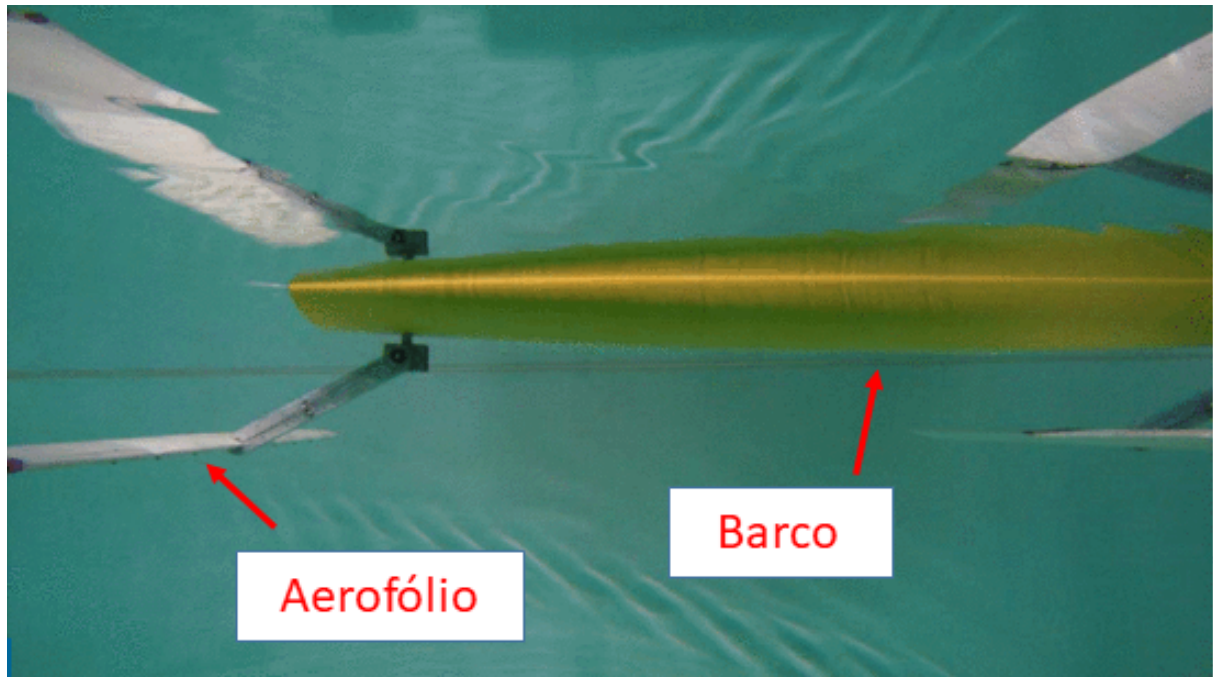
Figura 3 – Projeto Stingray.



Fonte: (AQUARET, 2002.)

Outra tecnologia foi apresentada por Bowker et al. (2015), onde um aerofólio foi instalado em um barco autônomo para estudo de aproveitamento de energia, como pode ser observado na Figura 4 (BOWKER et al., 2015).

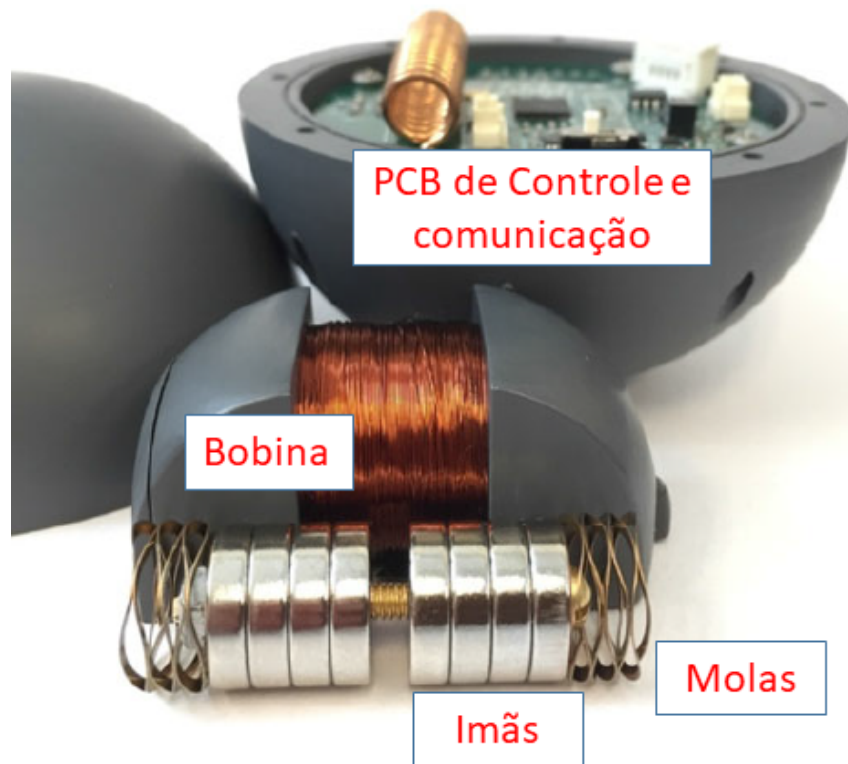
Figura 4 – Modelo experimental de aproveitamento de energia em um barco autônomo.



Fonte: Adaptado de (BOWKER et al., 2015)

Se tratando de aplicações com transdutores eletromagnéticos, Brovont e Pekarek (2015) desenvolveram um sistema para coleta de energia com objetivo de alimentar um sensor para medição de qualidade da água. Trata-se de um sensor em que seu transdutor eletromagnético gera energia a partir da rotação do dispositivo. Segundo os autores, o grande desafio desse projeto foi desenvolver um sistema com dimensões limitadas e que fornecesse a energia necessária para o sensor (BROVONT; PEKAREK, 2015). A Figura 5 mostra o dispositivo desenvolvido.

Figura 5 – Transdutor para geração de energia de um sensor para medição de qualidade da água.



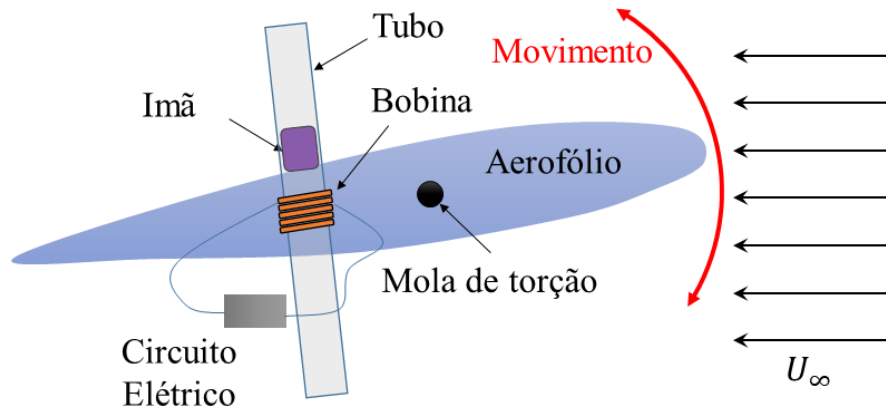
Fonte: Adaptado de (BROVONT; PEKAREK, 2015)

Com relação ao transdutor, este também é composto por ímãs e bobina, de forma que os ímãs estão dispostos a se repelir e há a restrição do movimento realizada por molas nas extremidades.

Atentando-se para esses modelos, aplicações, necessidade de se obter cada vez mais fontes alternativas e ainda melhorar o desempenho na geração de energia, este trabalho visa o estudo de um transdutor eletromagnético para ser acoplado a um sistema aeroelástico. Este transdutor baseia-se na premissa de que o aerofólio apresenta o fenômeno de estol dinâmico, que é caracterizado por oscilações de amplitude considerável para coleta de energia e seu aproveitamento.

Considerando-se também a proposta do transdutor eletromagnético, este deverá ser acoplado ao sistema aeroelástico por completo, diferentemente do modelo já apresentado na Figura 2 em que a bobina não faz parte do mesmo dispositivo. Um esquema do conjunto proposto para o trabalho é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema do conjunto experimental do sistema aeroelástico com transdutor acoplado ao sistema aeroelástico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda sobre o modelo proposto, o sistema aeroelástico só permite o movimento com um grau de liberdade e o transdutor, composto por ímã, bobina e tubo, é inserido ao sistema. Alguns dos desafios deste modelo é desenvolver um sistema que seja eficiente na coleta de energia e que possa interferir o mínimo possível no sistema mecânico.

Considerando que há uma massa com movimentação livre no modelo proposto, efeitos adversos podem surgir e um destes efeitos pode ser a alteração na frequência predominante do movimento. Deste modo, foram feitas análises de arquiteturas de transdutores, do ponto de vista de fluxo eletromagnético e tensão, utilizando o software Ansys Maxwell. Após isso, comparou-se a geração de energia para as arquiteturas estudadas e, para a arquitetura de maior geração de energia, foi feito um estudo mais aprofundado.

Além disso, foi construído um transdutor a fim de verificar o comportamento de tensão observado nas simulações. Também foi apresentado um estudo sobre a possível influência do transdutor eletromagnético a partir do movimento prescrito em um servo motor. Este movimento representa o fenômeno de estol dinâmico, já que utiliza uma série temporal de um aerofólio submetido a este fenômeno.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é estudar e avaliar um sistema de indução eletromagnética para coleta de energia de um sistema aeroelástico. Dessa forma, são apresentados os objetivos específicos.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Modelar computacionalmente o transdutor eletromagnético para um sistema de geração de energia;
- Construir um sistema físico de coleta de energia, ou seja, contruir o trandustor eletromagnético;
- Avaliar o comportamento do sistema físico baseado na simulação computacional;
- Avaliar o potencial de geração de energia do transdutor;
- Avaliar a possível influência do transdutor no sistema mecânico, ou seja, nas oscilações aeroelásticas; e
- Propor um modelo experimental de sistema aeroelástico com transdutor acoplado.

1.2 Organização do trabalho

Neste trabalho, inicialmente apresenta-se alguns modelos de sistemas aeroelásticos que autores utilizaram para coleta de energia, sendo utilizados materiais com efeito piezoelétrico e transdutor eletromagnético para esta função. Além disso, são mostrados algumas tecnologias onde se utilizam sistemas aeroelásticos e transdutores eletromagnéticos para geração de energia.

Já no capítulo 2 são apresentados conceitos sobre aeroelasticidade, onde também são abordados alguns fenômenos aeroelásticos como *Flutter* e *Galloping*. Desta forma, há um destaque sobre o fenômeno de estol dinâmico, pois é de um sistema aeroelástico submetido a este fenômeno que pretende-se coletar energia.

O capítulo 3 introduz o princípio de funcionamento de transdutores eletromagnéticos, como os princípios aplicados a estes dispositivos. Também são mostrados algumas arquiteturas de transdutores eletromagnéticos compostos por ímãs e bobina.

No capítulo 4 é exposto uma breve explicação sobre conceitos de sistemas dinâmicos, pois a partir do entendimento destes e utilização de algumas técnicas que será analisado o comportamento do transdutor eletromagnético em relação ao sistema aeroelástico.

Os materiais e métodos que foram utilizando no trabalho são retratados no capítulo 5, já os resultados e conclusões são apresentados nos capítulos 6 e 7 respectivamente.

Ao final, no apêndice A é proposto um modelo experimental para o sistema aeroelásticos com transdutor eletromagnético acoplado para coleta de energia.

2 AEROELASTICIDADE

A aeroelasticidade é um termo que se refere a ciência que estuda a interação entre forças aerodinâmicas, forças elásticas e a influência delas no projeto estrutural de uma aeronave (BISPLINGHOFF; ASHLEY; HALFMAN, 1996). Os aviões modernos apresentam certa flexibilidade estrutural, esta acaba por introduzir fenômenos aeroelásticos que podem causar deformações nas estruturas, alterando a distribuição de sustentação da aeronave (BISPLINGHOFF; ASHLEY; HALFMAN, 1996; SERRANO, 2010).

Apesar de serem frequentemente associados à aeronaves, os estudos em aeroelasticidade não se limitam apenas aos veículos aéreos, podendo ser observados em interações entre um fluido e estrutura, como por exemplo deslocamento do ar e linhas de transmissão de energia. Outros estudos em aeroelasticidade são referentes à própria coleta de energia com o aproveitamento onde se explora características de alguns fenômenos, sendo que não necessariamente essa coleta é realizada em uma aeronave, podendo ser em barcos e oceanos, como já exposto.

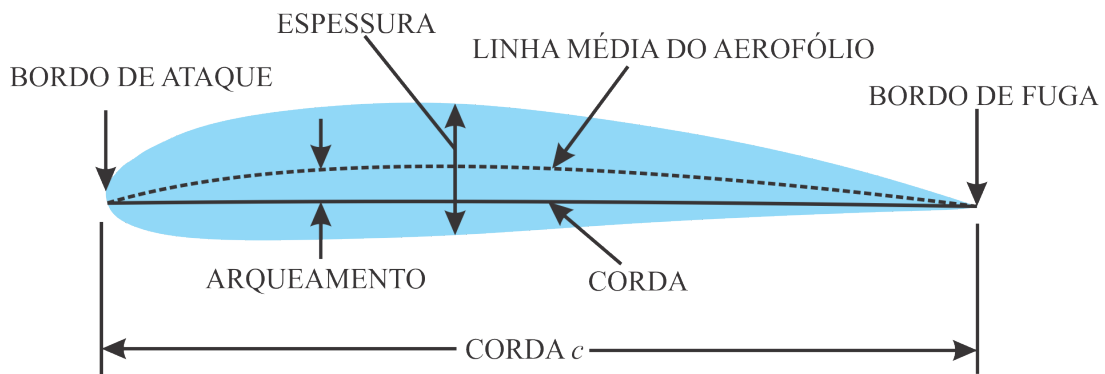
Sistemas aeroelásticos são inerentemente não lineares e portanto, sujeitos a comportamentos distintos dos previstos por meio de métodos convencionais de aproximação linear das equações de movimento. Para exemplificar, as superfícies móveis das aeronaves compreendem mecanismos complexos, sendo possível a existência de algum tipo de folga ou não linearidade concentrada. Com o deslocamento da aeronave na atmosfera, movimentos autossustentados como oscilações em ciclo limite (do inglês *Limit Cycle Oscillation* - LCO) ou comportamento caótico podem surgir em uma superfície móvel e evoluir de forma que coloque em risco a segurança de voo (TRICKEY; VIRGIN; DOWELL, 2002).

Basicamente, um dos problemas mais comuns que se analisa no campo da aeroelasticidade é a estabilidade de uma estrutura imersa no escoamento de um fluido. Com o aumento da velocidade do escoamento, surgem forças aerodinâmicas que podem crescer significativamente gerando instabilidade. Essa instabilidade pode até levar a ruptura da estrutura. Em 1991, uma análise de acidente como a feita pela Associação de Pilotos de Linhas Aéreas (do inglês *Air Line Pilots Association* - ALPA), em um avião Beech 1900C, concluiu que o motor direito despreendeu-se da asa e bateu no estabilizador horizontal, causando perda de controle da aeronave e sua queda. Essa ruptura do suporte do motor foi causada por um fenômeno denominado *whirl-flutter*, que é um fenômeno aeroelástico

envolvendo uma complexa interação da rigidez na montagem dos motores, torques entre hélice-motor e a frequência natural de oscilação da estrutura da asa (SERRANO, 2010).

Para um melhor entendimento, a Figura 7 mostra um aerofólio e a sua terminologia básica. Nela são apresentados a linha média do aerofólio, que são os pontos intermediários entre a superfície superior e inferior; os bordos de ataque e de fuga, sendo os pontos dianteiros e traseiros da linha média; a corda, que é a linha reta que liga bordo de ataque e de fuga, sendo representada por c ; o arqueamento, que é definido como a distância máxima entre a linha média e a corda do aerofólio; e finalmente há a distribuição da espessura do aerofólio (ANDERSON Jr., 2015).

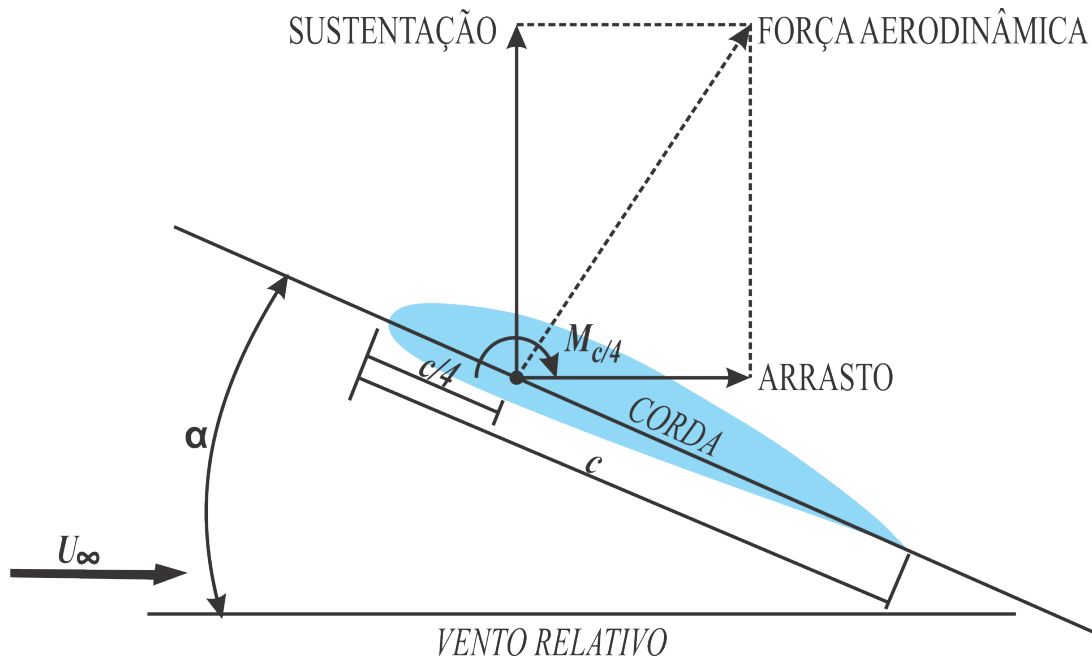
Figura 7 – Terminologia básica para aerofólios.



Fonte: Adaptado de (ANDERSON Jr., 2015).

Já a Figura 8 ilustra um aerofólio com inclinação exposto a um escoamento, onde U_∞ é a velocidade do escoamento, α o ângulo de ataque, ou seja, ângulo entre o vento relativo e a corda. Além disso, outras grandezas como arrasto, força resultante, ou força aerodinâmica e a sustentação, também são mostradas na Figura 8. Considera-se a sustentação como sendo a componente da força aerodinâmica perpendicular ao vento relativo e o arrasto como sendo a componente paralela. Já o centro de pressão é a posição na corda onde se localiza a resultante da força aerodinâmica. Há também o momento M , criado pela distribuição de pressão, que tende a rotacionar o aerofólio (ANDERSON Jr., 2015).

Figura 8 – Grandezas de estudo em um aerofólio.



Fonte: Adaptado de (ANDERSON Jr., 2015).

Outro conceito é o de camada limite, definido como região do escoamento adjacente à superfície da estrutura imersa no fluido onde os efeitos viscosos são significativos (ÇENGEL; CIMBALA, 2015), sendo importante sua definição para se compreender melhor a mecânica do fluido e sua interação com a superfície. Além disso os comportamentos observados na camada limite nem sempre são os mesmos, considerando os vários fenômenos aeroelásticos. Assim a próxima seção apresenta uma breve explicação sobre alguns fenômenos aeroelásticos.

2.1 Fenômenos aeroelásticos

Fenômenos aeroelásticos geralmente são definidos como interações entre diversas forças, podendo ser classificados como estáticos e dinâmicos. Alguns fenômenos aeroelásticos são listados na literatura e, considerando a aeroelasticidade dinâmica, os fenômenos mais conhecidos são o *Flutter*, *Buffeting* e o *Galloping* (BISPLINGHOFF; ASHLEY; HALFMAN, 1996; SERRANO, 2010). Estes também são alguns fenômenos comumente utilizados quando se estuda sobre coleta de energia em aerolasticidade.

O *flutter* é uma instabilidade dinâmica que ocorre em estruturas aerodinâmicas, provocada pelo acoplamento dos modos de flexão e torção da estrutura com o aumento

da velocidade do escoamento. Existe uma velocidade chamada velocidade de *flutter*, onde os modos se acoplam e a estrutura apresenta movimento oscilatório não amortecido com amplitude crescente. Existem variações do fenômeno quando não linearidades estão presentes no sistema, sendo possível atingir oscilações de amplitude limitada, não destrutivas após a velocidade de *flutter* (BISPLINGHOFF; ASHLEY; HALFMAN, 1996; SERRANO, 2010).

O *Buffeting* é definido como uma resposta transitória dos componentes estruturais da aeronave, devido a impulsos aerodinâmicos produzidos pela esteira atrás das asas, fuselagem ou outros componentes da aeronave (BISPLINGHOFF; ASHLEY; HALFMAN, 1996; SERRANO, 2010).

Já o *Galloping* é uma instabilidade relacionada às estruturas não aerodinâmicas. Hartog observou que em determinadas condições climáticas, as linhas de transmissão de alta tensão oscilavam, apesar de suas formas serem cilíndricas. Esse fenômeno ficou conhecido como *Galloping* pelas características do movimento que tais estruturas apresentavam (HARTOG, 1985).

Além desses, pode-se citar o estol dinâmico, que será utilizado para coleta de energia. A escolha do estol dinâmico tem como motivo principal sua característica oscilatória, ou seja, o fenômeno apresenta altas amplitudes de oscilação, o que torna conveniente o seu estudo e aproveitamento das oscilações para coleta de energia, assim a próxima seção irá definir e explicar este fenômeno detalhadamente.

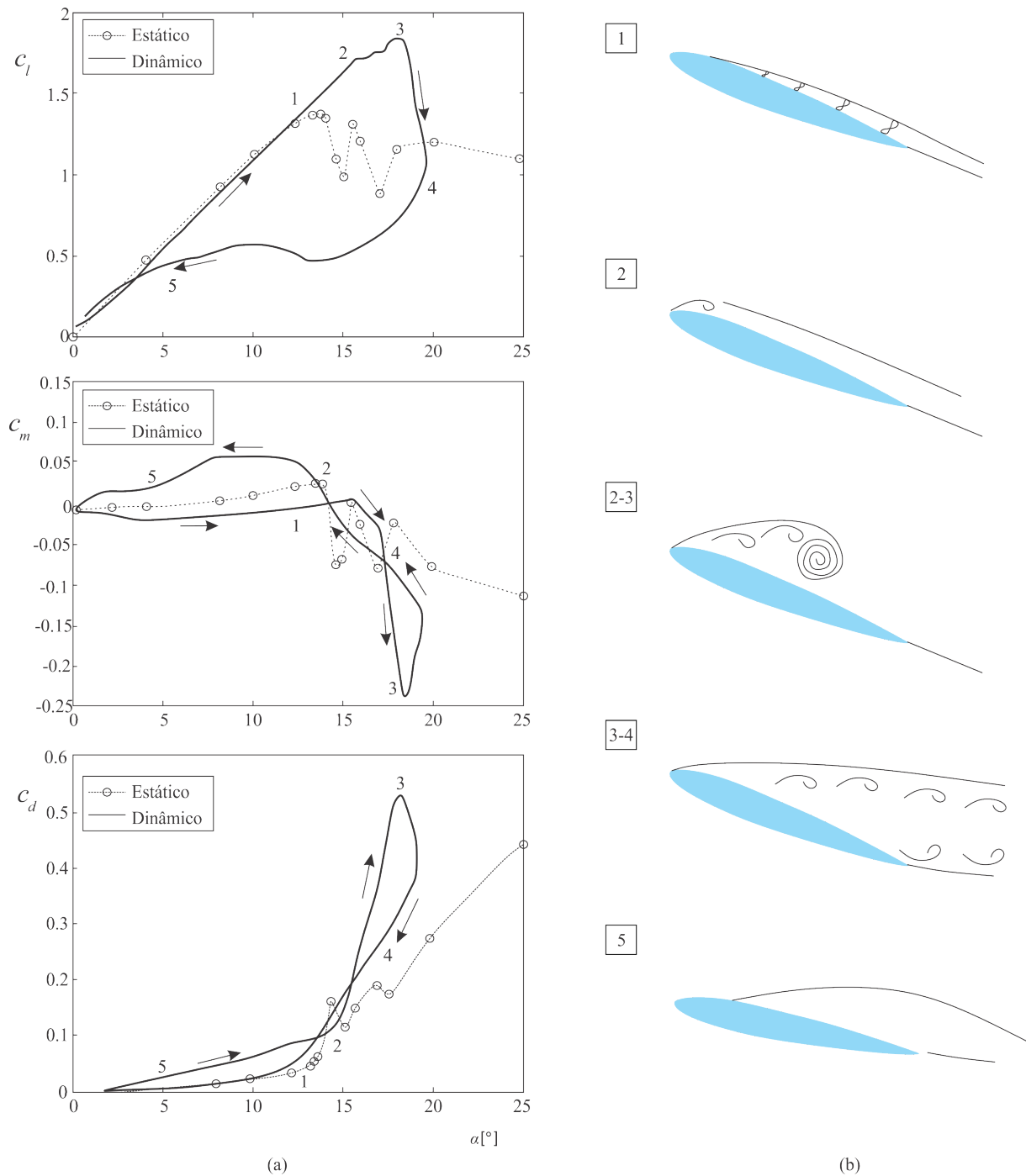
2.1.1 Estol dinâmico

O estol dinâmico (do inglês *dynamic stall*) é um fenômeno que foi identificado pela primeira vez em helicópteros. Em um aerofólio, este fenômeno é descrito como uma complexa série de eventos que resultam em um atraso dinâmico dos efeitos lineares e não-lineares que não acontece em condições estáticas, o que aumenta consideravelmente as forças aerodinâmicas. Esse atraso geralmente é acompanhado por altas oscilações, sendo que o ângulo de ataque crítico é denominado ângulo de estol dinâmico, este difere do ângulo de estol estático que ocorre em condições estacionárias (CARR, 1988; ALÉ, 1996).

As medidas de grandezas aerodinâmicas são baseadas em coeficientes adimensionais, C_l , C_m e C_d que representam respectivamente, o coeficientes de sustentação, momento

e arrasto (MCCROSKEY, 1982). Em um experimento com um perfil estático, as características aerodinâmicas são determinadas posicionando um aerofólio com um determinado ângulo de ataque dentro de um escoamento, e após o equilíbrio da corrente do fluido são feitas as medições. Quando o ângulo de ataque é alterado quase de modo estacionário, ou seja, com passos lentos e infinitesimais, os coeficientes aerodinâmicos descrevem curvas semelhantes às determinadas nos testes estáticos. Porém, se a variação do ângulo de ataque é suficientemente rápida, esses coeficientes mudam, descrevendo ciclos de histerese como os que podem se observar na Figura 9 (RUÓTOLO, 2010). Esta ainda apresenta os estágios encontrados no fenômeno de estol estático e dinâmico.

Figura 9 – Esquema dos campos de escoamento no estol dinâmico e seus estágios com (a) representação gráfica do fenômeno e (b) representação ilustrativa do aerofólio e escoamento.



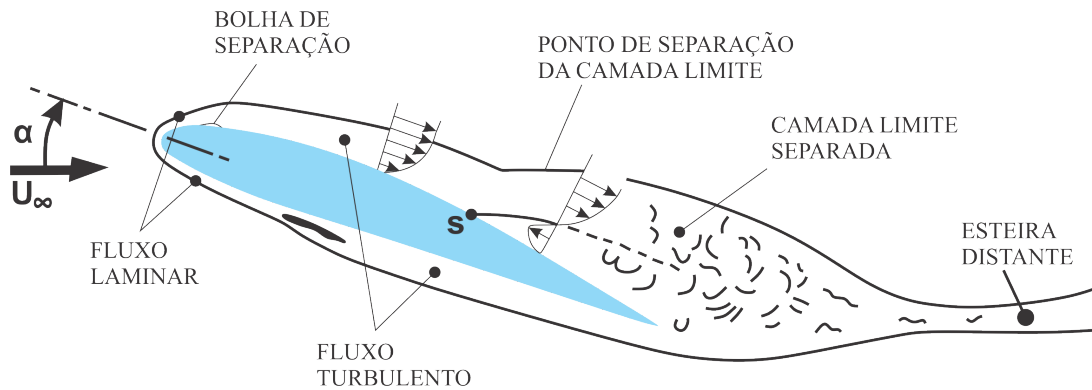
Fonte: Adaptado de (MCCROSKEY, 1982; RUÓTOLO, 2010).

No estágio 1, o ângulo de ataque supera o ângulo estático e se iniciam as reversões de escoamento na camada limite. No estágio 2, há o início do desprendimento da camada limite e turbulência no bordo de ataque pelas perturbações viscosas. Em 2-3, o vórtice é convectado sobre a corda, o que induz a elevação do centro de pressão e seu deslocamento para o bordo

de fuga. Já em 3-4, depois que o vórtice atinge o bordo de fuga, o escoamento progride para uma separação total da camada limite. Finalmente em 5, quando o ângulo de ataque se torna suficientemente pequeno, o escoamento retorna ao estágio 1, ou seja, normalmente quando o escoamento é colado e ângulo de ataque zero (ALÉ, 1996; LEISHMAN, 2006; RUÓTOLO, 2010). Considerando o coeficiente de momento C_m do aerofólio, destaca-se o estágio 3, onde há uma baixa pressão no bordo de fuga, o que causa a inversão abrupta no sentido do movimento, que é o fator preponderante para as altas amplitudes de oscilação.

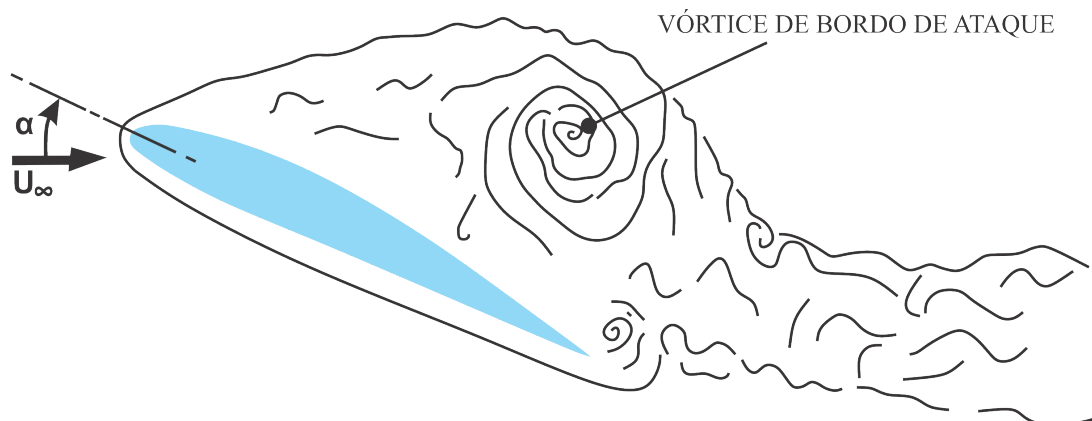
Além desses estágios, o fenômeno de estol dinâmico possui regimes, como mostram as Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Estol dinâmico moderado.



Fonte: Adaptado de (MCCROSKEY, 1981; RUÓTOLO, 2010).

Figura 11 – Estol dinâmico profundo.



Fonte: Adaptado de (RUÓTOLO, 2010).

No estol dinâmico moderado, observa-se a presença de bolhas de separação, escoamento laminar e turbulento, separação da camada limite e esteira. Já no estol dinâmico profundo há a presença de vórtices na parte superior do aerofólio. Também com o aumento da velocidade do escoamento, as oscilações tendem a evoluir de ciclos limite assimétrico para simétricos. Estes fatos contribuem para oscilações persistentes de grande amplitude angular e de baixa frequência (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016), o que é favorável para coleta de energia.

Exposto os conceitos sobre aeroelasticidade e principalmente sobre estol dinâmico, o próximo capítulo destina-se à apresentação de transdutores eletromagnéticos, especificamente sobre as equações básicas envolvidas nestes dispositivos e são apresentadas algumas arquiteturas para estudo.

3 TRANSDUTORES ELETROMAGNÉTICOS

Uma forma alternativa de coletar energia seria através de conversores eletromecânicos de energia, dispositivos estes que utilizam energia armazenada em campo eletromagnético. Estes conversores são formados por uma bobina tubular e um êmbolo de material ferromagnético (imã), que se desloca pelo interior da bobina, com atrito desprezível. O êmbolo encontra-se ligado ao sistema oscilatório e quando há uma oscilação no campo eletromagnético gerado pelo movimento do imã, este interage com o circuito produzindo corrente elétrica (SIMONE; CREPPE, 2010).

Faraday, em seu primeiro experimento, enrolou uma bobina e mostrou que um campo magnético em movimento poderia causar deflexão no galvanômetro, em outras palavras, um campo eletromagnético variante no tempo produz uma força eletromotriz (ϵ), com unidade em *volt* (V), que pode estabelecer uma corrente em um circuito fechado adequado (HAYT Jr.; BUCK, 2012). Se considerarmos esse caminho fechado por um enrolamento filamental de uma camada com N espiras coincidentes, ou seja, pode-se afirmar que:

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

onde ϕ é o fluxo eletromagnético que passa por qualquer uma das N espiras coincidentes.

Analizando a equação 1, existem algumas estratégias para se obter uma maior força eletromotriz (ϵ), sendo que algumas delas são aumentar a intensidade do fluxo ϕ que passa pelas espiras ou aumentar a taxa de variação desse fluxo, seja pelo aumento da taxa de variação do campo eletromagnético, ou ainda pelo aumento da intensidade do campo eletromagnético.

Outra estratégia seria aumentar o número N de espiras coincidentes. Neste caso, outro conceito de extrema importância para o entendimento do transdutor é a autoindutância, ou simplesmente indutância, que é a capacidade de um condutor induzir tensão em si mesmo quando a corrente varia. A indutância frequentemente é associada ao símbolo L e sua unidade é *henry* (H) (FRENZEL Jr., 2016). A Equação 2 apresenta a definição de indutância:

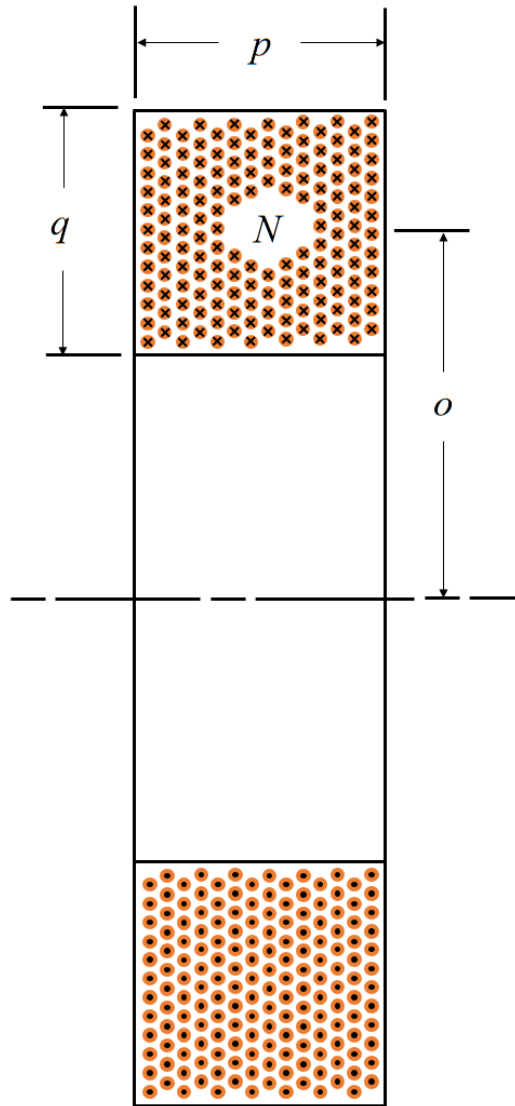
$$L = \frac{v_L}{di/dt} \quad [H] \quad (2)$$

onde v_L é a tensão induzida, di a variação de corrente e dt é a variação do tempo.

Além disso, quando se constrói um indutor, a indutância vai depender de como a bobina é enrolada (FRENZEL Jr., 2016). Quando se trata de bobinas com um número elevado de espiras, uma das estratégias é construí-la em multicamadas. Wheeler, em seus estudos, apresentou uma fórmula para calcular a indutância em bobinas multicamadas. A Equação 3 mostra esse cálculo e a Figura 12 mostra as referências das dimensões para esse cálculo (WHEELER, 1928).

$$L = \frac{0.8o^2N^2}{6o + 9p + 10q} \quad [\mu H] \quad (3)$$

Figura 12 – Dimensões de referência de uma bobina com multicamadas.



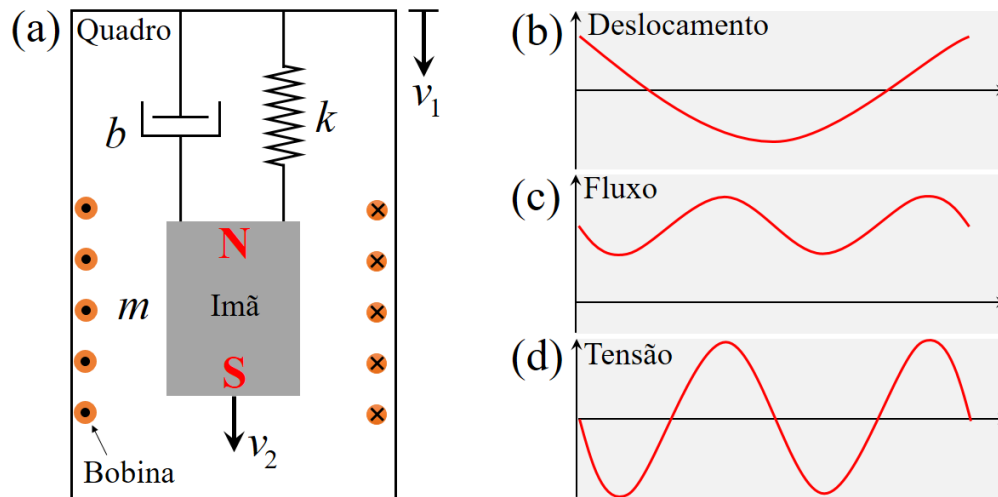
Fonte: Adaptado de (WHEELER, 1928).

onde o é a distância entre o raio central da bobina e a metade de seu enrolamento, p é o tamanho do enrolamento da bobina correspondendo entre o raio de início do enrolamento e o raio final do enrolamento e q é a largura da bobina.

O modelo clássico de um transdutor eletromagnético consiste em um ímã com massa m , uma mola com constante elástica k , um amortecedor com fator de amortecimento b e uma bobina com indutância L , como mostra a Figura 13 (CHENG; ARNOLD, 2009). Essa estrutura, quando excitada por uma força, faz com que o ímã se movimente, adquirindo uma velocidade relativa, gerando a interação entre ímã e bobina, o que causa a mudança de fluxo eletromagnético, consequentemente gera tensão induzida. Para converter esta

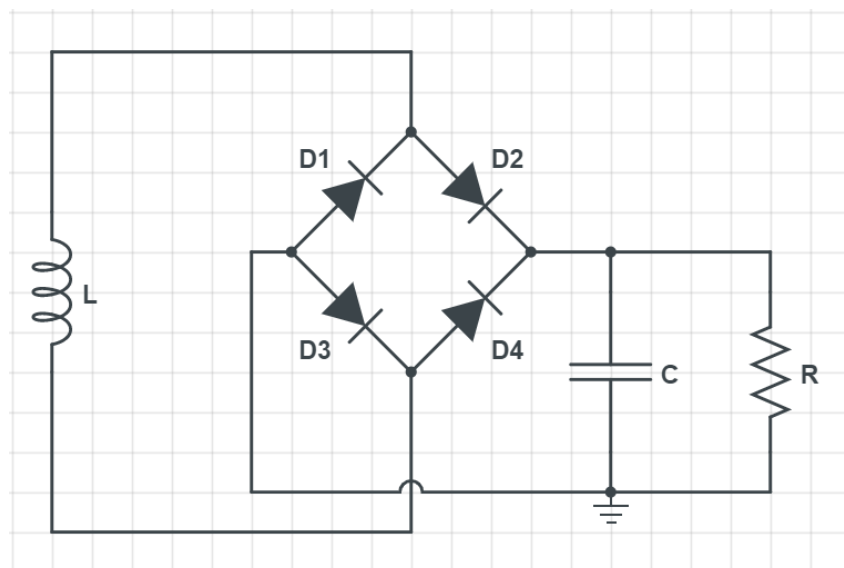
tensão, que é alternada, em tensão contínua utiliza-se um retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo (WICKENHEISER, 2011), como mostra a Figura 14.

Figura 13 – (a) Diagrama esquemático de um coletor de energia eletromagnético típico, (b) ilustrações qualitativas do movimento mecânico, (c) formas de onda de fluxo magnético e (d) de tensão elétrica correspondentes.



Fonte: Adaptado de (CHENG; ARNOLD, 2009).

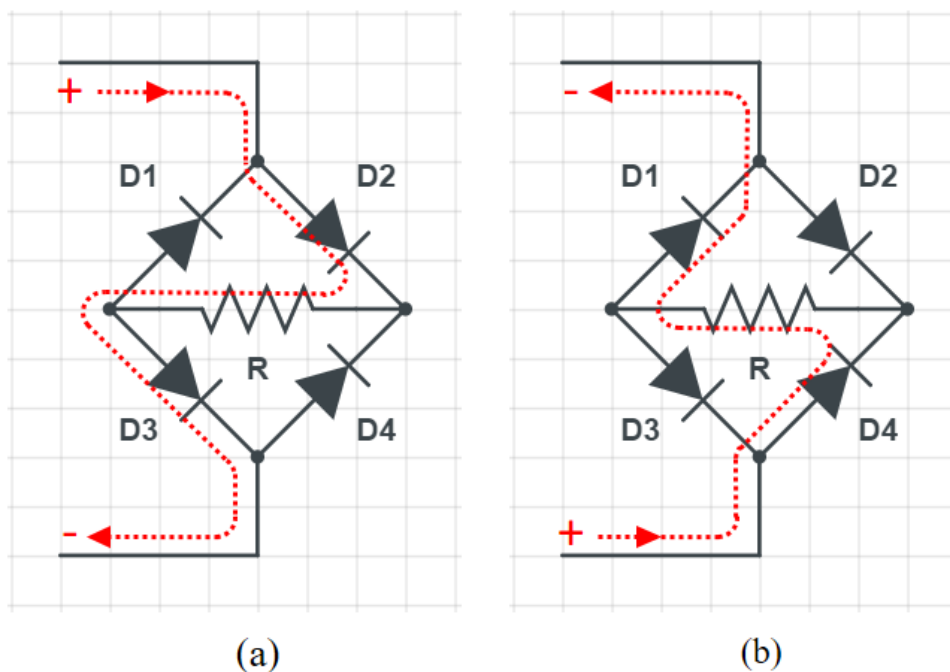
Figura 14 – Retificador de onda completa em ponte com capacitor de filtro.



Fonte: Adaptado de (BATES; MALVINO, 2007).

Neste circuito, o diodo D2 e D3 conduzem durante o semiciclo positivo, e D1 e D4 conduzem no semiciclo negativo, como ilustra a Figura 15. Assim, este circuito produz uma tensão positiva no resistor (BATES; MALVINO, 2007). Além disso, devido a característica pulsante da saída produzida pelo retificador, uma forma de se reduzir as variações de tensão é conectar um capacitor em paralelo com o resistor de carga, este capacitor é denominado capacitor de filtro (SEDRA.; SMITH, 2007).

Figura 15 – Caminhos de condução considerando (a) polaridade positiva e (b) polaridade negativa.



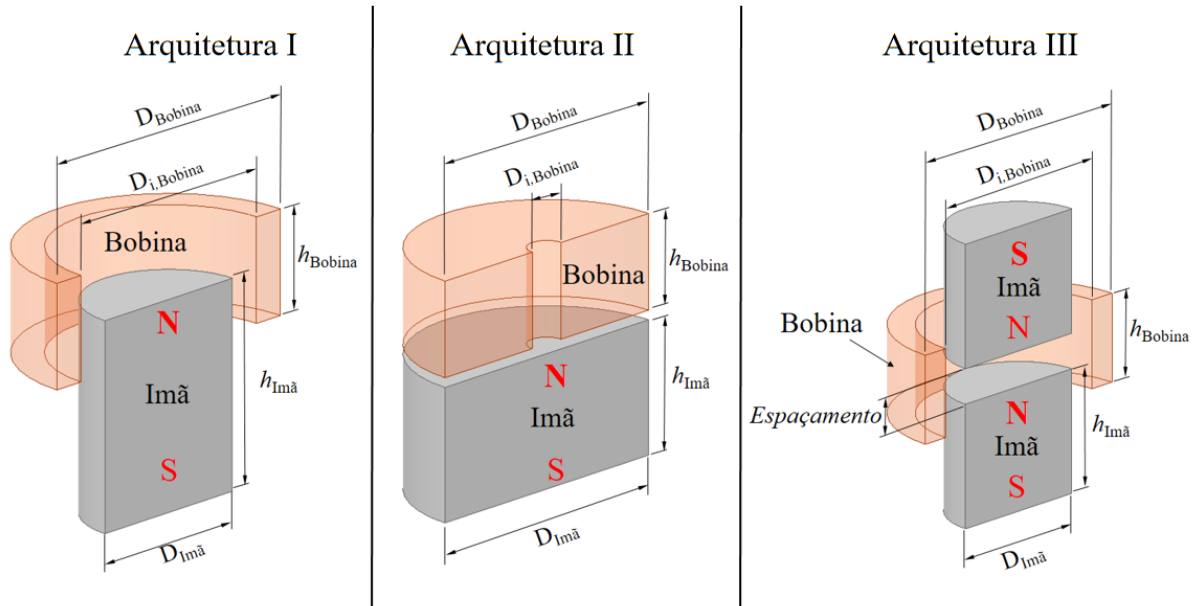
Fonte: Adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Após o entendimento dos princípios de funcionamento de conversores eletromecânicos de energia, a literatura apresenta algumas arquiteturas para estes conversores, logo a próxima seção é destinada a apresentar essas arquiteturas.

3.1 Arquiteturas e configurações

Muitos centros de pesquisa têm estabelecido e aplicado diferentes arquiteturas para os transdutores eletromagnéticos. Dentre as diversas arquiteturas, têm-se as denominadas "Imã em linha com a bobina" (SPREEMANN; FOLKMER; MANOLI, 2008), que são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Arquiteturas de transdutores com ímãs em linha.

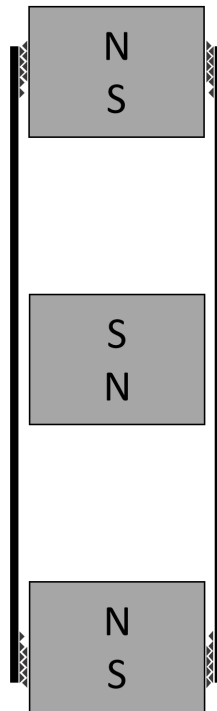


Fonte: Adaptado de (SPREEMANN; FOLKMER; MANOLI, 2008).

A Arquitetura I é a que mais se aproxima do modelo clássico de transdutor eletromagnético, com um ímã movimentando-se no interior de uma bobina. Já na Arquitetura II, a mesma utilizada no modelo de sistema aeroelástico da Figura 2, o ímã não se movimenta no interior da bobina e a variação no fluxo eletromagnético ocorre somente pela aproximação do ímã. Na Arquitetura III, dois ímãs movimentam-se no interior de uma bobina, dispostos com polos que se repelem, havendo a necessidade de um espaçamento entre eles em consequência das forças de repulsão.

Além da disposição dos ímãs, a literatura apresenta outras configurações que podem ser implementadas no modelo experimental. Dentre essas configurações, a Figura 17 exhibe um modelo que otimiza o movimento do ímã e sua frequência de oscilação (MANN; SIMS, 2009). Este utiliza forças restauradoras não lineares para customizar a frequência de oscilação do transdutor. Basicamente, ímãs fixos são inseridos nas extremidades do transdutor, de forma a causar uma repulsão no ímã móvel. Essa repulsão ocorre porque ímãs são dispostos com os polos se repelindo.

Figura 17 – Esquema do modelo para melhor aproveitamento do movimento do ímã por forças restauradoras não lineares



Fonte: Adaptado de (MANN; SIMS, 2009)

Com o entendimento e apresentação das arquiteturas dos transdutores eletromagnéticos, o próximo capítulo expõe brevemente conceitos sobre sistemas dinâmicos e algumas abordagens qualitativas para estudo desses sistemas, sendo necessário para análise do transdutor e sistema aeroelástico.

4 SISTEMAS DINÂMICOS

Após o entendimento dos conceitos preliminares para o estudo dos fenômenos do transdutor eletromagnético, também é necessário a compreensão sobre sistemas dinâmicos, pois estes conceitos serão utilizados nas análises dos sinais obtidos. Logo, este capítulo descreverá brevemente sobre sistemas dinâmicos lineares e não lineares, introduzindo conceitos como oscilações harmônicas, ciclo limite, espaço de estados, entre outros.

4.1 Sistemas dinâmicos lineares

Um sistema é dito dinâmico quando o sistema evolui no tempo, podendo ser representado por equações diferenciais (STROGATZ, 2014), tais como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n) \end{aligned} \tag{4}$$

onde $\dot{x}_i \equiv dx_i/dt$ são estados do sistema, ou seja, denota-se a diferenciação com respeito a t .

Em se tratando de sistemas dinâmicos lineares, as funções $f_i(\cdot)$ possuem somente termos de primeira ordem. Logo, se as funções não forem lineares o sistema também não será (VASCONCELLOS, 2007). Para exemplificar, considere um oscilador harmônico amortecido linear, modelado como segue:

$$\ddot{x} = -\frac{b}{m}\dot{x} - \frac{k}{m}x \tag{5}$$

Assumindo $x_1 = x$ e $x_2 = \dot{x}$, a equação 5 pode ser reescrita como segue:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b}{m}x_2 - \frac{k}{m}x_1 \end{aligned} \tag{6}$$

onde m é a massa, b o coeficiente de atrito viscoso e k é a constante elástica. Neste caso, o sistema é linear pois x_i , do lado direito da equação, apresenta somente a primeira ordem (CARVALHO, 2018; STROGATZ, 2014).

4.2 Sistemas dinâmicos não-lineares

Por outro lado o sistema pode ser não linear, neste caso alguns termos aparecem tipicamente em suas equações como produtos, potências, funções de x_i , como $x_1, x_2, (x_1)^3$, ou $\cos x_2$ (STROGATZ, 2014).

Exemplificando, a equação que rege a oscilação de um pêndulo é dada por:

$$\ddot{x} + \frac{g}{L} \sin x = 0 \quad (7)$$

onde g é a aceleração da gravidade, L é o comprimento do pêndulo e neste caso x é o ângulo do pêndulo em relação a vertical. O sistema equivalente pode ser descrito como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{L} \sin x_1 \end{aligned} \quad (8)$$

Outro ponto a se destacar é o princípio da superposição. Este diz que as respostas $Y_1(t)$ e $Y_2(t)$ tendo em conta os sinais de entrada arbitrários e independentes $X_1(t)$ e $X_2(t)$, respectivamente, na forma $\alpha X_1(t) + \beta X_2(t)$, terão superposição de sinais $\alpha Y_1(t) + \beta Y_2(t)$ com quaisquer valores constantes de α e β , sendo dependentes das condições iniciais, ou seja, o comportamento do sistema é definido levando em conta a simultaneidade dos sinais (CARVALHO, 2018; WORDEN; TOMLINSON, 2001).

Desse modo, ainda podem ser citados alguns comportamentos típicos de sistemas não lineares como oscilações harmônicas, sub-harmônicas e quase periódicas. Neste caso, em consequência do princípio da superposição, a saída de um sistema linear estável será periódica e com mesma frequência quando submetido à ação de um sinal periódico. Por outro lado, sistemas lineares podem ter respostas com oscilações periódicas, ou quase periódicas, ou com frequências múltiplas ou sub-múltiplas do sinal imposto (CARVALHO, 2018; WORDEN; TOMLINSON, 2001).

Outro caso é quando há mudanças abruptas no sistema, denominada bifurcações, ou seja, ocorre a alteração de um regime dinâmico para outro, modificando a estabilidade do sistema, de acordo com as condições iniciais. Geralmente essas bifurcações estão associadas a outros fenômenos, como o caos. Este caracteriza-se pela imprevisibilidade na evolução de um sistema determinístico, a partir de um certo tempo (CARVALHO, 2018; STROGATZ, 2014).

Outro fenômeno inerente em sistemas não-lineares é o ciclo limite. Este representa trajetória fechada isolada, tendo em mente que isolado significa que as trajetórias vizinhas não são fechadas, ou seja, elas formam espirais para perto ou longe do ciclo limite (STROGATZ, 2014). Para exemplificar a Figura 18 mostra as possíveis trajetórias e suas classificações.

Figura 18 – Ciclos limite.



Fonte: Adaptado de (STROGATZ, 2014)

Se as trajetórias vizinhas se aproximarem do ciclo limite, quer dizer que o ciclo é estável. Por outro lado, o ciclo limite é instável ou semi-estável. É importante ressaltar que ciclos limites estáveis têm relevância científica, pois modelam sistemas que exibem oscilações auto-sustentadas, ou seja, oscilam mesmo na ausência de forças periódicas externas (STROGATZ, 2014).

Muitas vezes sistemas lineares e não lineares possuem considerável complexidade para serem analisados de forma analítica, deste modo utiliza-se um método gráfico para estudo destes sistemas. A construção de um espaço abstrato com coordenadas $(x, \dot{x})$ e soluções $(x_1(t), x_2(t))$, correspondendo a um ponto que se move em uma curva, resulta em várias curvas que mostram as trajetórias do comportamento do sistema em um espaço bidimensional, denominado espaço de estados (CARVALHO, 2018; STROGATZ, 2014; VASCONCELLOS, 2007). Neste espaço de estados é possível identificar, por exemplo, fenômenos já descritos como o ciclo limite. Além disso, muitas vezes é necessário extrair mais de uma informação do espaço de estados, onde geralmente se realiza a sua reconstrução.

4.3 Reconstrução do espaço de estados

Para análise de um experimento, habitualmente faz-se a aquisição somente da evolução temporal de uma variável, ou seja, não é possível obter todas as variáveis do sistema. Deste modo, a reconstrução de espaço de estados é uma técnica que se usa para extrair informações sobre a dinâmica do sistema, sendo baseado no teorema de imersão de Takens (1981) (VASCONCELLOS, 2007).

A literatura apresenta algumas técnicas de reconstrução de espaço de estados, podendo-se citar o método das coordenadas defasadas (MOD) (RUELLE, 1979; PACKARD et al., 1980; TAKENS, 1981), sendo eficiente para séries temporais livres de ruído, e a decomposição em valores singulares (SVD) (BROOMHEAD; KING, 1986; VASCONCELLOS, 2007), que dispensa a determinação do tempo de defasagem e através da dimensão da imersão determinada.

No método SVD, o sinal é filtrado durante o processo de reconstrução, sem apresentar distorções, utilizando-se das coordenadas das propriedades da matriz de covariância o que gera coordenadas descorrelacionadas (VASCONCELLOS, 2007), o que pode possibilitar uma análise mais precisa do sinal.

A partir dos conceitos abordados, o próximo capítulo é destinado à apresentação dos materiais e métodos que foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

5 Materiais e métodos

A proposta consiste em analisar experimentalmente um coletor de energia para ser acoplado em um sistema aeroelástico, utilizando um sistema de indução eletromagnético, ou transdutor eletromagnético.

A fim de entender os fenômenos associados ao estudo do transdutor, utilizou-se o software ANSYS Maxwell. Este utiliza o método de elementos finitos para resolução das equações de Maxwell, Lei de Faraday, Lei de Gauss e Lei de Ampere para resolver problemas envolvendo eletrostática, magnetostática, corrente parasita e transiente magnético, sendo apresentadas abaixo, respectivamente (ANSYS, 2019; DEUS JÚNIOR et al., 2017):

$$\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla B = 0 \quad (10)$$

$$\nabla H = J \quad (11)$$

onde E é a força do campo elétrico, B é a densidade do fluxo magnético, H é a força do campo magnético e J é a densidade da corrente elétrica. Por padrão o software utiliza como unidade fundamental dos elementos finitos o tetraedro e armazena os valores dos vértices e pontos médios para interpolação com os valores nodais (FU; HO; CHEN, 2010; DEUS JÚNIOR et al., 2017). Portanto, para as análises, modelos e configurações diferenciadas de geração de energia por indução eletromagnética foram testadas e avaliadas qualitativamente.

Com relação ao cálculo de energia gerada, a literatura geralmente apresenta a geração de energia em função da potência eficaz do sistema, que é calculada a partir do valor de tensão eficaz, porém o conceito de energia nos remete a uma unidade de energia e não de potência. Portanto, para as análises, adotou-se principalmente a energia gerada com base no cálculo feito das áreas das curvas de potência instantânea por tempo, com unidade Ws .

Para análise de convergência nos resultados, modificou-se vários parâmetros no software, como o passo de iterações e divisões na malha para o método de elementos finitos, porém essas modificações não alteraram qualitativamente os resultados encontrados e,

por outro lado, demandavam um grande processamento computacional. Portanto, para os resultados apresentados no trabalho utilizou-se as configurações padrões do software, pois demonstraram ser mais eficientes do ponto de vista de tempo e processamento computacional.

Além disso, também foram utilizados valores padrões da biblioteca do software ANSYS Maxwell para os materiais como cobre, ar e NdFe35, definindo assim as condições de contorno.

Considerando os fatos citados e, ainda sobre a avaliação qualitativa feita em software, selecionou-se a arquitetura com maior geração de energia, onde foi feito um estudo paramétrico sobre ela.

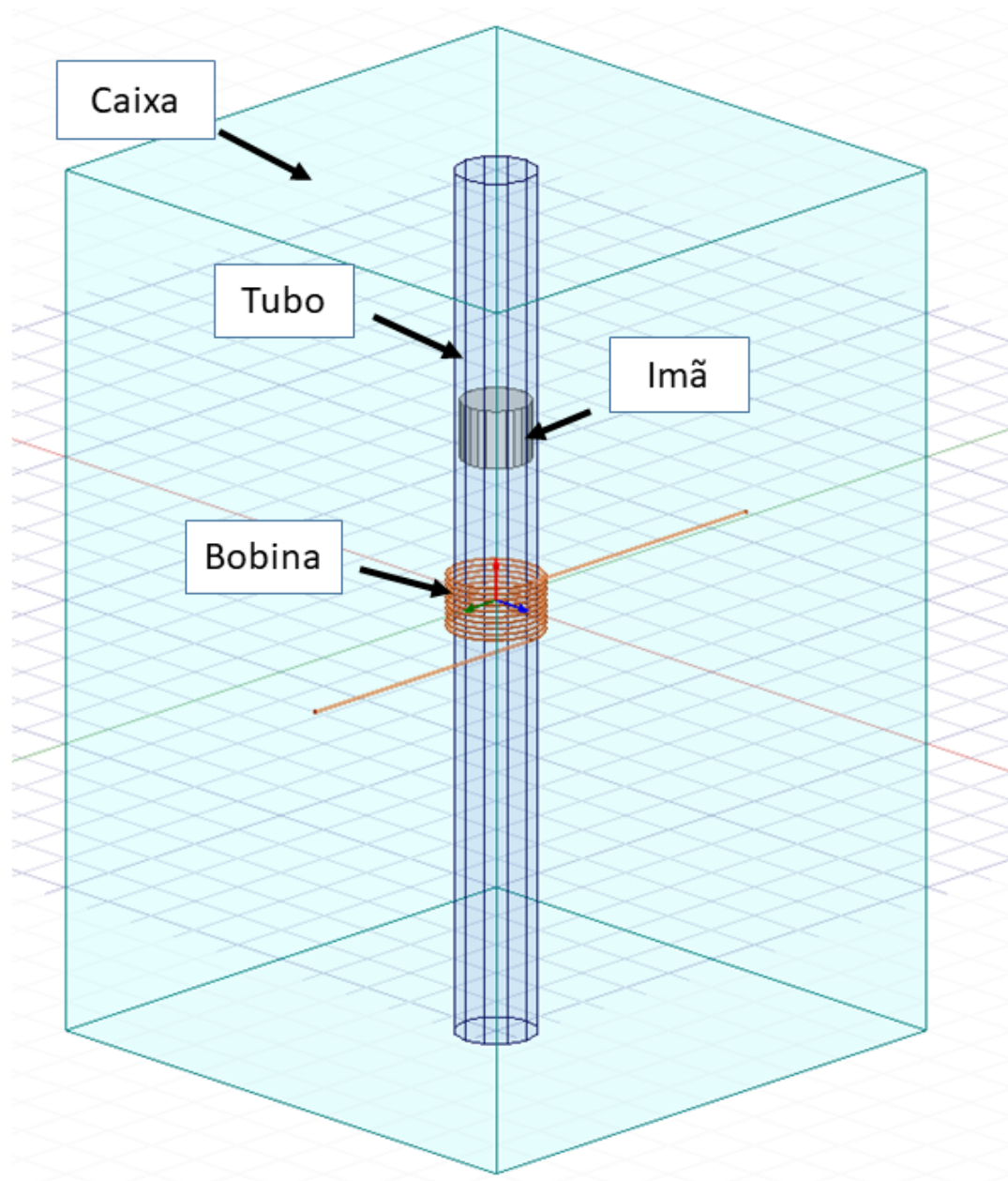
Com intuito de verificar os comportamentos observados em software, foi construído um aparato experimental, sendo feito alguns estudos sobre o mesmo. Dessa forma, as próximas seções são destinadas ao detalhamento metodológico de todos os processos para obtenção dos resultados.

5.1 Análise das arquiteturas

Considerando o coletor de energia no sistema aeroelástico, as arquiteturas I e III são mais interessantes, pois permitem uma maior liberdade de configurações e são mais aplicáveis, visto a baixa frequência e alta amplitude da oscilação, características do fenômeno de estol dinâmico. Especificamente sobre a arquitetura II, esta é limitada pela característica física da aproximação do imã, o que demanda um estudo mais aprofundado e um maior controle sobre essas amplitudes para se obter uma maior performance do sistema, já que ele depende de amplitudes específicas nas oscilações.

Portanto, a Figura 19 apresenta as configurações iniciais para a simulação e avaliação das arquiteturas.

Figura 19 – Configurações iniciais para simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Primeiramente criou-se uma caixa de ar com 100 mm de largura, 100 mm de comprimento e 150 mm de altura. Também há um tubo de ar com 7 mm de raio e 150 mm de comprimento onde o ímã percorre. Já a bobina, foi construída em fio de cobre de 29 AWG, com 8 mm de diâmetro, 10 mm de comprimento, 10 voltas e está conectada a uma carga de resistiva de 100 Ω . Os ímãs são de NdFe35 e possuem 6 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, se movendo a 50 mm/s relativamente à bobina com velocidade (v). Essas dimensões e parâmetros foram adotados arbitrariamente, pois a principal intenção era avaliar qualitativamente e entender os fenômenos envolvidos nas diferentes arquiteturas.

Também, ressalta-se que os passos para iterações foram de 0,2s, passos menores não apresentaram mudanças significativas nos sinais e demandavam muito processamento computacional, fato que também ocorreu com a divisão da malha, portanto para esta, foram utilizadas as padrões do software.

A fim de possibilitar uma maior geração de energia pelo transdutor eletromagnético, é fundamental que uma análise paramétrica da influência na dimensão do espaçamento seja feita. Assim, considerou-se as mesmas configurações adotadas nos estudos anteriores, ou seja, uma bobina fixa com condutor de cobre 29 AWG, enrolamento com 8 mm de diâmetro, 10 mm de comprimento, 10 voltas, e uma carga de $100\ \Omega$, cada ímã possuindo características idênticas, sendo 10 mm de comprimento, 6 mm de diâmetro, movendo-se com velocidade relativa à bobina de 50 mm/s e de material NdFe35.

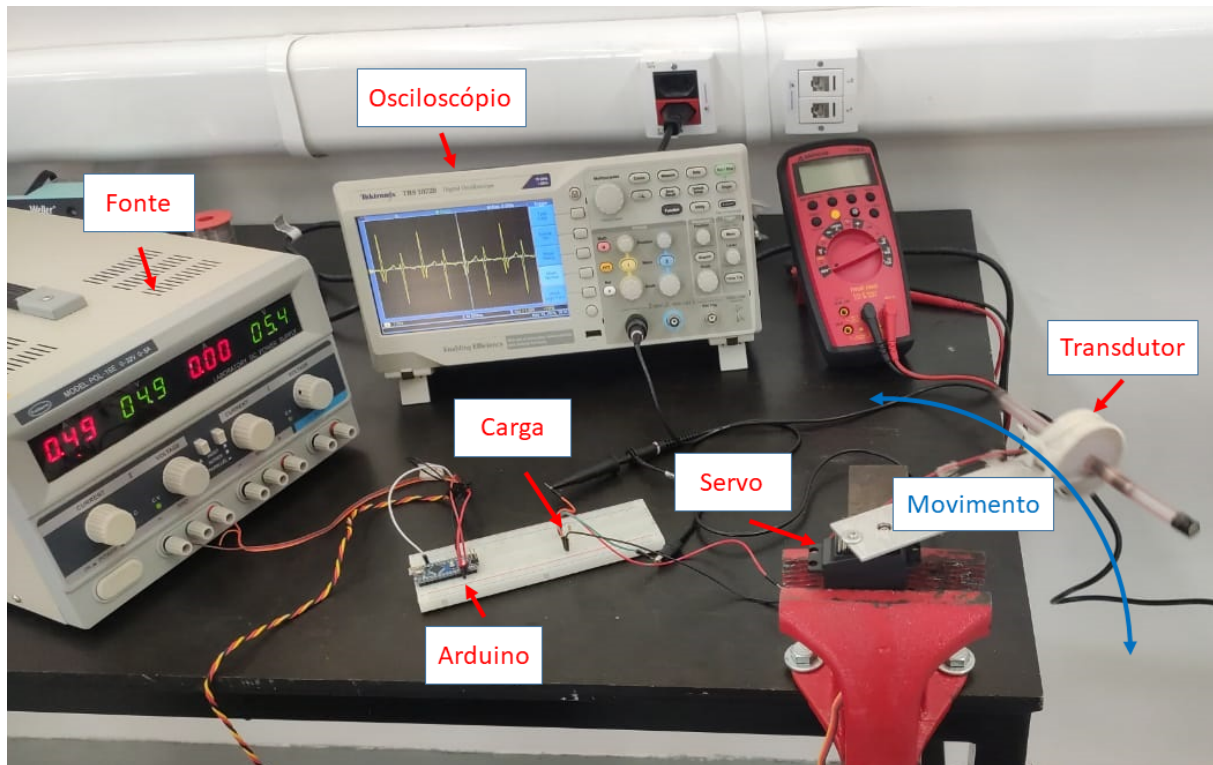
5.2 Análise experimental do transdutor eletromagnético

Após a modelagem no software ANSYS Maxwell e entendimento do comportamento das arquiteturas dos transdutores em relação ao fluxo eletromagnético, tensão gerada na bobina, potência instantânea e energia gerada, uma análise experimental foi feita, a fim de verificar se os resultados obtidos nas simulações eram reprodutíveis.

Para as análises experimentais foram utilizadas uma bobina construída com as seguintes características 83,7 mH, largura 10 mm e fio de cobre 29 AWG, sendo presa por um suporte regulável a 11 cm do eixo do servo, e ímãs de Neodímio N51 com 10 mm de comprimento, 6 mm de diâmetro e aproximadamente 2,15 g de massa. Os ímãs percorrem um tubo circular de 0,7 mm de diâmetro e 13 cm de comprimento. Nas extremidades do tubo foram dispostos ímãs de forma a restringir o movimento por forças restauradoras, porém o estudo da influência desses ímãs poderá ser realizada em trabalhos futuros. Ainda, o tubo foi preso por uma haste acoplada a um servo motor, o qual foi controlado por um microcontrolador arduino, que reproduz o movimento oscilatório de um aerofólio em estol dinâmico cujos dados coletados experimentalmente.

Já os dados da tensão induzida na bobina foram aquiritados por meio de um Osciloscópio Tektronix TBS1072B e uma carga de $968\ \Omega$. A Figura 20 mostra o aparato experimental para comparação dos resultados obtidos por simulação das configurações estudadas para o transdutor eletromagnético.

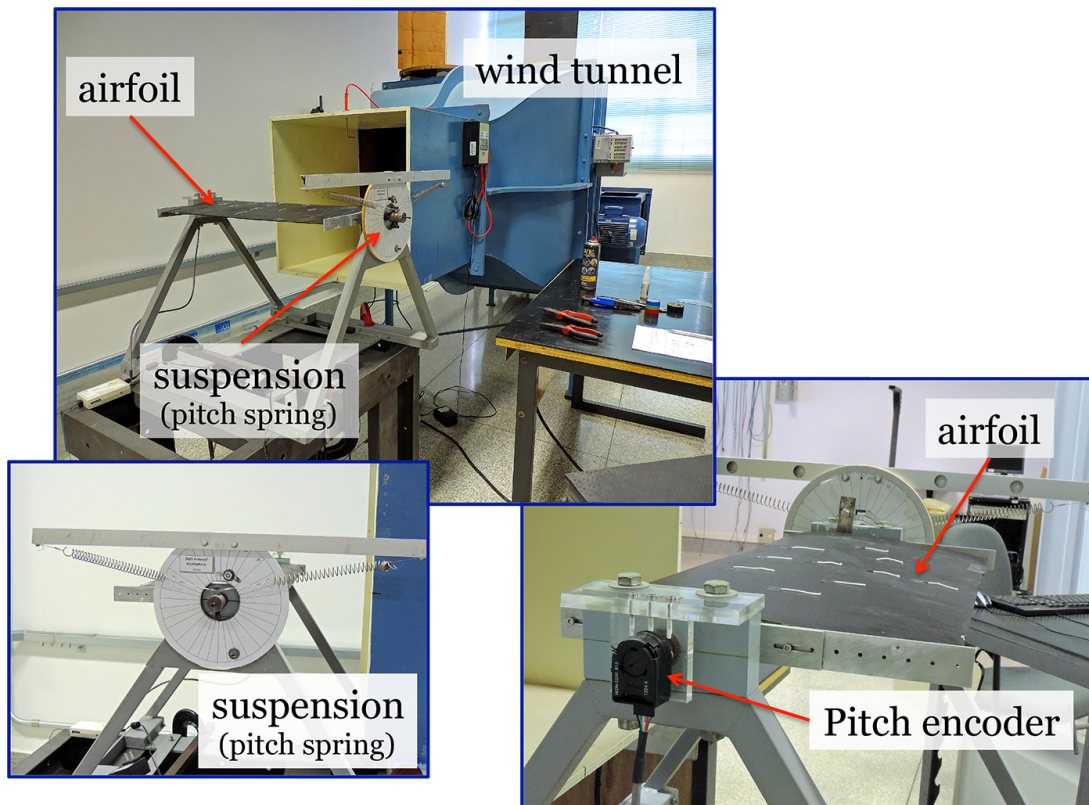
Figura 20 – Aparato experimental para comparação dos resultados obtidos por simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A série temporal utilizada para o movimento oscilatório foi disponibilizada por Rui G. de VASCONCELLOS (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016) e obtida a partir de dispositivo experimental. Este dispositivo é composto por um aerofólio rígido apoiado em ambos os lados por rolamentos, a fim de somente permitir o movimento de arfagem (*pitching motion*). Ainda, o movimento é restringido pela reação elástica de um arranjo de molas, como mostra na Figura 21 (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016).

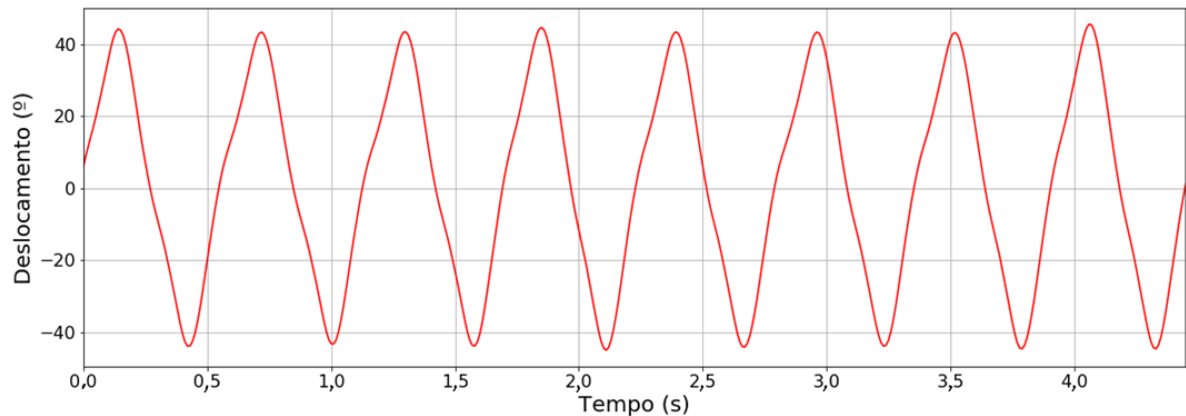
Figura 21 – Aparato referente ao experimento onde foi obtido o movimento oscilatório do servo.



Fonte: (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016)

Além disso, o sistema permite ajustes de ângulo de incidência e é exposto ao escoamento de um túnel de vento, com seção de saída 0,5 m x 0,5 m, considerando uma velocidade máxima aproximada de 23 m/s. O aerofólio consiste em um perfil NACA 0012, com 56,5 cm envergadura, corda de 26,5 m e massa 0,512 kg. Essas características atribuíram ao sistema uma frequência natural de 2,499 Hz, revelada em resposta à impulsos. Especificamente para experimento, onde foi coletado o sinal para o servo motor, foi utilizado um ângulo de ataque inicial de 0° e velocidade do escoamento de 16,92 m/s (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016). Dessa forma, a Figura 22 mostra a série temporal do movimento oscilatório que foi enviada ao servo.

Figura 22 – Série temporal do movimento oscilatório do servo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a coleta de dados de tensão e comparações quantitativas entre as configurações estudadas, foram realizadas análises qualitativas sobre a possível influência que o transdutor terá no sistema aeroelástico.

5.3 Análise qualitativa da influência do transdutor no sistema aeroelástico

Para verificar uma possível influência do movimento do transdutor em relação ao sistema aeroelástico, um estudo sobre as frequências desses sinais foi realizada, utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT - do inglês *Fast Fourier Transform*). Após isso, outra análise a se fazer para o entendimento do sistema é verificação do espaço de estados tanto do sinal enviado ao servo motor, quanto da tensão no transdutor.

Ainda, com objetivo de melhor avaliar o sistema e espaço de estados no sinal do transdutor, foi aplicado o método SVD com uma frequência de corte em 30 Hz, sendo que para esta aplicação utilizou-se algoritmo em linguagem Python e biblioteca Numpy (NUMPY, 2019). Após realizados todos os procedimentos, o próximo capítulo apresenta e discute os resultados obtidos no trabalho.

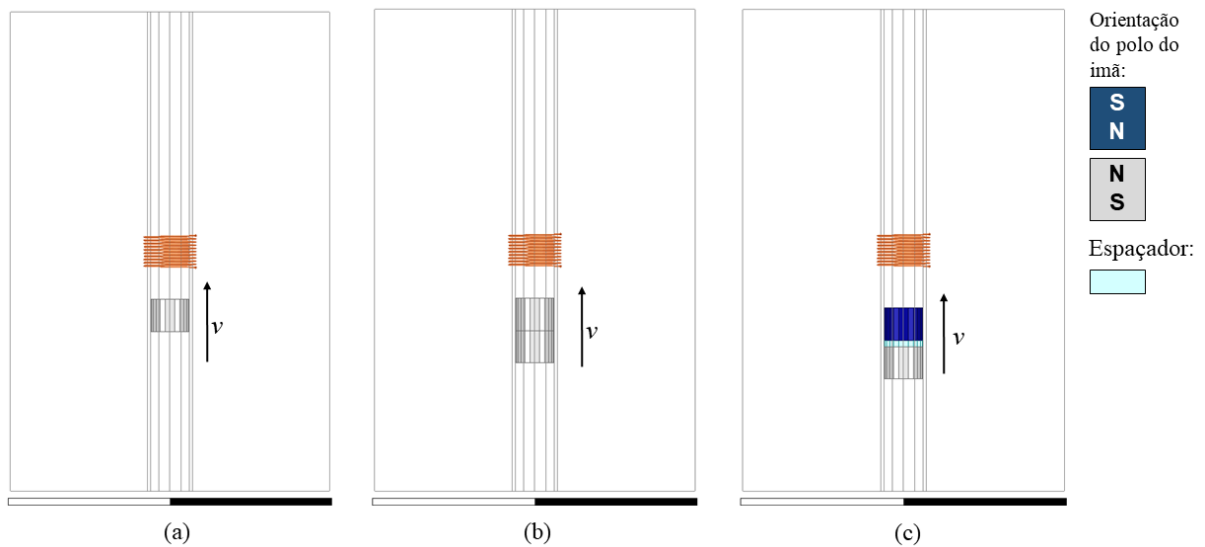
6 RESULTADOS

A partir dos métodos antes detalhados, este capítulo destina-se à apresentação dos resultados obtidos tanto pelo software ANSYS Maxwell, tanto experimentalmente. Ao final, é apresentado o estudo qualitativo da possível influência que o transdutor eletromagnético terá no sistema aeroelástico.

6.1 Análises preliminares das arquiteturas

Primeiramente, a Figura 23 mostra os modelos utilizados para as análises de vários aspectos das arquiteturas I e III.

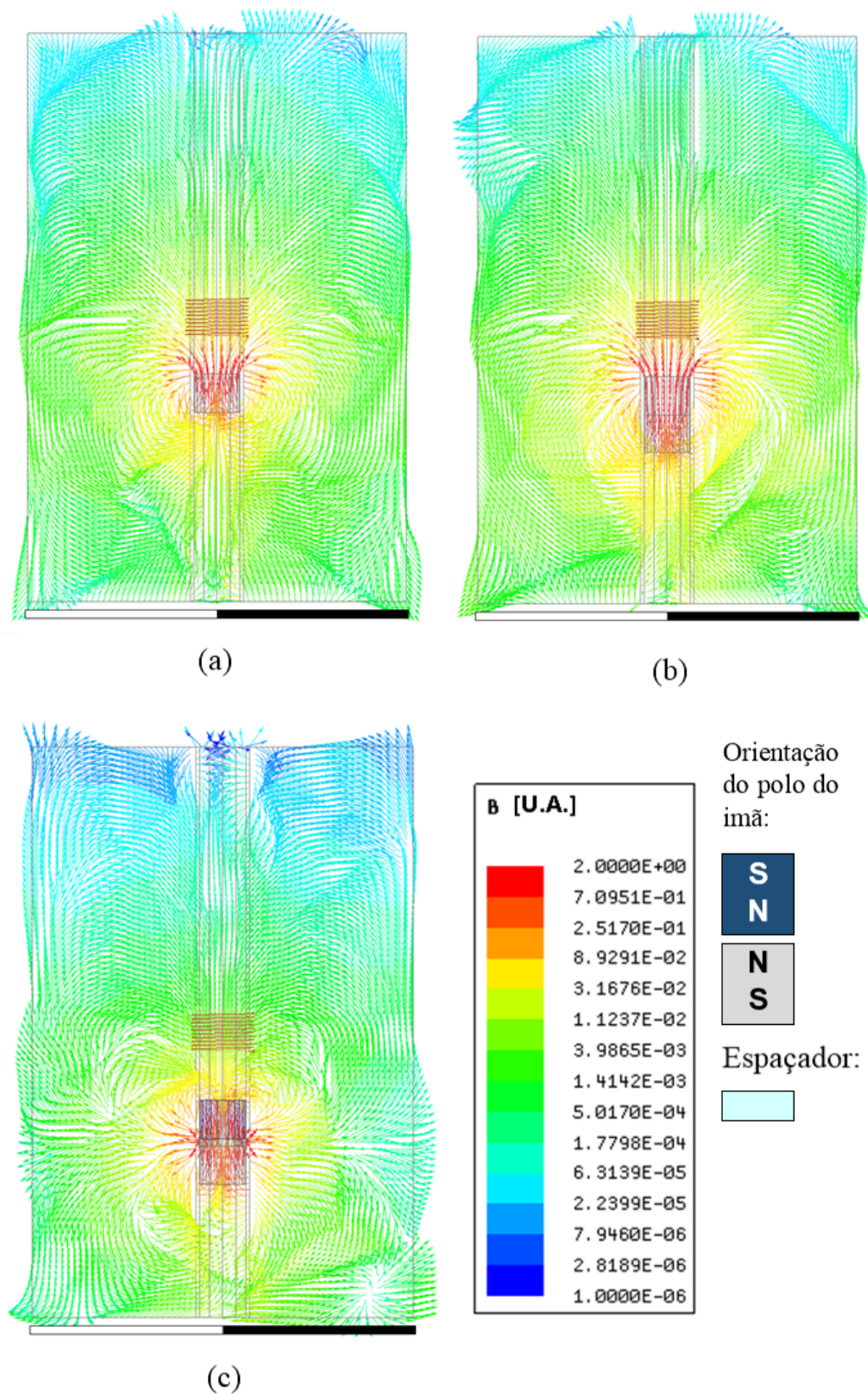
Figura 23 – Modelos para análise considerando (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.



Fonte: Adaptado de (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

Como pode-se observar, a Figura 23.a utiliza um único ímã atravessando a bobina; a Figura 23.b dois ímãs atravessando a bobina; e a Figura 23.c dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina. Já a Figura 24 apresenta as linhas de campo eletromagnético desses modelos.

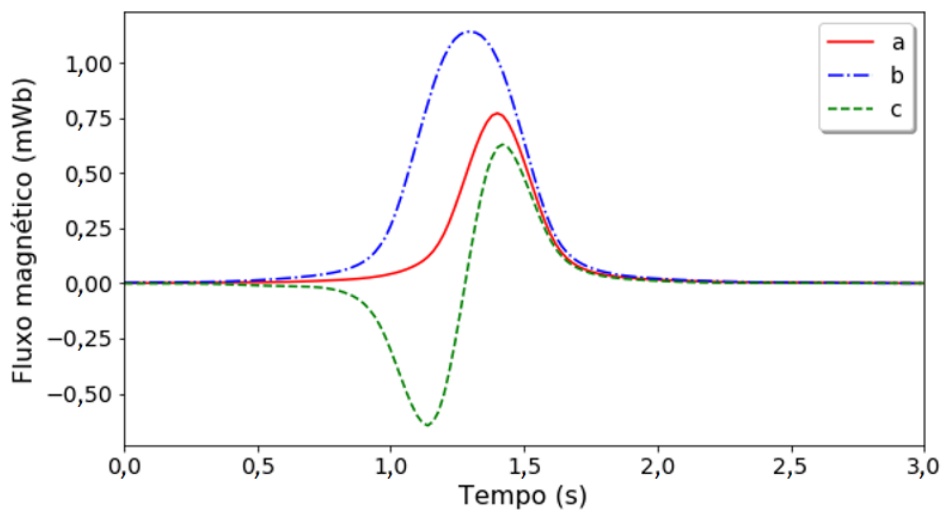
Figura 24 – Campo eletromagnético dos modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.



Com respeito a Figura 24, esta mostra uma visão sobre as linhas de campo dos modelos e de forma qualitativa as forças dessas linhas de campo. Destaca-se a Figura 24.c, onde há a representação das linhas de campo dos ímãs com os polos se repelindo e concentração do campo eletromagnético.

Em relação às análises quantitativas e considerando ainda os modelos citados acima, a Figura 25 ilustra o fluxo eletromagnético na bobina, sendo essa análise de maior relevância para o entendimento do transdutor.

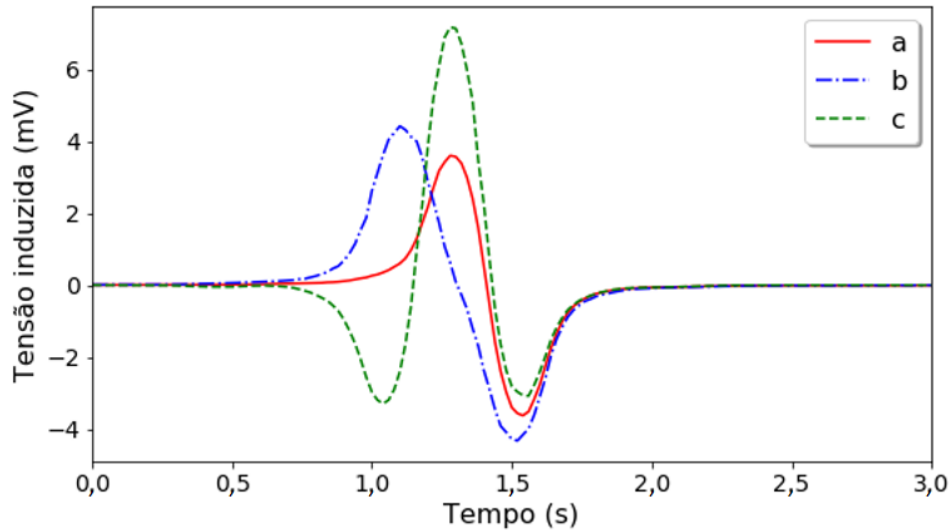
Figura 25 – Análise do fluxo eletromagnético na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.



Fonte: Adaptado de (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

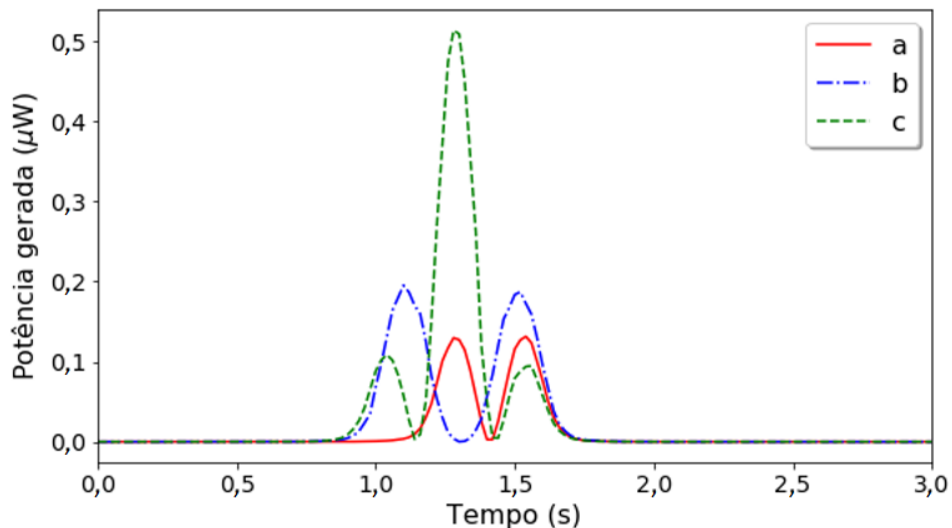
Considerando o modelo com apenas um ímã passando pela bobina (a), ao se adicionar mais um ímã ao sistema (b), nota-se um aumento na intensidade do fluxo eletromagnético e aumento no tempo de interação do campo com a bobina. Ainda, pode-se observar que quando se inverte um dos ímãs, de modo que os polos passem a se repelir (c), há também uma inversão no sentido do fluxo eletromagnético. Para analisar as consequências dessas interações, se faz necessário o estudo sobre a força eletromotriz, ou tensão gerada na bobina, representado pela Figura 26 e a potência gerada nas bobinas, conforme Figura 27.

Figura 26 – Análise da tensão na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.



Fonte: Adaptado de (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

Figura 27 – Análise da potência gerada na bobina, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 2 mm atravessando a bobina.



Fonte: Adaptado de (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

A consequência do maior tempo de interação do ímã com a bobina, caso (b), é que há uma maior geração de força eletromotriz, logo maior potência elétrica, observado pelo gráfico de potência acima. Já sobre a inversão do fluxo eletromagnético, caso (c), podem ser

observadas na Figura 26 e 27 que a taxa de variação no fluxo é intensificada, e de acordo com a equação 1, Lei de Faraday, há uma maior tensão na bobina e consequentemente uma maior potência produzida (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

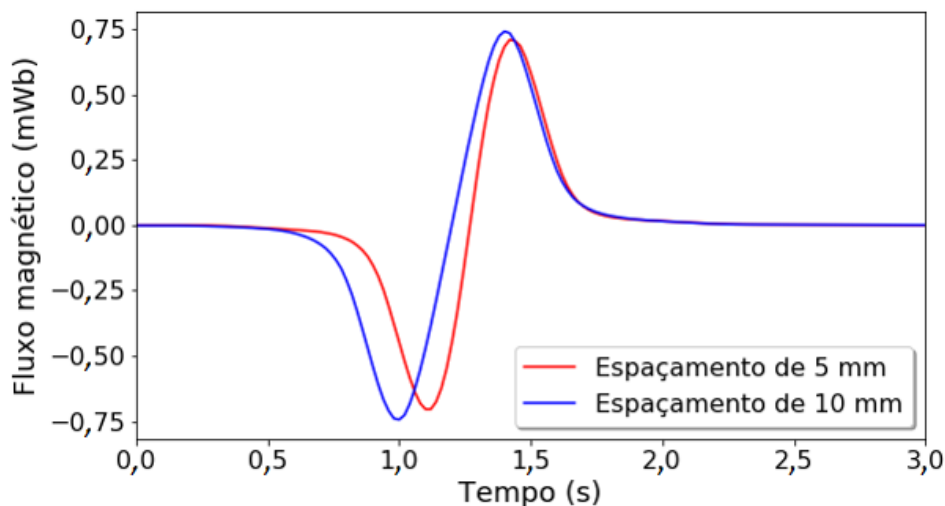
Dessa forma, o modelo (a) gerou aproximadamente $0,039 \mu\text{Ws}$, já o modelo (b) gerou $0,069 \mu\text{Ws}$ e o modelo (c) $0,100 \mu\text{Ws}$. Ou seja, com os polos se repelindo a geração de energia pode ser aumentada em aproximadamente 156,4% (JORGE FILHO; VASCONCELLOS; FERREIRA, 2019).

Portanto, considerando-se os estudos sobre a geração de energia das arquiteturas apresentadas na literatura com relação a disposição dos ímãs, o modelo em que se tem uma maior geração de energia é o com dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento entre eles. Nesse sentido, se faz necessária uma análise da influência do espaçamento entre os ímãs com os polos que se repelem na geração de energia.

6.2 Análise paramétrica do transdutor com polos que se repelem

Antes de tudo, com respeito a análise paramétrica e para um melhor entendimento, a Figura 28 mostra a influência da variação do espaçamento no fluxo eletromagnético para os valores de 5 mm e 10 mm, com objetivo de apresentar uma análise inicial dessa influência.

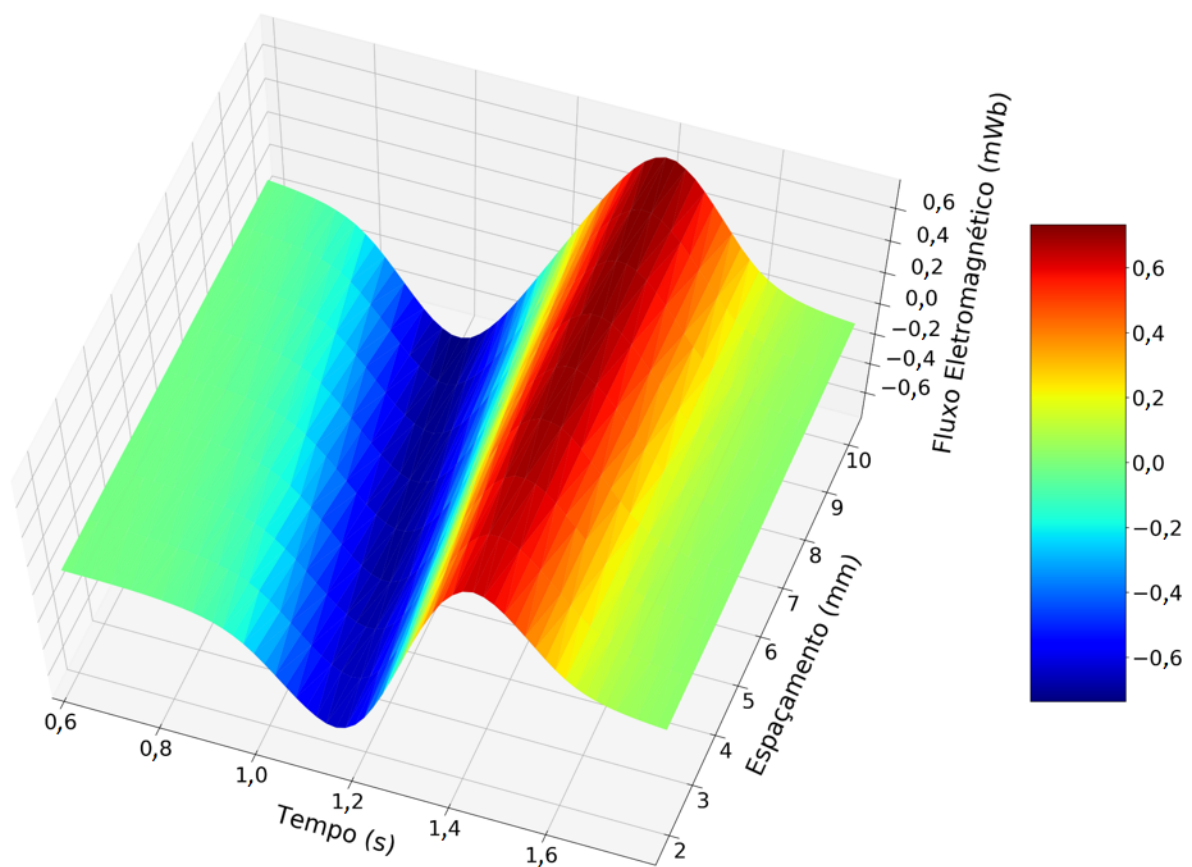
Figura 28 – Análise dos fluxos eletromagnéticos do transdutor com polos que se repelem com espaçamento de 5 mm e 10 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das curvas, verificou-se que para o espaçamento de 10 mm há maiores valores na intensidade de fluxo eletromagnético, por outro lado a variação no fluxo é menor, podendo-se observar pela inclinação das curvas apresentadas. Assim a Figura 29 revela o comportamento do fluxo para os demais espaçamentos e observa-se que o comportamento se mantém, ou seja, quanto maior o espaçamento, maiores valores na intensidade de fluxo, porém menores taxas de variação de fluxo.

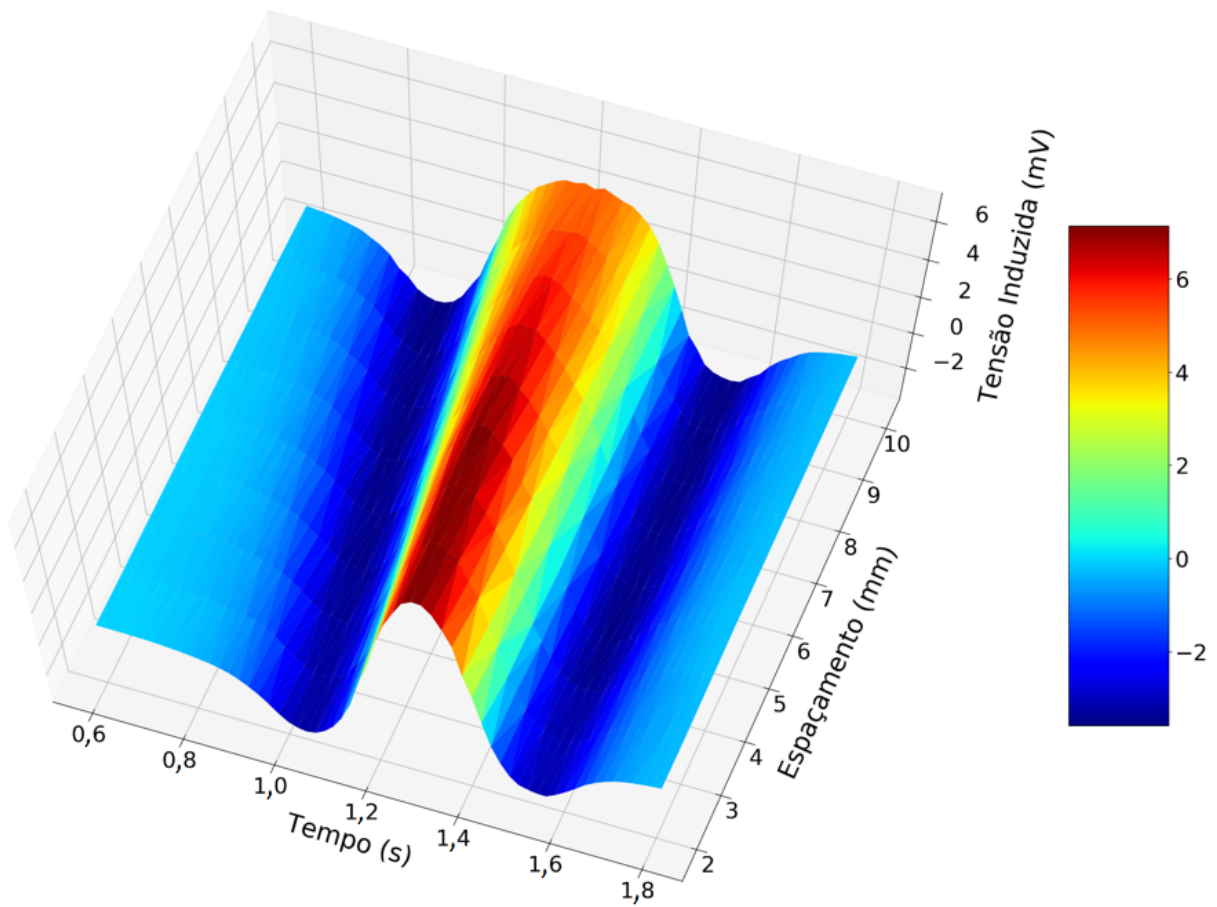
Figura 29 – Análise do fluxo eletromagnético na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para evidenciar a variação de fluxo a Figura 30 mostra a tensão induzida na bobina do transdutor utilizando dois ímãs com polos que se repelem. Observa-se que onde há maiores valores de tensão, também há maiores valores na variação do fluxo.

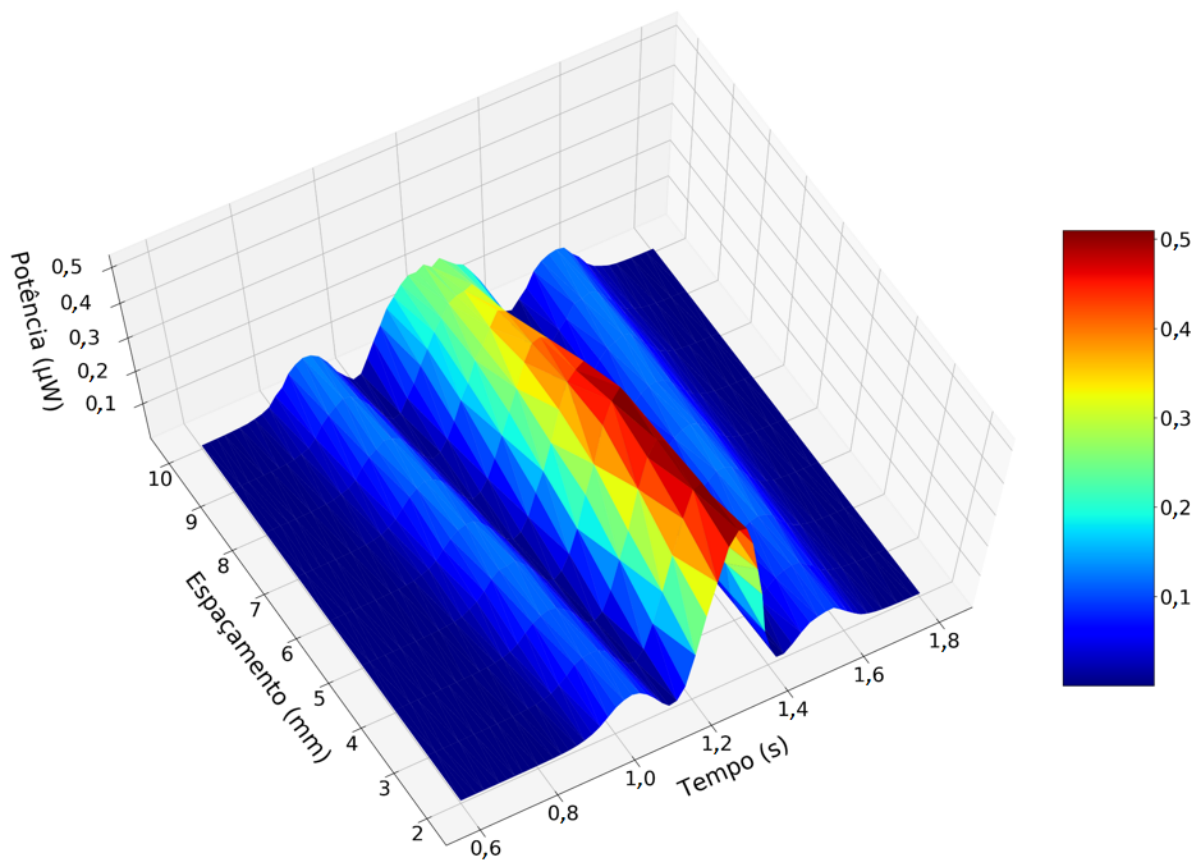
Figura 30 – Análise da tensão induzida na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar dos maiores picos de tensão estarem presentes para menores espaçamentos (3mm), há maiores picos de geração de energia em espaçamentos menores que 7 mm, como mostra a Figura 31. Porém, para o cálculo final de geração de energia, deve-se considerar a geração ao longo de todo o processo e não só os picos observados.

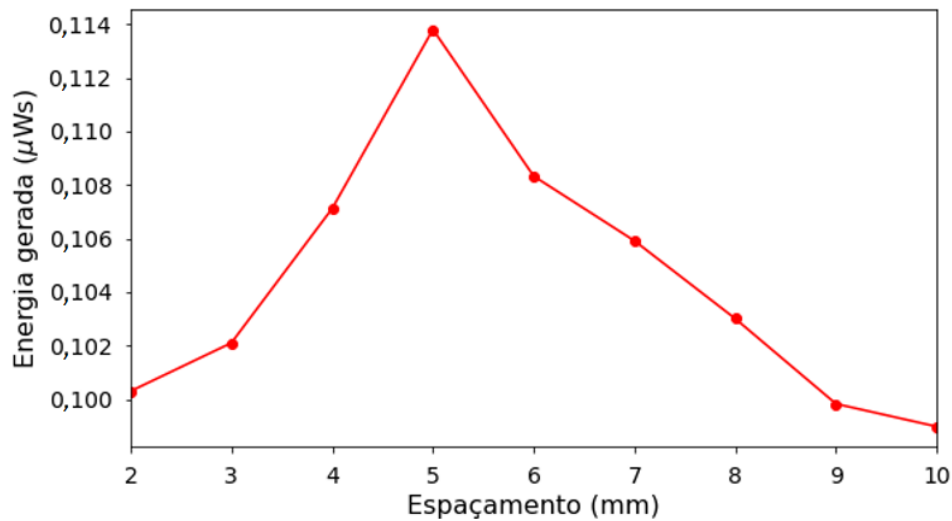
Figura 31 – Análise da energia gerada na bobina do transdutor com polos que se repelem para espaçamentos entre 2 mm e 10 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em uma análise paramétrica conclusiva, a Figura 32 apresenta uma comparação da energia gerada para cada espaçamento.

Figura 32 – Comparação da energia gerada no transdutor com polos que se repelem conforme a variação do espaçamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

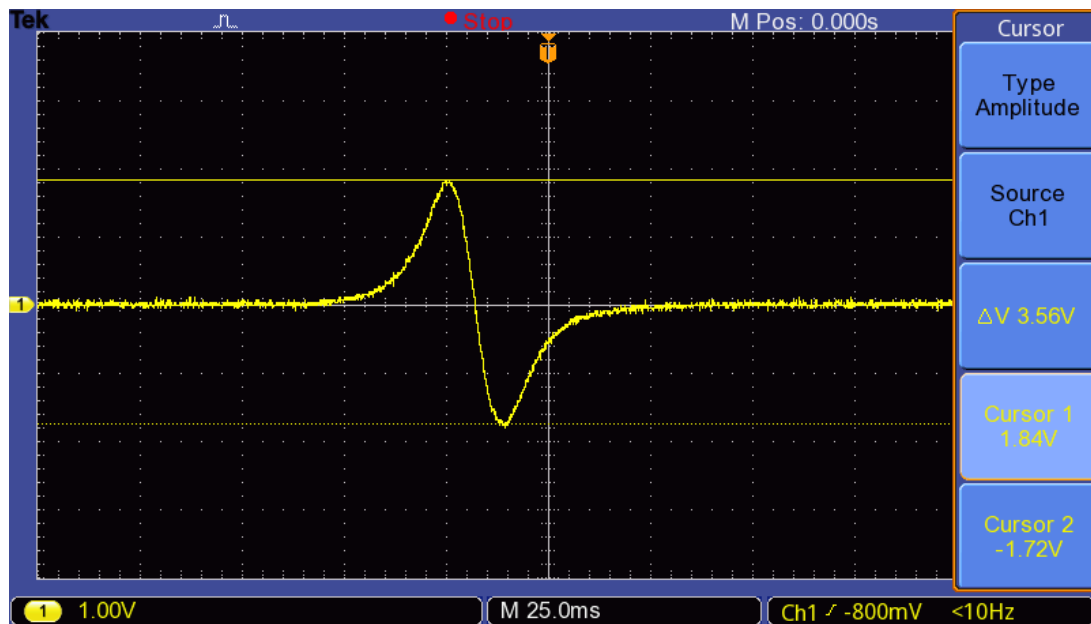
Observa-se uma maior geração de energia para um espaçamento de 5 mm, apresentando o valor de $0,114 \mu\text{Ws}$ e para o espaçamento de 10 mm o valor de $0,098 \mu\text{Ws}$, sendo este caso a menor geração de energia e havendo uma diferença de aproximadamente 15% entre estes dois espaçamentos.

Após as comparações e análises em software, foram feitas análises experimentais das arquiteturas dos transdutores.

6.3 Análise experimental do transdutor eletromagnético

A partir do aparato experimental, mostrado na Figura 20 no capítulo materiais e métodos, foram adquiridas as tensões a partir das diversas disposições de ímãs. Desta forma, a Figura 33, mostra a tensão na bobina considerando um ímã atravessando a bobina. Já a Figura 34, mostra a tensão com dois ímãs atravessando a bobina. Finalmente a Figura 35, ilustra a tensão considerando dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 5 mm atravessando a bobina.

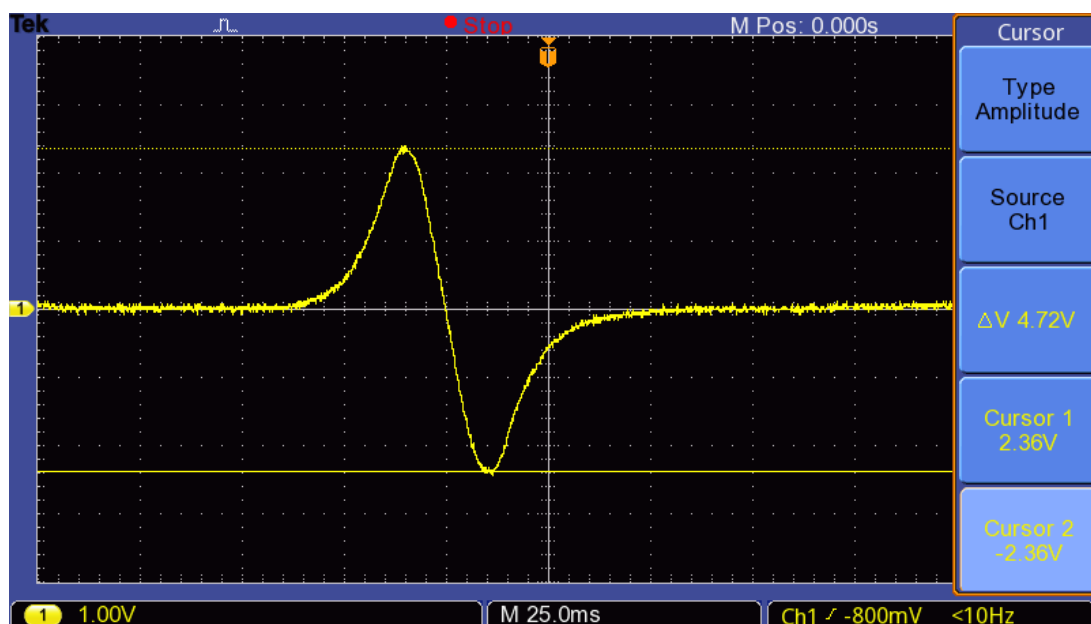
Figura 33 – Análise experimental da tensão na bobina considerando um único ímã atravessando a bobina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se neste caso uma tensão pico a pico de 3,56 V e um tempo de interação do ímã com a bobina de aproximadamente 80 ms, sendo que este tempo de interação depende das dimensões no ímã, destacando que neste caso há um único ímã.

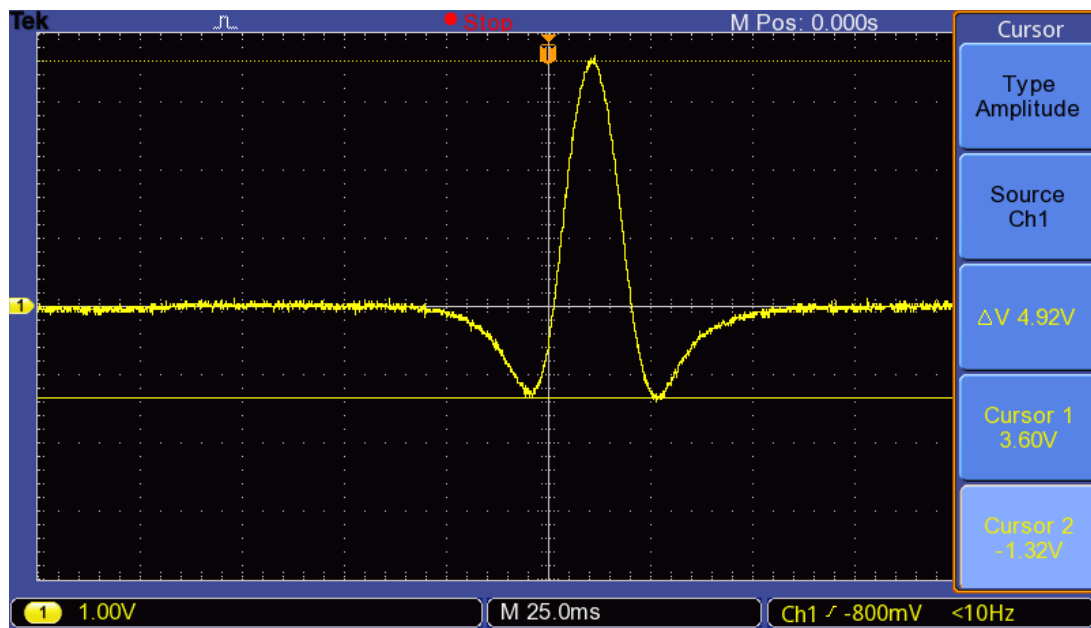
Figura 34 – Análise experimental da tensão na bobina considerando dois ímãs atravessando a bobina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já com dois ímãs atravessando a bobina, há uma tensão de pico a pico de 4,72V e aproximadamente 95 ms de interação com a bobina. Se comparado com o caso anterior, a configuração com dois ímãs apresenta um maior tempo de interação com a bobina, conforme a análise em software.

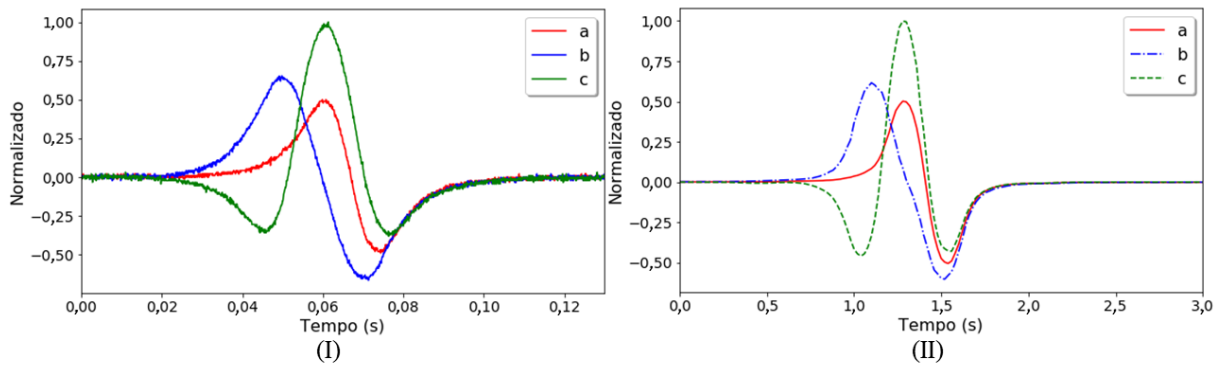
Figura 35 – Análise experimental da tensão na bobina considerando dois ímãs com os polos se repelindo e espaçamento de 5 mm atravessando a bobina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o último caso, com ímãs com polo se repelindo, há uma tensão de pico a pico de 4,92 V e aproximadamente, 105 ms de interação com a bobina. Logo, a Figura 36 mostra as formas de ondas obtidas experimentalmente ao lado das obtidas pela simulação. Ainda, considerando os modelos com (a) um único ímã atravessando a bobina; (b) dois ímãs atravessando a bobina; e (c) dois ímãs com os polos se repelindo

Figura 36 – Tensão no transdutor obtida (I) experimentalmente; e por (II) simulação em software



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar dos valores de tensão nas análises experimentais serem diferentes das análises em software, os valores foram normalizados para uma melhor visualização. Nota-se que as formas de ondas encontradas apresentaram o mesmo perfil, ou seja, o transdutor apresenta reprodutibilidade em relação à simulação em software. Destaca-se neste ponto que não foram utilizados os mesmos parâmetros do software, dimensões, velocidade e número de espiras, justamente por limitações na construção para análise, sendo apenas uma análise qualitativa. Essas limitações são decorrentes dos cálculos da malha dividida no método de elementos finitos, sendo que há uma exigência muito alta de processamento computacional para bobinas nas proporções do experimento com múltiplas voltas, levando em consideração a sua área.

Além das análises de forma de onda, outros resultados foram comparados para as configurações experimentais, como exposto na Tabela 2:

Tabela 2 – Comparação experimental do transdutor eletromagnético.

Quantidade de ímãs	Disposição dos ímãs	Valor de pico máximo	Valor de pico mínimo	Valor de pico a pico	Energia gerada
1	simples	1,84 V	-1,80 V	3,64 V	60,6 (μ Ws)
2	simples	2,40 V	-2,44 V	4,84 V	134,1 (μ Ws)
2	polos repelindo	3,68 V	-1,44 V	5,08 V	155,1 (μ Ws)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Examinando-se a tabela, foi possível verificar que há uma maior geração de energia na configuração com dois ímãs com o polo se repelindo, com geração de 155,1 μ Ws, que é

aproximadamente 155,9% maior que a geração com um ímã simples, o que também foi constatado nas análises em software.

Se for considerado o que a literatura apresenta como medida de geração de energia, para o caso de maior geração, que é o dos ímãs com polos se repelindo, tem-se uma tensão eficaz de aproximadamente 0,60 V e potência de 0,37 mW, utilizando uma taxa de aquisição de 1 kHz para o sinal do transdutor.

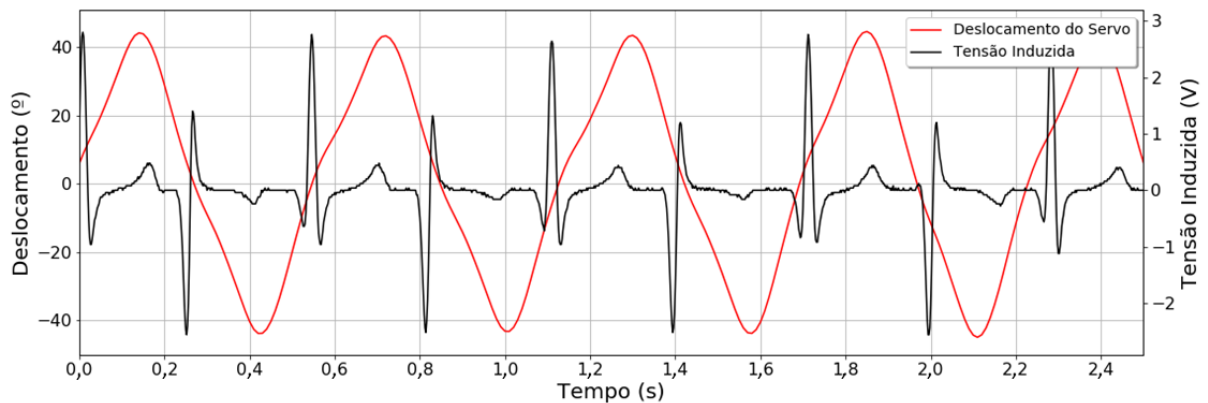
Outra adição ao sistema foram ímãs nas extremidades. Estes permitem uma desaceleração em um sentido do movimento e aceleração em outro, contribuindo na conservação de energia do sistema, pois reduzem perdas provenientes de choques nas extremidades do transdutor, além do que a aceleração contribui para uma maior velocidade do ímã e maior geração de energia.

Além das análises do ponto de vista de geração de energia, um estudo qualitativo sobre a possível influência do transdutor no sistema aeroelástico é apresentado na próxima seção.

6.4 Análise qualitativa da possível influência do transdutor com ímãs de polos que se repelem no sistema aeroelástico

Como comprovado no sistema experimental, a configuração do transdutor eletromagnético que se mostrou com maior potencial de geração de energia foi a com polos se repelindo, merecendo uma análise mais aprofundada dessa configuração. Assim, a Figura 37 mostra um maior tempo de amostragem dessa configuração juntamente com o movimento de simulação do servo para este estudo.

Figura 37 – Comparação no deslocamento e tensão induzida no transdutor

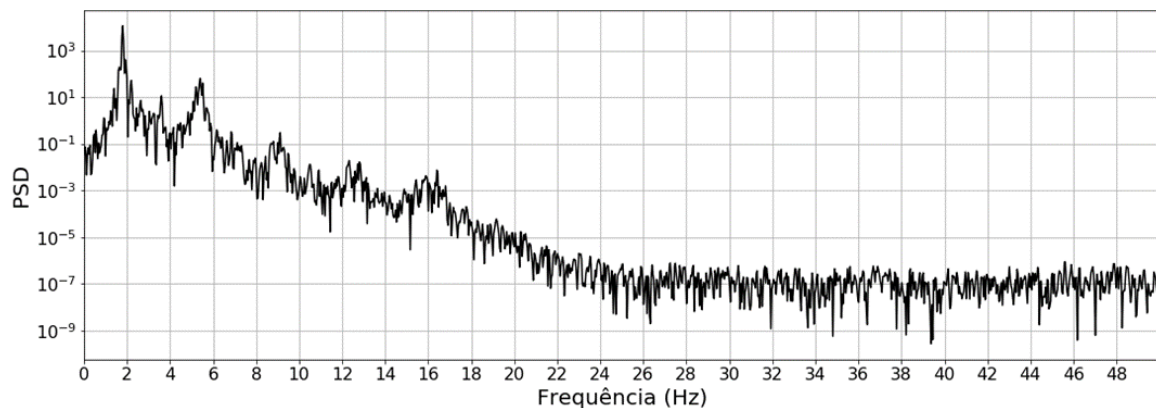


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que os picos de tensão se fazem presentes nos instantes próximos de $1/2$ do ciclo do deslocamento, ou seja, aproximadamente na posição 0° . Isso ocorre justamente quando o campo eletromagnético presente no espaçador entre os dois ímãs com polos que se repelem começa a interagir com a bobina. Além disto, os valores positivos e negativos dessas interações dependem do sentido do movimento dos ímãs.

Para verificar a possível influência do movimento do transdutor em relação ao sistema aeroelástico, a Figura 38 apresenta o espectro de frequência do movimento oscilatório simulado no servo.

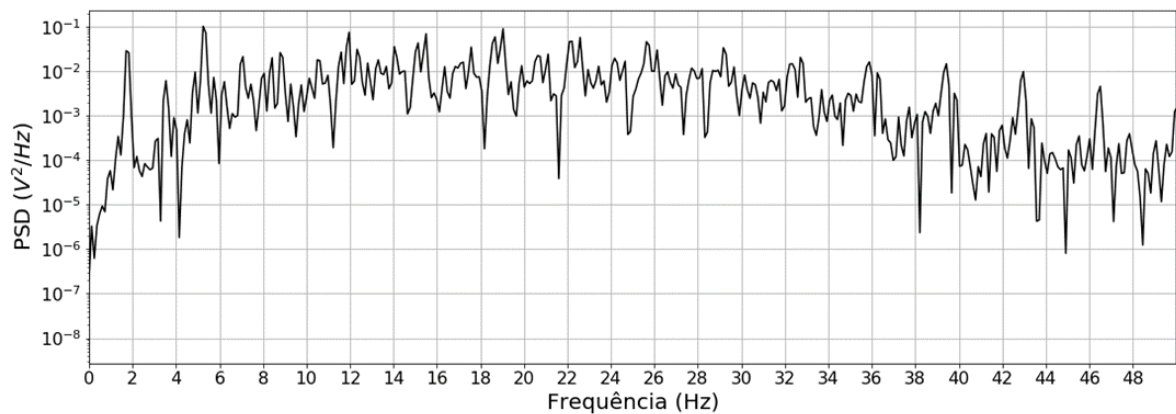
Figura 38 – Análise do espectro de frequência do sinal enviado ao servo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que para oscilação prescrita, predomina-se uma frequência de aproximadamente 1,8 Hz e também 5,3 Hz. Assim, uma análise do espectro de frequência da tensão induzida na bobina é apresentada na Figura 39.

Figura 39 – Análise do espectro de frequência do sinal da tensão induzida na bobina



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso do sinal do transdutor, observa-se a presença da frequência de 1,8 Hz, proveniente da frequência de oscilação do movimento, porém a frequência que se destaca neste caso é a de 5,3 Hz. Este fato está relacionado ao pico de tensão gerado no momento em que os polos se repelindo passam pela bobina, coincidindo com a terceira harmônica do movimento oscilatório, conseqüentemente, há a amplificação dessa frequência. Também nota-se que foram gerados harmônicos, possivelmente acoplamentos e provavelmente acoplamentos não lineares entre harmônicos e frequências naturais do sistema.

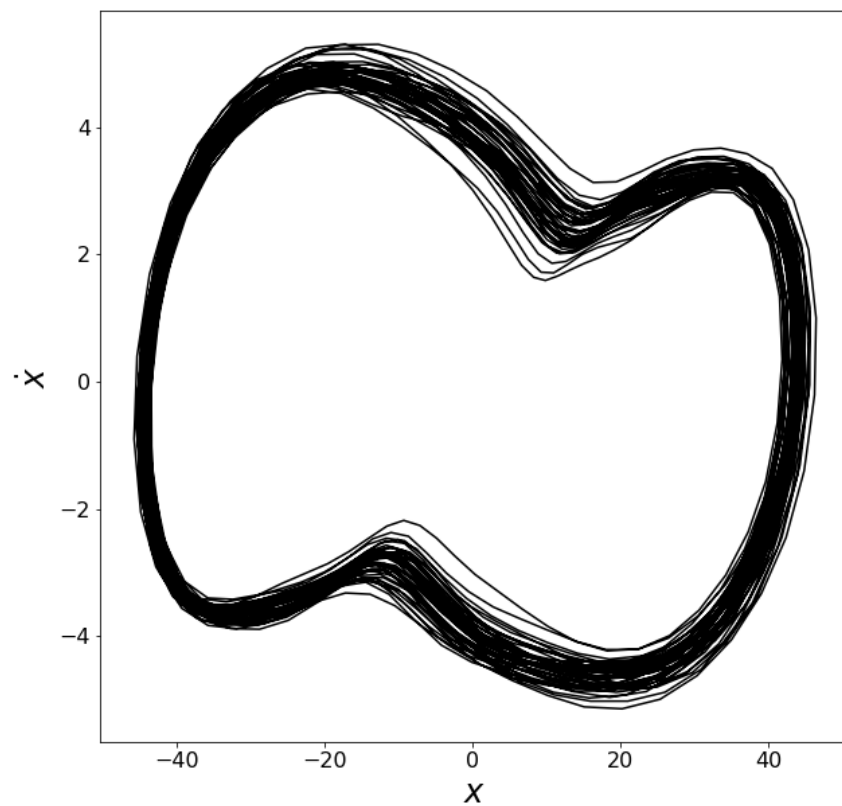
Ademais, levando em conta a interação ímãs e bobina, a variação brusca no fluxo eletromagnético causada pelos ímãs se repelindo pode estar excitando as frequências superiores à nova frequência predominante no sistema, tal fato pode ser possivelmente associado à característica não linear do sistema acoplado, o que explica a quantidade de picos em maiores frequências observadas no espectro.

Com relação às frequências da tensão gerada na passagem do ímã, nota-se que não há uma frequência característica, mas uma banda característica. Desta maneira, pela análise dessas frequências e levando em conta o acoplamento do transdutor eletromagnético no sistema aeroelástico, supõe-se que haverá um acoplamento resultante da passagem do

imã coincidente com a terceira harmônica. Além disso, outras frequências decorrentes dos acoplamentos de harmônicos e batimentos podem influenciar no movimento do aerofólio.

Com respeito à análise qualitativa do movimento oscilatório do servo a Figura 40 apresenta o espaço de estados deste movimento.

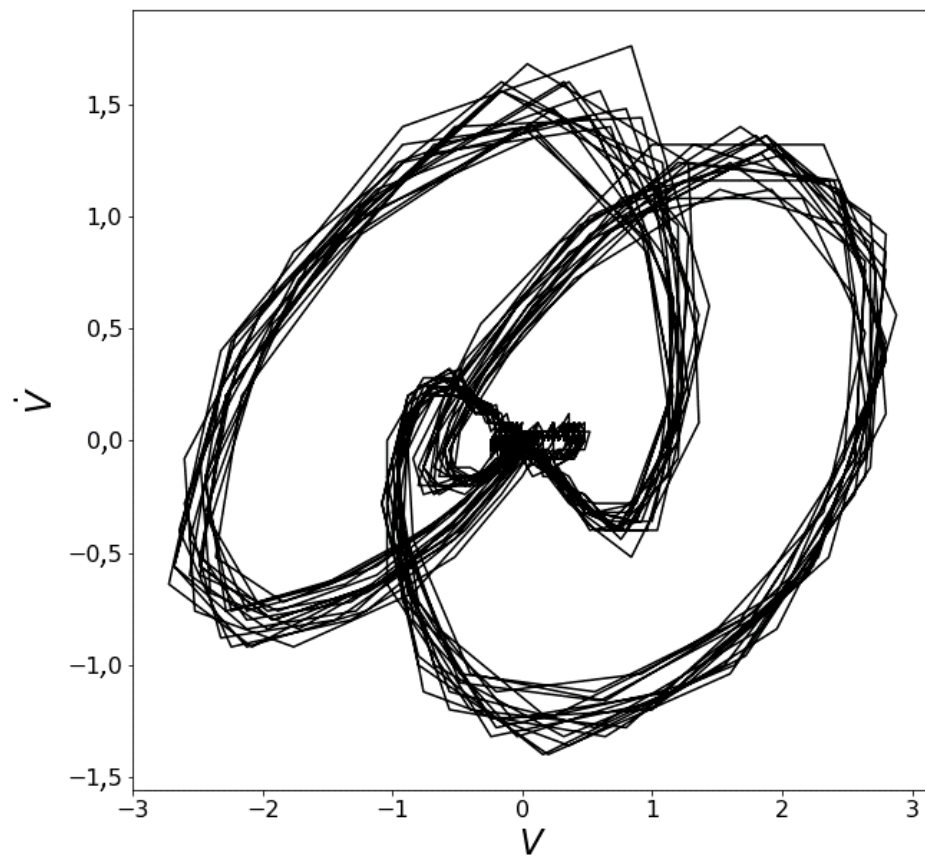
Figura 40 – Espaço de estados do movimento oscilatório do servo.



Fonte: Adaptado de (MARQUES; VASCONCELLOS; PEREIRA, 2016)

Observa-se que o sistema dinâmico apresenta comportamento similar ao característico ciclo limite. Deste modo, a Figura 41 mostra o espaço de estados para a tensão do transdutor eletromagnético.

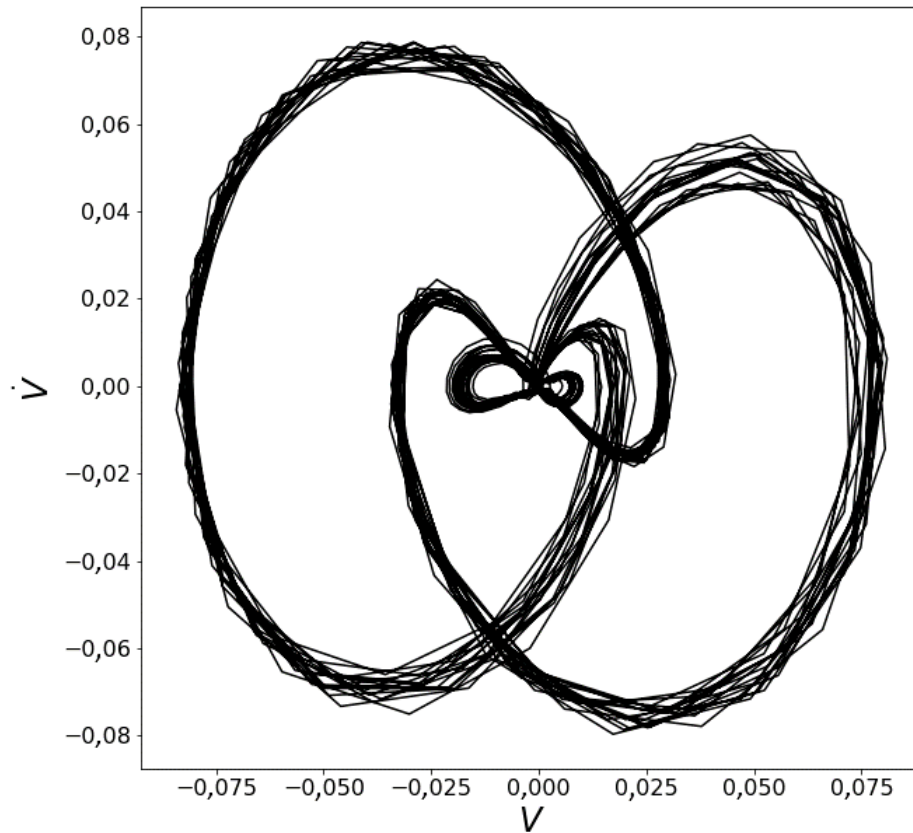
Figura 41 – Espaço de estados do sinal obtido no transdutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do método SVD, com frequência de corte em 30 Hz, a Figura 42 exibe o espaço de estados reconstruído do sinal do transdutor.

Figura 42 – Espaço de estados reconstruído do sinal obtido no transdutor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do espaço de estados reconstruído é possível perceber a transformação do sinal de entrada, que neste caso é provido pelo servo, em relação ao sinal do transdutor. Anteriormente havia um sistema com ciclo limite bem definido e no caso do transdutor, há a presença de novos ciclos, estes podem ser explicados pela presença das novas frequências no sistema. Observa-se também um maior número de ciclos e dispersão da trajetória do espaço de estados, fato que pode ser justificado pela banda larga no espectro de frequências, porém estudos mais aprofundados devem ser realizados para comprovação destes efeitos. Além do mais, com essa análise, pode-se prever que possivelmente o transdutor favorecerá um efeito significativo no sistema como um todo, alterando a frequência principal do sistema, podendo gerar novos harmônicos e batimentos, porém isso só poderá ser confirmado, após a instalação do transdutor no sistema aeroelástico.

Desta forma são apresentados as conclusões do trabalho. após isso, o Apêndice A apresenta a sugestão do projeto de sistema aeroelástico para acoplamento do transdutor eletromagnético a ser realizado em trabalhos futuros.

7 CONCLUSÕES

A busca por formas alternativas de fontes de geração de energia sempre foi um desafio, principalmente por cada vez mais haver a dependência de energia elétrica proporcionada pela era da tecnologia nos dias atuais.

A coleta de energia a partir de fenômenos aeroelásticos tem recebido bastante atenção nos últimos anos e geralmente essa coleta está associada a materiais com efeito piezelétrico. Uma forma alternativa de se extrair energia dessas oscilações é através de transdutores eletromagnéticos, nesse sentido se torna interessante o estudo e melhoria desses dispositivos.

Um fenômeno a ser considerado para estudo de coleta de energia é o estol dinâmico, este é caracterizado por altas amplitudes de oscilação, fato que pode ser atrativo quando se pensa nessa coleta.

Assim, os resultados obtidos neste trabalho quanto ao estudo de arquiteturas de transdutores eletromagnéticos se mostraram promissores, visto que há uma melhora na quantidade de energia produzida dependendo da arquitetura utilizada.

A partir das simulações utilizando o software ANSYS Maxwell foi possível analisar essas diversas configurações, alterando a quantidade de imãs, distância entre eles e polaridade de campo. Com as modificações feitas, analisou-se o fluxo eletromagnético, tensão induzida e potência gerada na bobina do transdutor eletromagnético. Neste sentido, a arquitetura que se mostrou mais interessante é do transdutor eletromagnético, considerando apenas uma bobina, com dois imãs onde os polos se repelem e separação entre eles. Vale ressaltar que a literatura apresenta para comparação de geração de energia a potência eficaz do sistema obtida a partir do valor de tensão eficaz, porém este método não coincide com uma unidade de energia. Portanto para este trabalho adotou-se a energia gerada com base na área das curvas dos gráfico de potência por tempo.

A maior geração de energia para essa configuração é justificada pela maior taxa de variação no fluxo eletromagnético causada pelos polos se repelindo. Desta forma, um estudo mais aprofundado foi feito, utilizando análise paramétrica para verificar a influência da distância entre esses dois imãs, onde verificou-se que há uma distância que proporciona uma maior geração de energia.

Além disso, para verificar as análises em software, foi implementado um sistema com servo motor. Este transformava uma série temporal de um experimento aeroelástico envolvendo estol dinâmico em oscilações para verificar se o comportamento das configurações do transdutor eram coerentes com a simulação. Assim, foi verificado que há reprodutibilidade nos resultados encontrados.

Como o transdutor utilizando os dois imãs com polo se repelindo se mostrou mais promissor considerando a quantidade de energia gerada, foram feitas análises para prever possíveis influências do sistema de indução eletromagnética com o sistema aeroelástico. Nestas análises verificou-se que o transdutor pode influenciar o sistema aeroelástico, dentre as influências estão a amplificação de frequências, o surgimento de harmônicos, batimentos e acoplamentos, além do que o sistema ainda pode se tornar caótico, visto o comportamento do espaço de estados.

Em trabalhos futuros, seria interessante a implementação do transdutor no sistema aeroelástico para coleta de energia, considerando o fenômeno de estol dinâmico, para isso o Apêndice A apresenta uma sugestão para este sistema. Também, poderiam ser utilizados novas configurações de transdutores, como por exemplo, um modelo variações nas dimensões da bobina ou modelo com mais de uma bobina. Além do mais, poderiam ser realizadas análises do ponto de vista do comportamento do sistema, principalmente quanto às frequências. Também, como sugestão, poderia ser aplicado o método dos expoentes de Lyapunov para determinar se o sistema é caótico, e realizar o desenvolvimento do modelo com equações matemáticas para o conjunto sistema aeroelástico e transdutor.

Referências Bibliográficas

- ABDELKEFI, A. Aeroelastic energy harvesting: a review. *International Journal Of Engineering Science*, Elsevier, v. 100, p. 112–135, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 18.
- ABDELKEFI, A.; HAJJ, M. R. Performance enhancement of wing-based piezoaeroelastic energy harvesting through freeplay nonlinearity. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 3, n. 4, p. 041001, 2013. ISSN 2095-0349. Citado na página 18.
- AKAYDIN, H. D.; ELVIN, N.; ANDREOPOULOS, Y. Wake of a cylinder: a paradigm for energy harvesting with piezoelectric materials. *Experiments in Fluids*, v. 49, n. 1, p. 291–304, 2010. ISSN 1432-1114. Citado na página 18.
- AKAYDIN, H. D.; ELVIN, N.; ANDREOPOULOS, Y. The performance of a self-excited fluidic energy harvester. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 21, n. 2, p. 025007, 2012. Citado na página 18.
- ALÉ, J. A. V. *Modelagem de Estol Dinâmico em Turbinas Eólicas de Eixo Vertical*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- ANDERSON Jr., J. D. *Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: introdução ao voo*. 7. ed. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill LLC, 2015. 925 p. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- ANSYS. *Maxwell*. 2019. Acesso em: 08.10.2019. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>. Citado na página 43.
- AQUARET. *Case Study - Stingray*. 2002. Acesso em: 10.09.2020. Disponível em: <http://www.aquaret.com/images/stories/aquaret/pdf/cstsstingray.pdf>. Citado na página 18.
- BATES, D.; MALVINO, A. *Eletrônica*. 7. ed. [S.l.]: MCGRAW HILL - ARTMED, 2007. v. 1. 672 p. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- BIBO, A.; ABDELKEFI, A.; DAQAQ, M. F. Modeling and characterization of a piezoelectric energy harvester under combined aerodynamic and base excitations. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 137, n. 3, 2015. ISSN 1048-9002. Citado na página 18.
- BISPLINGHOFF, R. L.; ASHLEY, H.; HALFMAN, R. L. *Aeroelasticity*. [S.l.]: Dover, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 27.
- BOWKER, J. A. et al. Experimental study of a wave energy scavenging system onboard autonomous surface vessels (asvs). In: *OCEANS 2015 - Genova*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–9. Citado na página 19.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. 11. ed. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2013. 766 p. Citado na página 36.
- BROOMHEAD, D.; KING, G. P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 20, n. 2–3, p. 217 – 236, 1986. Citado na página 42.

- BROVONT, A. D.; PEKAREK, S. D. Optimizing air-core permanent-magnet-based energy harvest in free-rotating devices. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 30, n. 4, p. 1621–1629, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- BRYANT, M.; GARCIA, E. Modeling and testing of a novel aeroelastic flutter energy harvester. *Journal of Vibration and Acoustics*, v. 133, n. 1, 2011. ISSN 1048-9002. Citado na página 18.
- CARR, L. W. Progress in analysis and prediction of dynamic stall. *Journal of Aircraft*, v. 25, n. 1, p. 6–17, 1988. Citado na página 27.
- CARVALHO, M. S. Equação de duffing aplicada a análise de um oscilador magneto-elástico. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. *Mecânica dos fluidos*. 3. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. 1016 p. Citado na página 26.
- CHENG, S.; ARNOLD, D. A study of a multi-pole magnetic generator for low-frequency vibrational energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 20, p. 025015, 12 2009. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- DEMARQUI Jr., C.; ERTURK, A. Electroaeroelastic analysis of airfoil based wind energy harvesting using piezoelectric transduction and electromagnetic induction. *Journal Of Intelligent Material Systems And Structures*, SAGE, v. 24, n. 7, p. 846–854, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- DEUS JÚNIOR, G. A. de et al. Finite element metho use as educational appliance of learning in electrical engineering. In: *Alive Engineering Education: Transforming and Innovating Engineering Education*. Goiânia, Goiás - Brasil: Gráfica UFG, 2017. cap. Capítulo 14, p. 159–166. Citado na página 43.
- ERTURK, A. et al. On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems. *Applied Physics Letters*, v. 96, n. 18, p. 184103, 2010. Citado na página 15.
- FRENZEL Jr., L. *Eletrônica Moderna*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. 820 p. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- FU, W. N.; HO, S. L.; CHEN, N. Application of shell element method to 3-d finite-element computation of the force on one body in contact with others. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 46, n. 11, p. 3893–3898, 2010. Citado na página 43.
- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, 2011. ISSN 0960-1481. Citado na página 15.
- HARTOG, J. D. *Mechanical Vibrations*. [S.l.]: Dover Publications, 1985. 436 p. Citado na página 27.
- HAYT Jr., W. H.; BUCK, J. A. *Engineering Electromagnetics*. 8. ed. New York: The Mcgraw-Hill Companies, Inc., 2012. Citado na página 32.
- JORGE FILHO, M.; VASCONCELLOS, R. M. G.; FERREIRA, A. A. Design and optimization of electromagnetic transducer for aeroelastic energy harvesting. In: *2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. Citado 5 vezes nas páginas 50, 51, 52, 53 e 54.

LEISHMAN, G. J. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. 2. ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2006. 826 p. Citado na página 30.

MANN, B.; SIMS, N. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *Journal of Sound and Vibration*, v. 319, n. 1, p. 515 – 530, 2009. ISSN 0022-460X. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

MARQUES, F. D.; VASCONCELLOS, R. M.; PEREIRA, D. D. Experimental investigation of an airfoil response under stall-induced pitching oscillations. In: _____. *57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. [s.n.], 2016. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-1965>. Citado 4 vezes nas páginas 31, 47, 48 e 65.

MCCROSKEY, W. *The Phenomenon of Dynamic Stall*. [S.l.]: Defense Technical Information Center, 1981. Citado na página 30.

MCCROSKEY, W. J. Unsteady airfoils. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 14, n. 1, p. 285–311, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

NUMPY. *NumPy*. 2019. Acesso em: 15.03.2019. Disponível em: <https://numpy.org/>. Citado na página 49.

PACKARD, N. H. et al. Geometry from a time series. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 45, p. 712–716, Sep 1980. Citado na página 42.

PRAUZEK, M. et al. Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks: a review. *Sensors (Basel)*, v. 18, n. 8, p. 2446, 2018. Citado na página 15.

ROSTAMI, A. B.; ARMANDEI, M. Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 193 – 214, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116309522>. Citado na página 18.

RUELLE, D. Ergodic theory of differentiable dynamical systems. *Publications Mathématiques de l’IHÉS*, Institut des Hautes Études Scientifiques, v. 50, p. 27–58, 1979. Citado na página 42.

RUÓTOLO, A. *Fenómenos de Pérdida Dinámica de Perfiles en Régimen Incompresible, con un Generador de Capa Límite Áturbulenta*. Tese (Doutorado) — Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

SEDRA, A.; SMITH, K. *Microeletrônica*. 5. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2007. Citado na página 36.

SERRANO, A. Análise conceitual da aeroelasticidade, fenômenos aeroelásticos e tecnologia da asa aeroelástica ativa. *Conexão SIPAER*, v. 1, n. 2, p. 100–111, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 27.

SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C. *Conversao eletromecanica de energia*. 1. ed. Sao Paulo, Brazil: Erica, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 32.

SIROHI, J.; MAHADIK, R. Piezoelectric wind energy harvester for low-power sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 22, n. 18, p. 2215–2228, 2011. Citado na página 18.

SPREEMANN, D.; FOLKMER, B.; MANOLI, Y. Comparative study of electromagnetic coupling architectures for vibration energy harvesting devices. In: . [S.l.: s.n.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

STROGATZ, S. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. [S.l.]: Avalon Publishing, 2014. (Studies in Nonlinearity). ISBN 9780813349114. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In: RAND, D.; YOUNG, L.-S. (Ed.). *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. p. 366–381. ISBN 978-3-540-38945-3. Citado na página 42.

TRICKEY, S. T.; VIRGIN, L. N.; DOWELL, E. H. The stability of limit-cycle oscillations in a nonlinear aeroelastic system. . *Mathematical, Physical And Engineering Sciences*, v. 458, n. 2025, p. 2203–2226, 2002. Citado na página 24.

VASCONCELLOS, R. M. G. de. Reconstrução de espaços de estados aeroelásticos por decomposição em valores singulares. In: . [S.l.: s.n.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 39, 41 e 42.

WHEELER, H. A. Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, v. 16, n. 10, p. 1398–1400, 1928. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

WICKENHEISER, A. M. Design optimization of linear and non-linear cantilevered energy harvesters for broadband vibrations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 22, n. 11, p. 1213–1225, 2011. Citado na página 35.

WORDEN, K.; TOMLINSON, G. *Nonlinearity in Structural Dynamics: Detection, Identification and Modelling*. [S.l.]: CRC Press, 2001. ISBN 9780750303569. Citado na página 40.

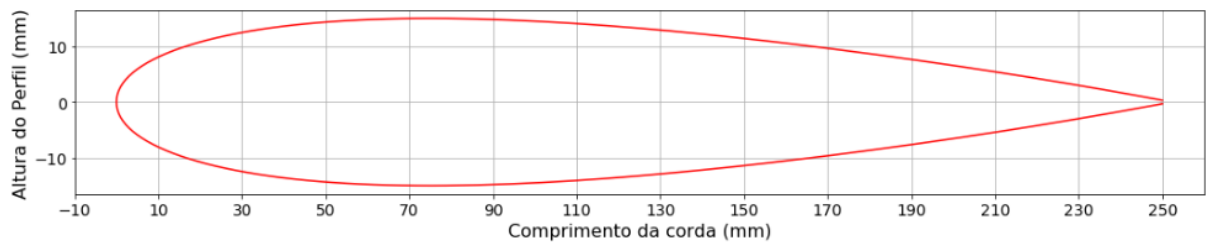
YANG, Y.; ZHAO, L.; TANG, L. Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting. *Applied Physics Letters*, v. 102, n. 6, p. 064105, 2013. Citado na página 18.

Apêndice A – Projeto do sistema aeroelástico

A função principal do transdutor por indução eletromagnética é coletar energia de um sistema aeroelástico com um grau de liberdade, que estará sujeito ao fenômeno de estol dinâmico. Deste modo algumas sugestões de montagem baseadas na literatura serão apresentadas considerando uma contribuição para trabalhos futuros.

Primeiramente, o projeto de sistema aeroelástico consiste em um aerofólio de perfil NACA 0012. Este perfil caracteriza-se por sua simetria e é amplamente adotado na literatura para experimentos aeroelásticos, como mostrado na Figura 43. Outras características são a corda de 25 cm e envergadura de 70 cm .

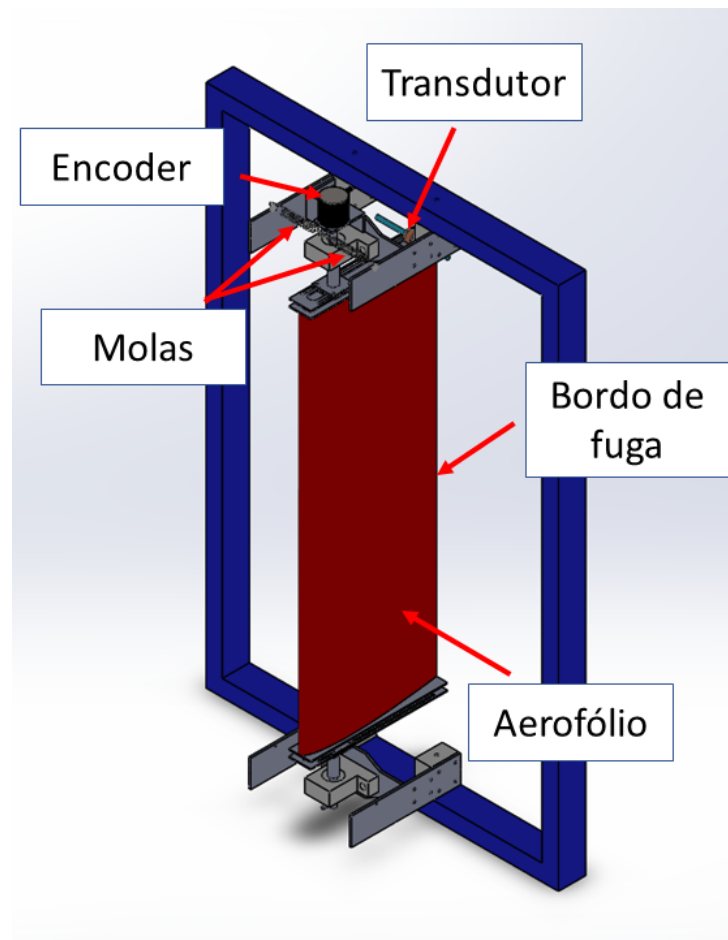
Figura 43 – Perfil NACA 0012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do aerofólio, é necessário construir um suporte para o mesmo. A Figura 44 ilustra o aerofólio e a sugestão de sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia.

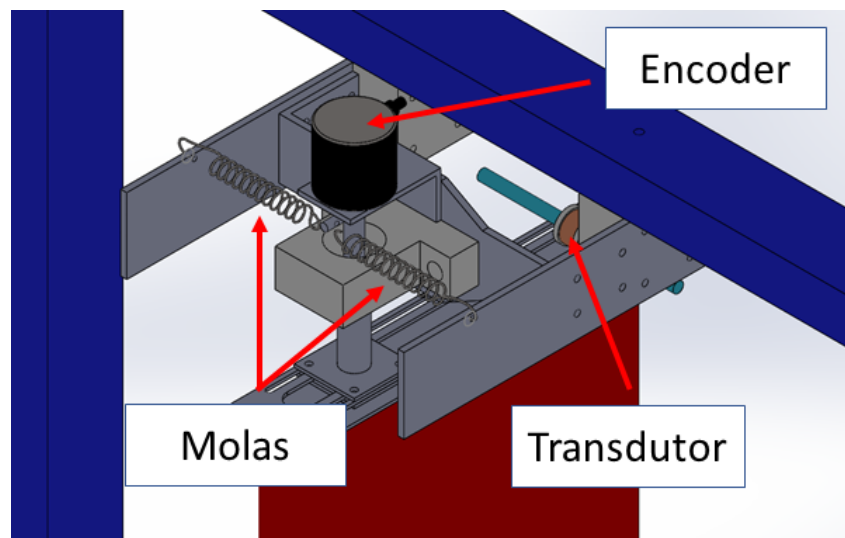
Figura 44 – Sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode-se observar, o sistema é previsto com o aerofólio na vertical, para que a ação da gravidade não interfira no movimento do aerofólio e desempenho do transdutor. O encoder rotativo tem função de medir a posição angular do aerofólio. Já as molas se encarregam de estabelecer as forças restauradoras e limitam o movimento de arfagem (*pitching motion*). Vale ressaltar que a frequência de oscilação do aerofólio depende do seu momento de inércia e das constantes elásticas da mola. Desta forma, a Figura 45 mostra uma visão aumentada dos detalhes do aparato.

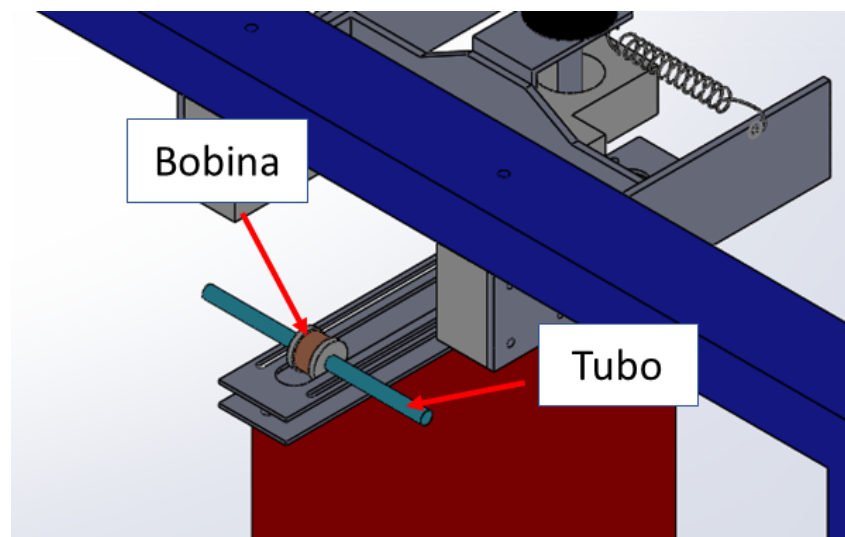
Figura 45 – Projeção com detalhes do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a posição do transdutor pode variar conforme disposto na cavidade destinada à ele, como é apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Projeção com detalhes traseiros do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista isométrica.



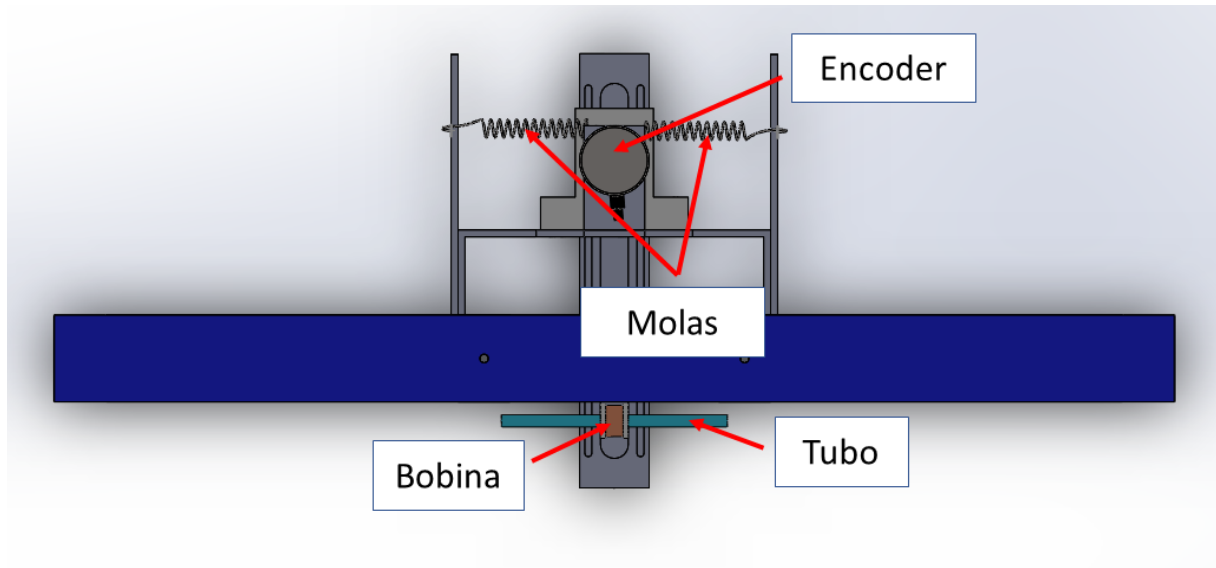
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa posição é de fundamental importância para o movimento do ímã, pois este é dependente da aceleração proveniente do movimento rotativo do aerofólio, o que não seria possível com movimentos lineares. Desta forma, justifica-se coletar energia de um sistema

com um grau de liberdade e rotativo, além do que, o fenômeno considerado apresenta altas amplitudes de oscilação, favorecendo o deslocamento do ímã.

Ainda, o suporte acomoda a bobina que possui um tubo concêntrico onde os ímãs irão percorrer. Logo, a Figura 47 apresenta a vista superior do dispositivo.

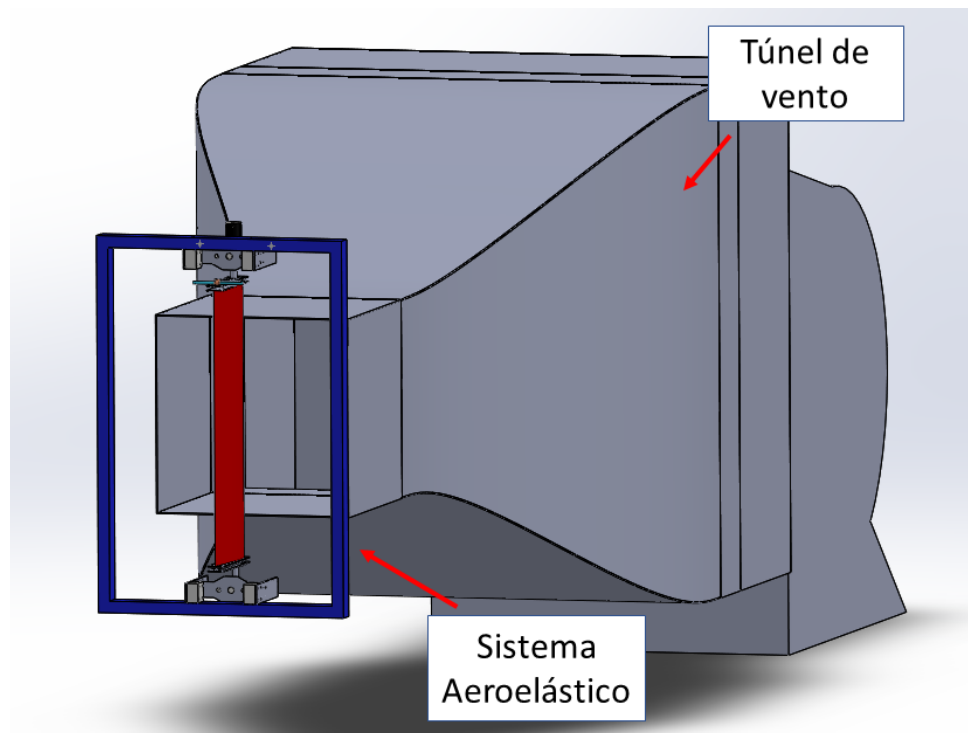
Figura 47 – Sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia com vista superior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o sistema aeroelástico apresentando, este foi projetado para ser utilizado em um túnel de vento com seção 50 cm x 50 cm, portanto a Figura 48 exemplifica essa utilização.

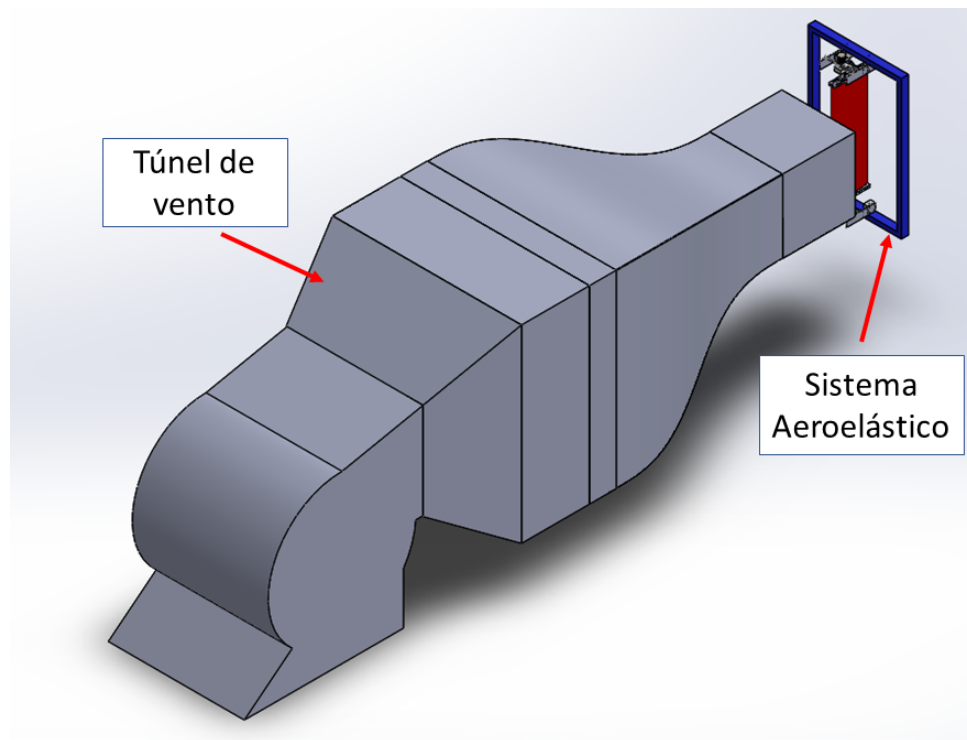
Figura 48 – Modelo de experimento de sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia e posicionamento no túnel de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 49 mostra uma visão isométrica do experimento como um todo, ou seja, sistema aeroelástico e túnel de vento.

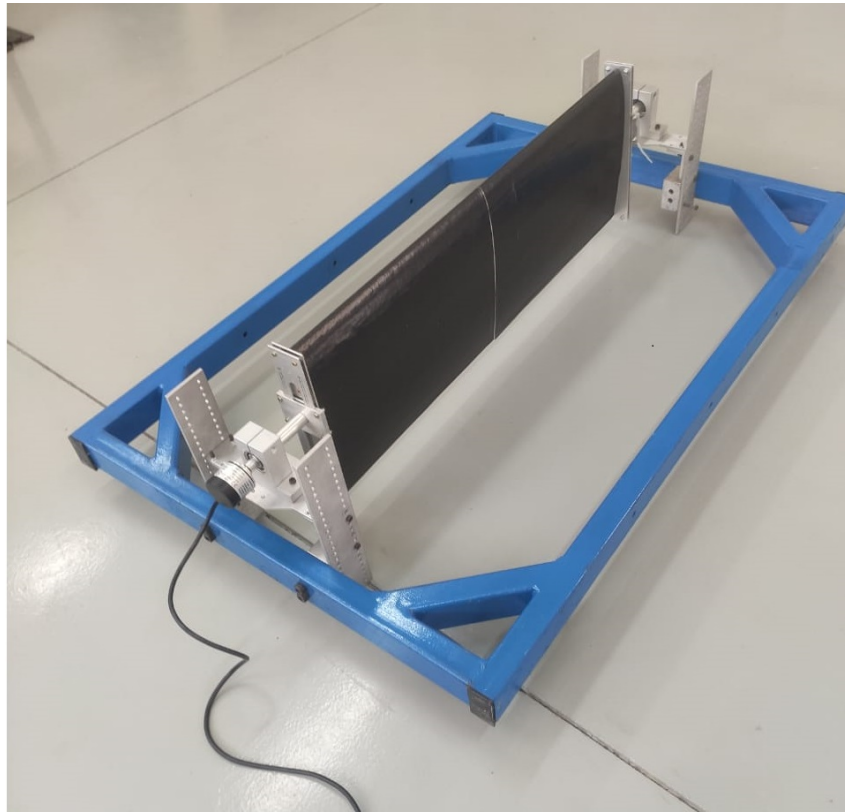
Figura 49 – Modelo de experimento de sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia e posicionamento no túnel de vento vista isométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, a Figura 50 revela a construção do sistema aeroelástico em suas etapas iniciais.

Figura 50 – Aparato experimental do sistema aeroelástico para o estudo de coleta de energia construído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A respeito do projeto aeroelástico apresentado e parcialmente construído, pretende-se utilizá-lo em trabalhos futuros, de modo que, primeiramente seja estudado o movimento do aerofólio sem a influência do transdutor eletromagnético. A fim de caracterizar as particularidades que o sistema mecânico irá produzir como oscilação, frequência, entre outros. Após esta implementação, intenta-se a instalação do transdutor eletromagnético para coleta de energia e avaliação de sua influência no sistema mecânico. Para esta avaliação, será levado em conta o posicionamento do transdutor, velocidade de escoamento e outras configurações de transdutores.