



**André Silva
Rodrigues**

**Geração autónoma de energia elétrica usando
arquitetura em levitação magnética com
mecanismo adaptativo**



André Silva
Rodrigues

Geração autónoma de energia elétrica usando arquitetura em levitação magnética com mecanismo adaptativo

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob orientação científica de Marco Paulo Soares dos Santos, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Andrei Kholkin, Investigador Coordenador do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro da FEEI:

POCI-01-0145-FEDER-031132

Apoio financeiro do TEMA:

CENTRO-01-0145-FEDER-022083

UID/EMS/00481/2019-FCT

júri / The jury

Presidente / President

Professor Doutor Miguel Armando Riem de Oliveira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Professor Doutor Raul Manuel Pereira Morais dos Santos
Professor Associado com Agregação da Escola de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Professor Doutor Marco Paulo Soares dos Santos
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Quero começar por agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Marco Santos, por todo o apoio, disponibilidade e paciência que me prestou ao longo da realização desta dissertação.

Agradecer ao Professor Doutor Jorge Ferreira e ao aluno de doutoramento Pedro Carneiro pela paciência e ajuda preciosa que me prestaram no apoio e esclarecimento de dúvidas, assim como no fornecimento de equipamento para a realização desta dissertação.

À minha família pelo apoio incondicional ao longo do meu percurso académico, inclusive nas situações com mais stress, foram sempre compreensivos comigo.

Agradeço ao Mestre António Festas e ao Mestre Rui Heitor por todo o apoio técnico prestado na realização desta dissertação.

Por último quero agradecer a todos os meus amigos e colegas que me apoiaram tanto ao longo do mestrado como da dissertação, foram vocês que muitas vezes me deram ânimo para superar as inúmeras barreiras. Um especial agradecimento ao meu colega de casa e curso Javier Gamboa por ter sido um ouvinte incondicional e me ter prestado um grande apoio.

Palavras-chave

Geração de energia; Gerador eletromagnético; Levitação magnética; Geração adaptativa; Instrumentação.

Resumo

A geração de energia através de sistemas eletromagnéticos com arquitetura de levitação magnética é uma das soluções mais promissoras tanto para aplicações de pequena escala como de grande escala, devido ao seu baixo custo e manutenção reduzida. Já foram propostas diversas abordagens para modelar e simular as dinâmicas mecânica e elétrica dos processos de transdução deste tipo de geradores. No entanto, poucas metodologias, e de limitada eficácia, se focaram na otimização destes geradores. Nenhuma metodologia de otimização propôs um mecanismo adaptativo no gerador eletromagnético que permita maximizar o seu desempenho. O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um protótipo de um gerador eletromagnético adaptativo de acordo com os padrões de excitação mecânicos. O gerador adaptativo é composto por uma estrutura acoplada à sua parte superior que contém um atuador, o qual permite alterar a posição de um dos ímãs das extremidades. Foi desenvolvido um aparato experimental composto por um sistema de excitação, um sensor para monitorização da dinâmica do gerador e uma placa da dSPACE para aquisição de dados. Foram medidos os valores de tensão elétrica produzidos pelo gerador para frequências até 5 Hz, diferentes amplitudes de excitação e diferentes distâncias entre os ímãs nas extremidades. Os resultados experimentais mostraram ganhos de tensão elétrica que chegaram aos 260%. Estes ensaios experimentais mostraram que o mecanismo adaptativo permite maximizar o desempenho do gerador. A potência máxima atingida nestes ensaios foi de 54 mW. Foi realizada uma parametrização das forças magnéticas de repulsão, do coeficiente de acoplamento eletromecânico e do coeficiente de amortecimento mecânico. Estes parâmetros foram usados num modelo numérico desenvolvido para análise do desempenho do gerador numa gama mais ampla de frequências e amplitudes de excitação. As simulações foram efetuadas com duas resistências de carga, uma para garantir a máxima transferência de energia e outra para analisar a dinâmica mecânica com forças de Lorentz negligíveis (cenário de quasi circuito aberto). Os resultados permitiram definir uma função analítica que possibilitou identificar a distância ótima entre os ímãs das extremidades em função das frequências e amplitudes de excitação e resistências de carga. Futuramente será importante desenvolver um novo protótipo com sistema de guiamento, que permita a diminuição do atrito mecânico, assim como construir um aparato experimental que possibilite a realização de ensaios com frequências de excitação que excedam os 20 Hz e amplitudes fixas de excitação independentemente da frequência.

Keywords

Energy harvesting; Electromagnetic harvesting; Magnetic levitation; Adaptive harvesting; Instrumentation.

Abstract

Motion-driven electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures is a promising methodology to power both small-scale and large-scale devices, because harvesters are low-cost and require reduced maintenance. Several approaches have already been proposed to model and simulate the mechanical and electrical dynamics of these transduction mechanisms of these harvesters. However, few methodologies, and these with limited effectiveness, have focused on the optimization of these harvesters. No optimization methodology has already proposed an adaptive mechanism to maximize the harvester performance for unknown and time-varying patterns of mechanical power sources externally exciting the harvesters. This work is focused on the development of an innovative prototype of an adaptive harvester which operates according to changes in the external mechanical excitation patterns. The adaptive harvester is composed by a structure coupled to the its upper part containing an actuator, which allows to change the position of a magnet attached to an end extremity of the container. An experimental apparatus comprising a mechanical vibrational system, a sensor to monitor the harvester dynamics and a dSPACE data acquisition board, was implemented. The electrical voltage was measured for frequencies up to 5 Hz, and for different excitation amplitudes and distances between non-levitating hard-magnetic elements. Electrical voltage gains that reached 260% were observed in experimental tests. These successful experimental results highlight the potential of this proposed methodology. The electric power up to 54 mW was achieved. Parameterizations of the magnetic repulsion forces, electromechanical coupling coefficient and mechanical damping coefficient were performed. These parameters were used to define a numerical model designed to analyze the generator performance over a wider range of frequencies and excitation amplitudes. The simulations were performed with two load resistances: the lower resistive load was used to ensure the maximum power transfer scenario, while the higher resistive load was defined to analyse the mechanical dynamics with negligible electrical damping. The results allowed to define an analytical function that allowed to identify the optimum distance between the magnets attached to the end extremities of the container as a function of frequencies and amplitudes of excitation, as well as load resistances. In the forthcoming future, it will be relevant to develop a prototype including a guiding system to reduce the mechanical friction, as well as to implement an experimental apparatus that allow to carry out experimental tests with excitation frequencies exceeding 20 Hz for unchanged excitation amplitudes.

Lista de Publicações

Os trabalhos realizados nesta dissertação resultaram na seguinte publicação:

- Pedro Carneiro, Marco P. Soares dos Santos, **André Rodrigues**, Jorge A. F. Ferreira, José A. O. Simões, A. Torres Marques, Andrei L. Kholkin (2019), "Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: a review", publicado no jornal *Applied Energy*.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Problema	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Tipos de configurações e validações experimentais	6
2.1.1	Categoria 1 - Um único enrolamento e um único íman em levitação	6
2.1.2	Categoria 2 - Um único enrolamento e múltiplos ímanes em levitação	14
2.1.3	Categoria 3 - Múltiplos enrolamentos e um único íman em levitação	18
2.1.4	Categoria 4 - Múltiplos enrolamentos e múltiplos ímanes em levitação	23
2.1.5	Metodologias de modelação dos mecanismos de transdução .	30
3	Métodos	37
3.1	Projeto mecânico do gerador instrumentado adaptativo	37
3.1.1	Projeto mecânico	37
3.1.2	Arquitetura do gerador eletromagnético	41
3.1.3	Seleção do atuador	42
3.1.4	Aparato experimental para identificação dos parâmetros do gerador	43
3.2	Plataforma Experimental	44
3.2.1	Sensor de monitorização da dinâmica da excitação mecânica	45
3.2.2	Sistema de excitação mecânico	45
3.2.3	Suportes para o sistema de excitação e monitorização	45
3.2.4	Aquisição de dados e controlo	46
3.3	Parâmetros constantes	48
3.4	Ensaio experimentais	49
3.4.1	Variação de distância entre os ímanes das extremidades . . .	50
3.4.2	Variação da amplitude de excitação	50

3.4.3	Variação da frequência	50
3.5	Modelo do mecanismo de transdução	51
3.5.1	Design do gerador eletromagnético	51
3.5.2	Mecanismo de transdução	51
3.5.3	Limitações do modelo	53
3.6	Detalhes do modelo computacional	53
3.6.1	Variação de distância entre os ímanes das extremidades	53
3.6.2	Variação da amplitude de excitação	53
3.6.3	Variação da frequência	53
3.6.4	Variação da resistência de carga	54
3.6.5	Método de simulação	54
3.7	Parametrização	55
3.7.1	Parametrização das forças magnéticas de repulsão	55
3.7.2	Parametrização do coeficiente de acoplamento eletromecânico	58
3.7.3	Parametrização do coeficiente de amortecimento mecânico	58
3.8	Análise de resultados	59
3.8.1	Análise gráfica	59
3.8.2	Correlações e aproximações analíticas	59
3.8.3	Parâmetros analisados	60
4	Resultados	61
4.1	Resultados experimentais	61
4.2	Resultados da parametrização	67
4.2.1	Identificação da força magnética de repulsão	67
4.2.2	Identificação do coeficiente de acoplamento eletromecânico	69
4.2.3	Identificação do coeficiente de amortecimento mecânico	70
4.3	Resultados da adaptação do curso do gerador	71
4.3.1	Desempenho do gerador para a resistência de carga que maximiza a transferência de energia (19,5 k Ω)	72
4.3.2	Desempenho do gerador para a resistência de carga de 100 M Ω	76
4.3.3	Análise do curso ótimo do gerador eletromagnético adaptativo	80
5	Discussão e conclusão	87
5.1	Discussão	87
5.2	Conclusão e trabalhos futuros	88
	Bibliografia	89
	Apêndices	97
A	Desenhos do projeto do gerador eletromagnético	99

Lista de Símbolos

α	Coefficiente de acoplamento eletromecânico [Vs/m]
Ω	Frequência angular de excitação [rad/s]
A	Amplitude da excitação externa [m/s ²]
B	Campo magnético [T]
c	Coefficiente de amortecimento total [Ns/m]
c_e	Coefficiente de amortecimento elétrico [Ns/m]
c_m	Coefficiente de amortecimento mecânico [Ns/m]
F_{atrito}	Força de atrito [N]
F_g	Força gravítica [N]
F_m	Força magnética de repulsão [N]
g	Aceleração gravítica [m/s ²]
i	Corrente elétrica [A]
l	Comprimento da bobine [m]
m	Massa do(s) íman(es) a levitar [kg]
N	Número de espiras
R_{carga}	Resistência de carga [Ω]
R_{int}	Resistência interna do enrolamento [Ω]
t	Tempo [s]
$V_{entrada}$	Tensão de entrada [V]
$V_{saída}$	Tensão de saída [V]
x, \dot{x}, \ddot{x}	Posição, velocidade e aceleração da massa inercial, respetivamente [m], [m/s], [m/s ²]

y, \dot{y}, \ddot{y}	Posição, velocidade e aceleração da massa inercial relativamente ao gerador, respetivamente [m], [m/s], [m/s ²]
z, \dot{z}, \ddot{z}	Posição, velocidade e aceleração do gerador relativamente ao referencial fixo, respetivamente [m], [m/s], [m/s ²]
fem	Força eletromotriz ou tensão elétrica induzida [V]
f	Frequência [Hz]

Lista de Abreviaturas

<i>DOF</i>	Degree of freedom (Grau de liberdade)
<i>DPN</i>	Densidade de potência normalizada [$\text{W m}^{-3} \text{ g}^2$]
<i>DP</i>	Densidade de potência [W/m^3]
<i>FEA</i>	Finite element analysis (Análise de elementos finitos)
<i>FEM</i>	Finite element method (Método de elementos finitos)
<i>FFT</i>	Fast Fourier transform (Transformada rápida de Fourier)
<i>MEMS</i>	Micro-electromechanical system (Sistema micro-eletromecânico)
<i>PLA</i>	Poliácido láctico
<i>PTFE</i>	Politetrafluoretileno
<i>RMS</i>	Root mean square (Raiz do valor quadrático ou valor eficaz)

Lista de Figuras

2.1	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Constantinou <i>et al.</i> [41, 42].	6
2.2	Esquemático representativo dos macro-geradores eletromagnéticos propostos por Foisal <i>et al.</i> [43], (a) modelo quadrangular (vista de cima) e modelo translacional (vista em corte lateral).	8
2.3	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Berdy <i>et al.</i> [44].	9
2.4	Localizações do gerador para testes no corpo humano [39].	10
2.5	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Soares dos Santos <i>et al.</i> [16].	12
2.6	Esquemático representativo dos geradores eletromagnéticos proposto por Saha <i>et al.</i> [47] (a) com um único ímã em levitação, (b) com dois ímãs em levitação e um espaçador entre eles; (c) com um único ímã fixo [37].	14
2.7	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Dallago <i>et al.</i> [48].	15
2.8	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Masoumi e Wang [49].	16
2.9	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Wang <i>et al.</i> [7].	17
2.10	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Mann e Sims [50].	18
2.11	Resposta da velocidade relativa com a amplitude de excitação exterior de: $0,5 \text{ m/s}^2$ (a) e 4 m/s^2 (b). O comportamento teórico devido à não linearidade observado nas frequências com trajetórias ascendentes e descendentes é identificado pelas linhas sólidas em preto e vermelho (soluções periódicas estáveis), enquanto a linha tracejada azul ilustra soluções periódicas instáveis [50].	19
2.12	Esquema do gerador proposto Bonisoli <i>et al.</i> [51].	20
2.13	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Morais <i>et al.</i> [52].	21
2.14	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Yang <i>et al.</i> [53].	22

2.15	Diferentes configurações do gerador proposto por Apo e Priya [54], (a) um único íman em levitação e nenhum espaçador, (b) dois ímanes em levitação e um espaçador, (c) três ímanes em levitação e dois espaçadores, (d) enrolamento e design para as diferentes configurações.	23
2.16	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Zhang <i>et al.</i> [55].	25
2.17	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Savaria <i>et al.</i> [6].	26
2.18	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Geisler <i>et al.</i> [39].	27
2.19	Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Fan <i>et al.</i> [57].	29
3.1	Protótipo de gerador eletromagnético adaptativo (vista trimétrica em corte).	38
3.2	Vista explodida da parte inferior do gerador eletromagnético adaptativo.	39
3.3	Vista explodida da parte central do gerador eletromagnético adaptativo.	39
3.4	Vista explodida da parte superior do gerador eletromagnético adaptativo.	40
3.5	Estrutura geral do gerador eletromagnético adaptativo.	41
3.6	(a) Motor de passo GM15BY; (b) Driver DRV8825 da <i>Texas Instruments</i> [59].	42
3.7	Desenho 3D do gerador com a estrutura que suporta as massas para o ensaio das forças magnéticas de repulsão com o íman central acoplado.	43
3.8	Plataforma experimental sem o gerador eletromagnético adaptativo.	44
3.9	Fontes de alimentação, multímetro e osciloscópio utilizados.	44
3.10	Sensor ultrassônico <i>Microsonic</i> nano 15/CU [60].	45
3.11	Cilindro pneumático (a) e eletroválvula pneumática (b) da <i>FESTO</i> [61, 62].	45
3.12	Suporte do sistema de excitação (a) e suporte do sensor para monitorização da dinâmica da excitação mecânica (b).	46
3.13	Placa de controlo <i>DSP</i> (DS1104 da <i>dSPACE</i>) [63].	46
3.14	Interface do programa desenvolvido no <i>ControlDesk</i> 7.0 para os ensaios experimentais.	47
3.15	Esquema do divisor de tensão.	48
3.16	Variação da distância entre os ímanes das extremidades.	50
3.17	Gerador de levitação magnética desenvolvido por Mann e Sims [50]	51
3.18	Circuito elétrico (a) referente à arquitetura em (b) [50]	52
3.19	Modelo em <i>Simulink</i> que permitiu realizar a previsão da dinâmica do gerador eletromagnético adaptativo.	54

3.20	Imagem representativa da excitação aplicada ao sistema com uma amplitude de 10 m/s^2 ; Excitação de frequência ascendente: onda sinusoidal a variar de 0 até 0,1 Hz (a); Excitação de frequência descendente: onda sinusoidal a variar de 0,1 até 0 Hz (b).	55
3.21	Gerador eletromagnético com a estrutura para medição da força magnética de repulsão.	57
3.22	Estrutura central com o íman acoplado que permite o ensaio das forças magnéticas de repulsão e do coeficiente de acoplamento eletromecânico.	58
3.23	Imagem representativa de uma simulação com a amplitude e distância fixa; Excitação de frequência ascendente: onda sinusoidal a variar de 0 até 30 Hz (a vermelho); Excitação de frequência descendente: onda sinusoidal a variar de 30 até 0 Hz (a laranja).	59
4.1	Tensão elétrica máxima absoluta: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.	62
4.2	Tensão elétrica média absoluta: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.	63
4.3	Potência elétrica máxima: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.	64
4.4	Potência elétrica média: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.	64
4.5	Energia elétrica: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.	65
4.6	Distância ótima entre os ímanes das extremidades para o melhor desempenho do gerador conforme a amplitude e frequência de excitação.	65
4.7	Energia elétrica produzida para diferentes distâncias Δd e frequências de excitação. A amplitude de excitação foi 14 mm.	66
4.8	Energia elétrica produzida para diferentes distâncias Δd e frequências de excitação. A amplitude de excitação foi 28 mm.	67
4.9	Campo magnético e linhas de fluxo referente ao íman inferior e central a uma distância 5 mm entre eles.	68
4.10	Medições experimentais da força magnética de repulsão (a vermelho); Modelo com integrais de <i>Bessel</i> (a preto); Modelo FEM (a verde); Aproximação do modelo FEM com uma exponencial de segundo grau (linha verde).	69
4.11	A velocidade experimental do íman central (linha contínua preta) e a tensão elétrica de saída (linha tracejada preta); Média do coeficiente de acoplamento eletromecânico (linha vermelha).	70
4.12	Dinâmica do íman em levitação: adquirida experimentalmente (linha azul); adquirida através de simulação (linha preto).	71

4.13	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de $0,1 \text{ m/s}^2$ e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	72
4.14	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 2 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	73
4.15	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 4 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	73
4.16	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 6 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	74
4.17	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 8 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	75
4.18	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 10 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$	75
4.19	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de $0,1 \text{ m/s}^2$ e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	76
4.20	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 2 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	77
4.21	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 4 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	77
4.22	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 6 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	78
4.23	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 8 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	79
4.24	Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 10 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$	79

4.25	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 0,1 m/s ²	81
4.26	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 2 m/s ²	81
4.27	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 4 m/s ²	82
4.28	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 6 m/s ²	82
4.29	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 8 m/s ²	83
4.30	Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de 19,5 k Ω em (a) e R_{carga} de 100 M Ω em (b). A excitação foi de 10 m/s ²	83
4.31	Curso ótimo para as diferentes frequências e amplitudes de excitação. A R_{carga} foi de 19,5 k Ω	84
4.32	Curso ótimo para as diferentes frequências e amplitudes de excitação. A R_{carga} foi de 100 M Ω	84
A.1	Acoplamento do gerador ao cilindro pneumático.	100
A.2	Acoplamento do motor de passo ao fuso.	101
A.3	Estrutura central do gerador.	102
A.4	Flange do motor.	103
A.5	Guia para guiar a descida do motor com o fuso.	104
A.6	Disco da base que liga o íman ao veio do suporte das massas.	105
A.7	Disco do topo que vai ligar ao veio para servir de referência ao sensor de distância.	106
A.8	Suporte que permite colocar duas massas iguais nas extremidades para aplicar uma força no íman a levitar.	107
A.9	Suporte do sensor de distância para quando este necessita de estar acoplado à estrutura do gerador eletromagnético.	108
A.10	Veio que liga o íman em levitação ao suporte para colocar as massas.	109
A.11	Disco da base que suporta o íman na extremidade inferior e que une o acoplamento do gerador ao cilindro.	110
A.12	Tampa superior que une a parte central e a fêmea do fuso, assim como limita a posição máxima do gerador.	111

Lista de Tabelas

2.1	Análise global das modelações utilizadas ^(a)	33
2.2	Desempenho dos geradores ^(b)	35
3.1	Parâmetros físicos do protótipo do gerador eletromagnético	48
3.2	Parâmetros dos ímanes fixos	49
3.3	Parâmetros do íman central	49
3.4	Parâmetros de entrada da simulação em COMSOL	56
4.1	Parâmetros da equação que descreve o curso ótimo para uma determinada amplitude de excitação ^(c)	85

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

A procura por energias renováveis registou um enorme aumento nos últimos anos devido a fatores ambientais e também da procura nos mercados por novas formas de adquirir energia não poluente a baixo custo. A procura por dispositivos eletrónicos com baixo consumo e elevado desempenho originou grandes avanços no desenvolvimento de novos sistemas de captação de energia capazes de fornecer os desempenhos desejados a muitos tipos de dispositivos [1–7].

Os geradores eletromagnéticos, principalmente com arquitetura em levitação magnética, têm baixo custo de produção, uma boa adaptabilidade a variações na dinâmica das fontes de energia externas e a capacidade de operar autonomamente com desempenhos estáveis e por longos períodos de tempo devido à sua manutenção reduzida. Existem diversas aplicações para este tipo de geradores, desde sensores e atuadores [8, 9], sistemas micro-eletromecânicos (MEMS) [10, 11], aplicações móveis [12], dispositivos embutidos em têxteis (pulseira, blusa, etc.) [13–15], implantes biomédicos [14–16], entre muitos outros [17]. Contudo, as soluções existentes no mercado ainda não conseguem cumprir os requisitos necessários de fornecimento de energia e o uso de baterias continua a não ser uma solução possível em muitos dos casos, devido às limitações no seu armazenamento ou substituição muitas vezes inconveniente ou impraticável [18]. No âmbito dos dispositivos biomédicos implantáveis, o tempo limitado na durabilidade das baterias expõe o paciente a procedimentos cirúrgicos e a outros potenciais riscos que devem ser evitados. Para além disso, 20% dos dispositivos médicos bioeletrónicos falham, com potencialidade de provocar impactos negativos no estado de saúde dos pacientes. Muitas destas falhas estão relacionadas diretamente com a fonte de alimentação elétrica utilizada [19]. O facto das fontes de energia solar ou eólica serem intermitentes exigem complexas gestões da rede de energia (necessidade de sistemas de armazenamento de energia, custos de produção e instalação mais elevados) [20–24]. Por conseguinte, persiste a necessidade de explorar e desenvolver melhores soluções para a produção de energias renováveis não intermitentes.

A energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica através de várias

metodologias, entre as quais se salientam a transdução piezoelétrica [25–27], eletromagnética [28–30], eletrostática [31–33] e triboelétrica [34–36].

Este trabalho é focado em sistemas de geração (*harvestings*) eletromagnéticos que usam arquitetura de levitação magnética. Estudos recentes evidenciam que esta arquitetura de geração autónoma de energia tem grande potencial para alimentar eletricamente uma grande gama de dispositivos, tanto de pequena escala como de grande escala [37]. A configuração básica destes sistemas consiste numa estrutura cilíndrica oca, três ímanes permanentes e um enrolamento. A polaridade dos ímanes é disposta de forma a que um ou mais ímanes se encontrem em levitação devido à força de repulsão imposta pelos ímanes fixos nas extremidades do recipiente [38]. Uma parte do cilindro é envolvida por um enrolamento de múltiplas camadas em torno da sua superfície externa [16].

Diferentes configurações deste tipo de arquiteturas já foram propostos, variando o número de ímanes fixos e a levitar, a polaridade dos ímanes, a geometria dos ímanes (cilíndricos, anelares e retangulares), número de espiras e a geometria da estrutura (cilíndrica e retangular). Além disso, também foram considerados alguns sistemas de guiamento do íman a levitar, de forma a tentar diminuir os efeitos do atrito mecânico. Quando é aplicada uma excitação exterior no dispositivo, o íman em levitação dentro da estrutura responde com uma dinâmica de movimento relativamente ao enrolamento, sujeitando-o a uma variação de fluxo magnético. Essa variação vai induzir uma tensão elétrica aos terminais do enrolamento. Para excitações harmónicas com uma frequência dominante, a frequência do(s) íman(es) em levitação é de extrema importância visto que a maximização da energia gerada é obtida quando a frequência do seu movimento iguala a frequência de ressonância do gerador [39]. No entanto, comportamentos de não linearidade podem surgir como o aumento da amplitude de excitação.

1.2 Problema

Estes geradores estão limitados quanto à energia que conseguem extrair às fontes de energia mecânica exteriores tornando a sua viabilidade limitada em várias aplicações, tanto de pequena como de grande escala. De facto, o desempenho destes geradores é altamente dependente da dinâmica da excitação externa e dos parâmetros construtivos do gerador. Por um lado, a otimização destes parâmetros antes do seu fabrico não considera as variações das fontes de energia mecânica. Por outro lado, nunca foi proposta uma solução tecnológica para alteração de parâmetros do gerador durante a sua operação que permitam uma adaptabilidade do gerador às alterações das dinâmicas da excitação.

De todos os parâmetros para otimização, o comprimento do curso do gerador (distância entre os ímanes fixos nas extremidades) é um parâmetro que permite realizar adaptabilidade às variações de excitação. A otimização deste parâmetro durante a operação do gerador é um método sofisticado que poderá maximizar a dinâmica do íman em levitação dentro do gerador. Esta otimização torna-se

extremamente importante quando não se conhecem as excitações *a priori*. Existe somente uma ferramenta que permite a otimização geométrica para melhorar o desempenho destes geradores [40].

1.3 Objetivos

Este trabalho tem três objetivos:

1. Projeto e construção do primeiro protótipo de gerador eletromagnético com arquitetura em levitação magnética que inclua mecanismos com capacidade de adaptação do curso do gerador;
2. Verificação experimental da melhoria do desempenho do gerador (maximização da energia elétrica gerada) quando o curso do gerador é adaptado às variações da excitação mecânica exterior;
3. Desenvolvimento de um modelo não linear e simulação numérica para otimização com capacidade de adaptação automática do curso do gerador em função das variações do movimento causadas pela fonte de energia mecânica exterior ao gerador. Incluída está a identificação dos cursos ótimos do gerador.

Este trabalho apresenta pela primeira vez uma demonstração experimental da capacidade de um mecanismo de adaptação (do curso do gerador) na otimização do desempenho de geradores eletromagnéticos.

1.4 Estrutura da dissertação

A partir desta secção a dissertação está organizada em vários capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica. Neste capítulo foram analisados em detalhe os estudos mais relevantes de forma a permitir uma breve explicação do estado de arte atual;
- Capítulo 3: Métodos. No capítulo dos métodos foi documentado o projeto do protótipo do gerador adaptativo, o aparato experimental utilizado nos ensaios e o modelo computacional desenvolvido para simular o gerador eletromagnético;
- Capítulo 4: Resultados. Neste capítulo foram analisados os resultados dos testes experimentais adquiridos com o protótipo do gerador eletromagnético adaptativo e os resultados de simulação obtidos a partir do modelo computacional desenvolvido;

- Capítulo 5: Discussão e conclusão. No capítulo discussão e conclusão foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos e a atual revisão da literatura. Foi também realizada uma breve descrição dos trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta os estudos relevantes de geradores eletromagnéticos com arquitetura em levitação magnética desenvolvidos, permitindo uma explicação do atual estado de arte. Os estudos mais relevantes foram neste âmbito escolhidos de forma a fornecer uma análise impactante sobre as principais investigações nesta área [37]. Os artigos selecionados para esta análise atendem a quatro requisitos:

- As arquiteturas devem incluir dois ou mais ímanes e um ou mais enrolamentos;
- As arquiteturas devem incluir um elemento magnético fixo e um ou mais elementos magnéticos com levitação magnética;
- As arquiteturas devem ter sido projetadas para movimentos axiais do(s) íman(es) em levitação dentro da estrutura do gerador;
- As arquiteturas devem apenas ter configurações de indução eletromagnéticas mono-estáveis (configurações multi-estáveis foram consideradas fora do âmbito desta revisão).

Na secção 2.1 foram examinados vários tipos de configurações, assim como os procedimentos experimentais que validaram cada modelo. Dos trabalhos selecionados foram tidos em atenção os seguintes dados: (1) arquitetura proposta por cada autor; (2) os parâmetros geométricos e construtivos mais relevantes utilizados para caracterizar cada gerador, designadamente a geometria da estrutura no qual o íman em levitação se desloca, o design do(s) enrolamento(s), as especificações dos elementos magnéticos; (3) as diferentes abordagens para modelar cada fenómeno físico dos mecanismos de transdução do gerador: campo magnético produzido pelos elementos magnéticos, forças magnéticas repulsivas, tensões elétricas induzidas, correntes elétricas, coeficientes de acoplamento eletromecânico, atrito e forças de amortecimento; (4) comparação entre os resultados simulados e experimentais obtidos; (5) abordagens para otimização do design [37].

Os artigos foram classificados consoante o número de enrolamentos e de ímanes permanentes em levitação como se segue: (i) um único enrolamento e um único

íman em levitação: 8 configurações [16, 38, 41–46] ; (ii) um único enrolamento e múltiplos ímanes em levitação: 5 configurações [7, 24, 47–49]; (iii) múltiplos enrolamentos e um único íman em levitação: 4 configurações [50–53]; (iv) múltiplos enrolamentos e múltiplos ímanes em levitação: 6 configurações [6, 39, 54–57]. Cada um dos grupos foi descrito segundo uma ordem cronológica relativa ao ano de publicação do artigo.

2.1 Tipos de configurações e validações experimentais

2.1.1 Categoria 1 - Um único enrolamento e um único íman em levitação

A estrutura proposta por Constantinou *et al.* [41] utilizou três ímanes permanentes anelares (furados) com pólos magnéticos que garantem forças repulsivas entre ímanes. A estrutura foi constituída por dois ímanes fixos, um em cada extremidade e um móvel a levitar no centro. Ao longo do eixo central da estrutura existe um veio que passa no interior de cada um dos ímanes, limitando assim o movimento do íman central ao movimento axial (Fig. 2.1). Um efeito de mola não linear é fornecido pelas forças repulsivas entre os ímanes fixos e o íman em levitação. O protótipo foi construído para possibilitar definir várias distâncias entre ímanes por meio de quatro varões roscados, que fazem descer ou subir a tampa que contém o íman fixo superior.

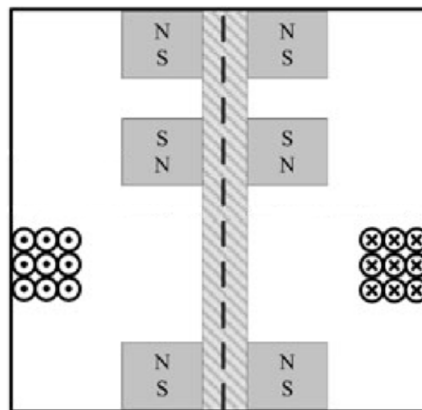


Figura 2.1: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Constantinou *et al.* [41, 42].

Para maximizar o desempenho do gerador para baixas frequências de excitação, os autores definiram alguns requisitos gerais: a massa inercial deve ser tão grande quanto possível, deve minimizar-se o amortecimento mecânico e as perdas por atrito.

Foram realizados ensaios com aproximadamente a frequência de ressonância em função da distância entre os ímanes fixos, para diferentes graus de ímanes (N35, N40 e N48). Com o aumento do campo magnético as forças de repulsão magnéticas alteram-se, provocando um aumento na frequência de ressonância.

A validação experimental foi feita comparando e medindo a raiz do valor quadrático (RMS) do deslocamento do íman em levitação, em função da frequência de excitação, para três distâncias diferentes entre os ímanes fixos nas extremidades. Diversos ensaios, com e sem a resistência de carga que garante a máxima transferência de potência, foram realizados para se obter a tensão elétrica nos terminais do enrolamento em função da frequência de excitação [41]. Os resultados teóricos e experimentais mostraram uma boa correlação, e também evidenciaram que a variação na distância entre ímanes tem uma grande influência na frequência de ressonância do gerador.

A mesma equipa de investigação [42], usando o mesmo protótipo que o anteriormente descrito [41], assumiram teoricamente que tanto o amortecimento elétrico como o amortecimento mecânico seriam representados como viscosos, conseguindo assim melhores aproximações entre resultados experimentais e teóricos. Foram comparados os coeficientes de acoplamento eletromecânico teórico e experimental em função do deslocamento do íman em levitação. Estas medições foram obtidas movendo o íman em levitação com uma excitação sinusoidal axial muito pequena, a partir de uma posição relativa inicial da bobine em relação ao centro. Medindo a excitação e a tensão elétrica de circuito aberto nos terminais do enrolamento, utilizando acelerómetros de alta precisão, amplificadores de carga e osciloscópios, o acoplamento eletromecânico para essa posição relativa inicial pode ser encontrado utilizando posteriormente métodos analíticos. Este processo foi repetido para diferentes posições relativas iniciais.

O amortecimento elétrico não foi considerado porque somente se realizaram ensaios em circuito aberto. Três materiais diferentes para o guia central foram analisados comparando os seus fatores de amortecimento mecânico: Nylon, Alumínio Anodizado e Alumínio Anodizado Facetado. O Nylon demonstrou ter o menor coeficiente de amortecimento mecânico. O efeito não linear foi demonstrado comparando as velocidades absolutas simuladas e medidas do íman em levitação em função de diferentes excitações de entrada e utilizando um intervalo de frequências de excitação entre os 35 e 40 Hz. Uma aceleração de 2,1g para as frequências de excitação de 37 e 38 Hz foi aplicada ao sistema com diferentes resistências de carga obtendo a potência média em função das diferentes resistências. Estes resultados mostraram que a máxima transferência de potência ocorre para uma determinada resistência de carga ótima, tal como previsto pelo teorema da máxima transferência de potência.

Foissal *et al.* [43] propôs dois macro-geradores sensíveis a várias frequências de excitação. Em cada macro-gerador várias configurações de geradores foram usadas para, desta forma, conseguir atingir um maior número de frequências de ressonância.

cia. Estes dois macro-geradores foram testados numa gama de frequências inferior a 10 Hz. A potência máxima de um gerador eletromagnético ocorre quando a frequência de ressonância corresponde à frequência natural da excitação. Os autores propuseram superar este problema com várias configurações de geradores de forma a ter um sistema multi-frequência. A estrutura de cada gerador é constituída por uma estrutura contendo dois ímanes fixos nas extremidades e um íman em levitação. Em torno da estrutura existe um enrolamento de cobre. Foram realizados ensaios para entender como o campo magnético afeta as forças magnéticas de interação entre os ímanes. Os resultados mostraram que a frequência de ressonância aumenta com o aumento das forças magnéticas. No macro-gerador quadrangular a estrutura foi composta por quatro geradores com as mesmas dimensões, cada um deles disposto num canto de um prisma quadrangular (Fig. 2.2a). Devido às várias configurações os geradores operavam a diferentes frequências de ressonância. No macro-gerador translacional a estrutura multi-frequência também é composta por quatro geradores, embora dispostos uns por cima dos outros (Fig. 2.2b). Para separar os ímanes fixos entre os diferentes geradores foi colocado um espaçador de Teflon.

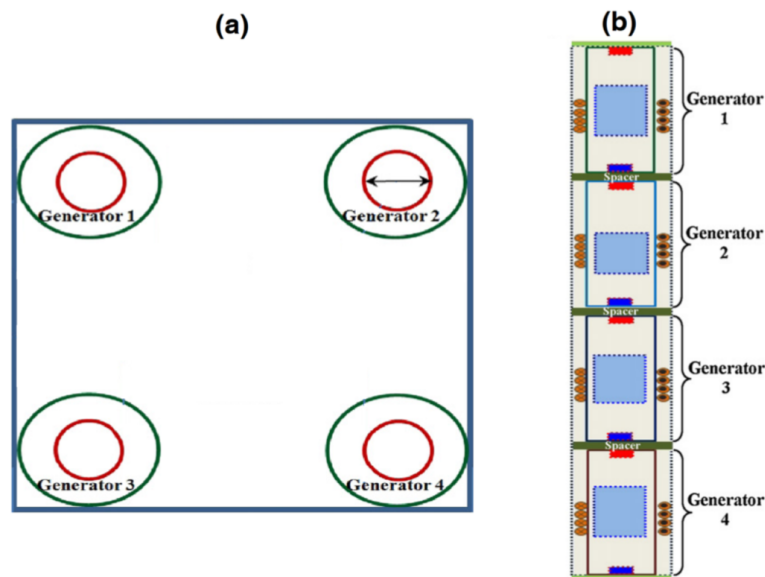


Figura 2.2: Esquemático representativo dos macro-geradores eletromagnéticos propostos por Foisal *et al.* [43], (a) modelo quadrangular (vista de cima) e modelo translacional (vista em corte lateral).

O aparato experimental foi dividido em duas partes: numa primeira foram otimizados o número de espiras, diâmetro do fio de cobre e comprimento do enrolamento; numa segunda parte, o espaçamento entre ímanes. Foram estudados os efeitos dos diferentes componentes, em circuito aberto, o que permitiu concluir que a otimização é um problema multivariável. Após a análise dos dados da tensão elétrica RMS em função da frequência, foi possível concluir aos autores que o

macro-gerador translacional teve uma maior densidade de potência, embora maiores tensões elétricas tenham sido produzidas com o macro-gerador quadrangular (devido ao seu maior volume). Os resultados mostraram que o modelo translacional é claramente vantajoso, embora a construção desta estrutura seja mais complexa.

Berdy *et al.* [44] apresentou uma nova configuração, com recurso a uma estrutura retangular com guias ao longo da caixa. As guias foram utilizadas para diminuir o amortecimento mecânico do íman a levitar devido ao atrito (Fig. 2.3). A estrutura foi composta por um conjunto de ímanes fixos, um íman retangular em levitação e um enrolamento em torno da estrutura oca. Os ímanes fixos foram colocados na extremidade inferior e, opcionalmente no topo, dependendo da orientação do gerador [44]. O número de ímanes utilizado na extremidade foi fixado em dois. Contudo, neste estudo os autores apenas usaram ímanes fixos numa extremidade. Este design de gerador permitiu um dispositivo de menor espessura em comparação com os outros cilíndricos.

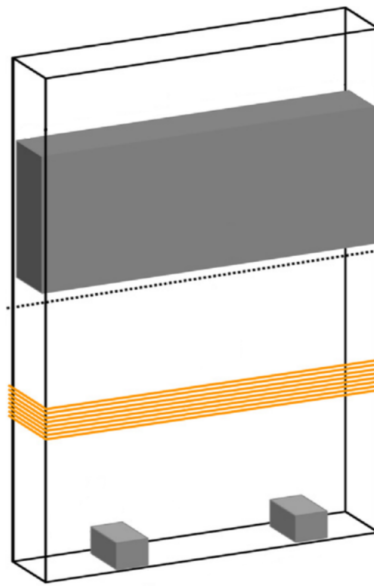


Figura 2.3: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Berdy *et al.* [44].

Foram utilizadas duas acelerações para excitar o gerador, 0,075g e 0,1g, num intervalo de frequências de 5 a 9 Hz. Este intervalo de frequências foi escolhido pelo facto da dinâmica do movimento humano se encontrar abaixo dos 10 Hz. Foi calculada uma resistência de carga ótima usando um intervalo de frequências entre 6,3 Hz e 6,8 Hz, e utilizando a potência elétrica máxima RMS em função de diferentes resistências de carga para assegurar a máxima transferência de potência. Os resultados experimentais mostraram ligeiras diferenças com os resultados teóricos. Os motivos que conduziram a essa diferença deveram-se a um ligeiro

desvio na frequência de ressonância (0,3 Hz), à geometria do enrolamento não ser exata e à localização dos enrolamentos não ser conhecida e modelada com precisão o que afeta o coeficiente de acoplamento eletromecânico e, portanto, a resistência ideal. Os resultados teóricos para a mesma resistência utilizada experimentalmente mostraram uma excelente correlação com os dados experimentais.

Foram comparados resultados com a potência elétrica gerada em função da localização do enrolamento para diferentes excitações externas por forma a otimizar a sua posição. Por fim, foram feitas comparações com outros artigos relevantes utilizando geradores cilíndricos. As comparações foram feitas com recurso aos parâmetros DP e DPN.

Diferentes autores fizeram ensaios experimentais utilizando o movimento do ser humano [7, 38, 39, 45, 47, 56]. Esse movimento foi geralmente medido com recurso a acelerómetros. Os geradores eletromagnéticos foram colocados em diferentes partes do corpo humano (parte superior do braço, perna (região tibial), quadril, peito) enquanto este usualmente marchava ou corria (Fig. 2.4).

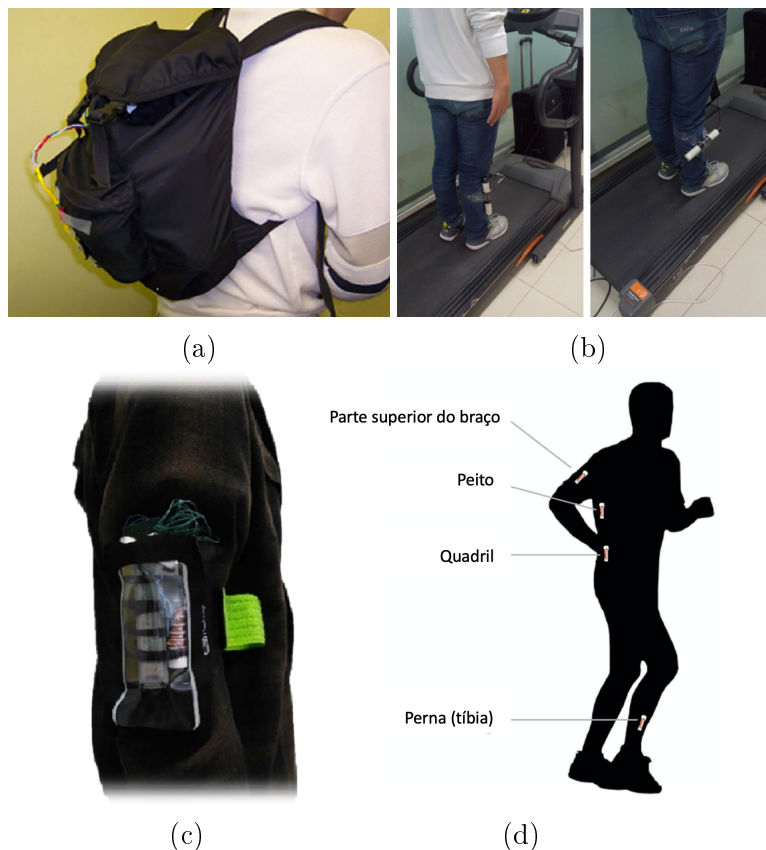


Figura 2.4: Localizações do gerador para testes no corpo humano [39].

Liu *et al.* [45] apresentou um design, modelação e otimização de um gerador para diferentes comprimentos da estrutura e alturas de enrolamento com vista a

otimizar o gerador ao movimento do ser humano. Saha *et al.* [47] já tinha desenvolvido um gerador cilíndrico similar, mas com um ou dois ímanes em levitação onde também tentou otimizar o gerador ao movimento humano.

Neste estudo o gerador foi composto por uma estrutura cilíndrica em vidro acrílico, dois ímanes fixos e um íman móvel cilíndricos e, um enrolamento de cobre em torno da parte exterior da estrutura oca. Os ímanes fixos têm metade do diâmetro do íman central. A estrutura foi furada junto às extremidades para assim expelir o ar e reduzir o seu amortecimento. Neste estudo foram fabricados nove protótipos com três comprimentos diferentes. Para cada um dos comprimentos da estrutura foram utilizadas três alturas de enrolamento diferentes, 10, 20 e 30 mm. Os enrolamentos tinham todos o mesmo comprimento.

Foi observado que o aumento da aceleração na excitação mecânica exterior acentuou as não-linearidades. Observações mostraram que quando o íman entra na região em torno da qual se encontra o enrolamento cria uma ligação crescente de fluxo magnético que produz uma tensão elétrica positiva, quando íman está completamente inserido nessa região a ligação de fluxo magnético é constante, e portanto a tensão elétrica induzida é zero. Quando o íman sai da região em torno da qual se encontra o enrolamento cria uma ligação de fluxo decrescente produzindo uma tensão elétrica induzida negativa. Os autores concluíram através dos resultados que um aumento na altura do enrolamento mantendo o comprimento da estrutura fixa influencia negativamente a potência elétrica produzida pelo gerador.

A fim de maximizar a tensão elétrica induzida, a altura do enrolamento deve ser limitada de modo a que o fluxo magnético não seja constante durante grande parte do período de produção de energia. Para uma altura fixa do enrolamento foi observado que um comprimento maior da estrutura para a mesma excitação mecânica exterior, faz com que o íman em levitação demore mais tempo a deslocar-se entre extremidades, resultando numa menor frequência do movimento.

Foram realizados vários ensaios sem resistência de carga para três acelerações com a tensão elétrica em função da frequência de excitação com o objetivo de validar o modelo computacional utilizado. Os ensaios mostraram uma boa correlação entre os dados experimentais e simulados.

Berdy *et al.* [38] usaram uma estrutura similar à anteriormente descrita [44]. Diferentes aparatos experimentais foram construídos alterando o material da estrutura onde o íman central se movia e usando trilhos, ou não, com a função de guiamento. O objetivo foi minimizar os efeitos do amortecimento mecânico. Para conseguirem um melhor desempenho, três protótipos foram fabricados: usando uma estrutura de acrílico sem trilho-guia; usando uma estrutura de acrílico com trilho-guia; e usando uma estrutura de Teflon (PTFE) com trilho-guia. A finalidade do trilho-guia foi minimizar a área de contacto entre a superfície interior do gerador e o íman em levitação.

Ensaio experimentais foram realizados com três diferentes orientações do gerador: vertical, rotação de 15° e rotação de 30°. Resultados teóricos e experimentais em circuito aberto colocando a tensão elétrica em função do tempo foram compara-

dos para as três posições e três configurações diferentes. A partir desses resultados foi mostrado que o dispositivo de acrílico sem trilho-guia apresentava um maior amortecimento, enquanto a configuração com estrutura em Teflon com trilho-guia tinha o menor amortecimento, como era esperado devido ao coeficiente de atrito do Teflon ser inferior. Várias comparações entre as três posições foram realizadas variando a resistência de carga e medindo a potência elétrica dos diversos dispositivos.

A configuração de Teflon com uma resistência de carga de 1000Ω foi usada para os testes com movimentos humanos. A transformada rápida de Fourier (FFT) da aceleração e da tensão elétrica foram realizadas para comparar os dados teóricos e experimentais mostrando uma boa correlação. Com base nesses resultados concluíram ainda que a 3ª harmônica do passo de frequência da FFT, por estar mais próximo da frequência de ressonância, desempenhava um papel importante na potência elétrica produzida, apresentando uma maior amplitude. Os autores concluíram que a potência elétrica do gerador é altamente influenciada pela proximidade da harmônica mais próxima da frequência de ressonância.

Soares dos Santos *et al.* [16] propôs um gerador eletromagnético compacto. A sua configuração foi composta por uma estrutura cilíndrica oca com três ímãs permanentes cilíndricos em forma de disco. Na zona central exterior, uma parte do cilindro foi envolvida com um enrolamento de múltiplas camadas. Dois dos três ímãs são estáticos em cada extremidade da estrutura. O terceiro ímã move-se livremente no interior da estrutura e, quando está próximo dos outros dois, experiencia uma força repulsiva (Fig. 2.5).



Figura 2.5: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Soares dos Santos *et al.* [16].

O estudo realizou uma validação experimental de um modelo semi-analítico comparando as respostas em estado estacionário e transiente em função do movimento e da impedância de carga. Ensaios experimentais e simulados foram realizados medindo a tensão elétrica em função do tempo para diferentes cargas, amplitudes de excitação sinusoidais e frequências. Os resultados teóricos mostraram correlações superiores a 86% com os resultados experimentais, assim como desvios na previsão da energia elétrica inferiores a 15%.

O modelo desenvolvido apenas permite a otimização geométrica dos geradores antes da sua fabricação.

Kecik *et al.* [46] construiu um protótipo similar ao analisado por Soares dos Santos *et al.* [16] com três ímanes cilíndricos, dois deles fixos e um móvel, um enrolamento e uma estrutura de plexiglass. A força de repulsão magnética foi obtida experimentalmente medindo a distância entre o íman em levitação e um dos ímanes fixos para diferentes massas colocadas sobre o íman em levitação. É importante realçar que os parâmetros de suspensão do modelo computacional dependem muito da distância entre os ímanes permanentes, pelo que uma alteração nessa distância tem um efeito muito significativo nos resultados.

O objetivo deste estudo foi desenvolver um novo método de cálculo para o coeficiente de acoplamento eletromecânico que relaciona componentes mecânicos e elétricos. Outros autores calcularam o coeficiente de acoplamento a partir de métodos semi-analíticos [38, 41, 42, 44], no entanto, a maioria assume-o como constante. Contudo, quando a dinâmica expressa pelo íman em levitação é significativa, essa simplificação pode conduzir a resultados com erros significativos de previsão. Isto implica que quando este valor é tomado como constante deve ser cuidadosamente escolhido e apenas aplicado em situações muito específicas. Nesse sentido o objetivo destes autores foi a identificação do coeficiente de acoplamento com recurso a testes experimentais estáticos e dinâmicos. Os autores estabeleceram um método experimental para adquirir dados da dinâmica da corrente elétrica e do deslocamento do íman em levitação. Impondo uma determinada velocidade no íman em levitação foram realizados ensaios quasi-estáticos e dinâmicos que permitiram adquirir duas curvas que definem o coeficiente de acoplamento eletromecânico em função do deslocamento do íman em levitação.

Estes autores chegaram à conclusão de que quando a frequência é mais elevada do que um determinado valor (neste caso $f > 11,14$ Hz) o modelo com um coeficiente de acoplamento eletromecânico constante exibe duas soluções independentes. Uma destas soluções pode conduzir a movimento caótico e conseqüentemente, a resultados errados.

Os testes experimentais estáticos e dinâmicos também mostraram que o coeficiente de acoplamento eletromecânico é uma função não-linear da posição do íman em levitação e depende fortemente da posição do íman em relação ao enrolamento.

2.1.2 Categoria 2 - Um único enrolamento e múltiplos ímanes em levitação

Saha *et al.* [47] propôs três configurações diferentes. Na primeira configuração propôs uma estrutura simples com três ímanes cilíndricos, dois fixos e um móvel; na segunda acrescentou um outro íman e um espaçador que ficou entre os dois ímanes em levitação; e na última propôs uma configuração semelhante à segunda configuração, embora com a diferença que retirou o íman fixo superior (Fig. 2.6). Foi realizada uma análise de elementos finitos (FEA) com um e dois ímanes em levitação, para estudar as forças repulsivas que existem entre os ímanes fixos e os ímanes em levitação e, para compreender a sua ligação relativamente ao fluxo de corrente no enrolamento. No final, foram realizados diversos ensaios experimentais com o gerador eletromagnético acoplado a uma mochila, sem resistência de carga e com resistência de uma carga que permitia a máxima transferência de potência. Posteriormente foram comparados os resultados entre os diferentes protótipos e estes com outros estudos anteriormente realizados. Os autores concluíram que o facto de não se inserir um íman fixo na extremidade superior permite produzir tensões elétricas mais elevadas comparativamente com os sistemas testados com dois ímanes fixos.

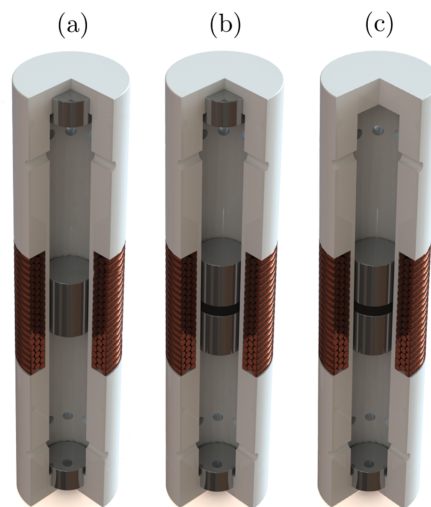


Figura 2.6: Esquemático representativo dos geradores eletromagnéticos proposto por Saha *et al.* [47] (a) com um único íman em levitação, (b) com dois ímanes em levitação e um espaçador entre eles; (c) com um único íman fixo [37].

O transdutor de energia proposto por Dallago *et al.* [48] usa quatro ímanes, dois ímanes permanentes em levitação e dois fixos nas extremidades, dispostos de forma a que estes apliquem uma força repulsiva nos dois ímanes em levitação (Fig. 2.7). Nesta configuração, os dois ímanes em levitação não possuem nenhum tipo de espaçadores entre eles. Um tubo cilíndrico em Teflon foi utilizado para construir a parte principal da estrutura.

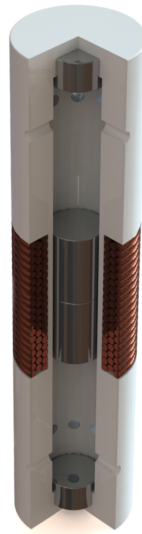


Figura 2.7: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Dallago *et al.* [48].

Dallago *et al.* [48] aplicaram excitações ao gerador apenas variando a frequência e mantendo a amplitude da excitação de entrada fixa em 1g. Os dados adquiridos de um modelo FEM foram utilizados no modelo computacional desenvolvido em Simulink possibilitando assim simular os efeitos não-lineares e, assim, estimar a força magnética de repulsão não linear e o campo magnético devido ao enrolamento. Desta forma foi possível prever com uma maior precisão o desempenho do gerador aquando de diferentes acelerações externas aplicadas ao sistema.

Os autores alteraram o modelo de *Simulink* considerando a força de *Lorentz* para observar o impacto na precisão do modelo. Para mostrar o peso deste fenómeno no desempenho do gerador foi observada a tensão elétrica de pico para uma determinada aceleração e frequência variando a resistência de carga. O erro máximo entre os valores medidos e os modelos computacionais sem a força de *Lorentz* variaram entre 20% e 80%. Considerando uma resistência de carga que permite a máxima transferência de potência, o erro cai para 6% à frequência de ressonância. Finalmente, foi comparada a potência elétrica média fornecida pelo gerador com carga, à frequência de ressonância como função da resistência de carga com e sem forças de *Lorentz*.

Munaz *et al.* [24] apresentaram várias configurações com múltiplos ímanes em levitação. Estes ensaios foram realizados utilizando desde um até cinco ímanes em levitação (cinco configurações diferentes) com os pólos dispostos em posição de repulsão. A estrutura cilíndrica do gerador foi fabricada de vidro acrílico. Nessa estrutura existiam parafusos que podiam ser ajustados para alterar o entreferro entre os ímanes fixos e os ímanes em movimento. Os resultados experimentais e teóricos foram comparados através da tensão elétrica em circuito aberto ao longo do tempo, usando desde um até cinco ímanes em levitação. Após estas medi-

ções, foi comparada a tensão elétrica RMS em circuito aberto com as diferentes distâncias entre os ímanes para cada uma das cinco configurações. Os autores chegaram à conclusão de que o número ideal de ímanes em levitação para o seu gerador era três. Para otimizar a resistência de carga, foram realizados ensaios à frequência de ressonância utilizando a configuração com o número de ímanes ideal. Nesses ensaios foi medido a tensão elétrica RMS e a potência elétrica em função de resistências de carga distintas com o objetivo de descobrir qual o valor ideal de resistência que permitiria alcançar a potência máxima do gerador. Foi observado que a resistência de carga onde se obtém o valor mais elevado de potência elétrica não coincide com a resistência de carga onde é obtida a tensão elétrica máxima RMS.

Masoumi e Wang [49] propuseram uma arquitetura colocando os pólos de forma semelhante a Munaz *et al.* [24] (em posição de repulsão constante entre eles). Foi utilizada uma haste roscada a unir os ímanes em levitação de forma a garantir que as suas posições axiais relativamente uns aos outros não seriam alteradas (Fig. 2.8). A estrutura do gerador foi fabricada em policarbonato. Os ímanes em levitação são separados por espaçadores para aumentar o campo magnético entre eles. A influência dos espaçadores é comparada mudando a sua espessura e utilizando materiais diferentes, com diferentes permeabilidades, a fim de se analisar a maximização da eficiência energética do gerador. Comparações entre aço carbono de permeabilidade relativa muito baixa (cerca de 100) até um aço carbono com 99,95% de ferro de elevada permeabilidade relativa (cerca de 200.000) e incluindo diferentes espessuras de espaçadores foram realizadas com o intuito de determinar o melhor desempenho. Os primeiros ensaios indicaram claramente que o enchimento com metal aumenta a intensidade do campo magnético mais do que o enchimento de ar. Não foi observada uma diferença perceptível entre os metais com permeabilidades diferentes.

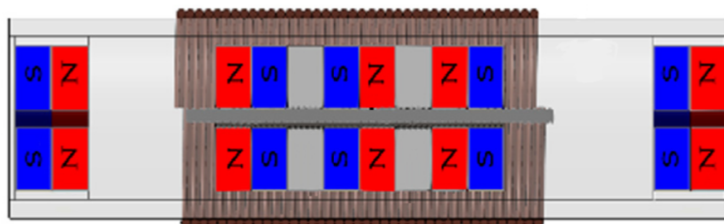


Figura 2.8: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Masoumi e Wang [49].

Wang *et al.* [7] usou duas configurações de gerador com dois ímanes fixos em cada uma das duas extremidades e um conjunto de três e de seis ímanes em levitação (Fig. 2.9). Esta estrutura foi similar à arquitetura utilizada por Masoumi e Wang [49] com a diferença de que esta não usa nenhum sistema de guiamento para garantir as posições axiais dos ímanes em levitação relativamente uns aos

outros, pois o conjunto de ímanes têm os pólos posicionados de forma a criar forças atrativas em vez de repulsivas.

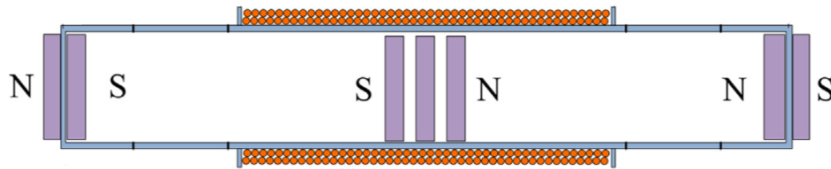


Figura 2.9: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Wang *et al.* [7].

Foi realizada uma FEA utilizando apenas dois ímanes em levitação para estudar qual a melhor disposição dos pólos magnéticos. Primeiramente, os dois ímanes foram posicionados com os pólos dispostos de forma a criar forças atrativas entre eles e, noutro ensaio, com os pólos dispostos de forma a criar forças repulsivas. Quando os ímanes se encontraram com os pólos em posição repulsiva, a amplitude da tensão elétrica gerada aumentou com o aumento da distância entre os ímanes, mas diminuiu quando os ímanes tinham os pólos em posição atrativa.

Nos testes experimentais com um conjunto de três e seis ímanes em levitação foi medida a tensão elétrica em circuito aberto, com três acelerações diferentes aplicadas, 0,35g, 0,5g e 0,85g. Estes dados foram usados para comparar com os resultados de simulação de um modelo eletromecânico teórico. Foram realizadas simulações nas quais foram analisadas as respostas de tensão elétrica no caso em que a frequência aumentava ou diminuía, para diferentes níveis de amplitude. Quando comparadas as respostas, foi detetado um erro relativo máximo inferior a 15% para os testes de frequência ascendente. Contudo, nos testes de frequência descendente foi constatada uma diferença considerável entre as simulações e os ensaios experimentais.

Foram realizados ensaios experimentais acoplando os geradores na região da perna de dois seres humanos (com pesos diferentes). Colocando uma resistência de carga de 5Ω nos terminais do enrolamento do gerador foram realizados ensaios para verificar o funcionamento do gerador numa situação real de utilização enquanto os participantes andavam e corriam. A potência elétrica média em função da velocidade foi medida para diferentes conjuntos de ímanes em levitação (três e seis) e para duas distâncias entre ímanes com o gerador acoplado à perna dos participantes em duas posições, vertical e transversal. Foi observado que a potência elétrica máxima é atingida quando o participante está a correr a 8 km/h e a configuração contém seis ímanes em levitação, a distância entre ímanes é maior e o gerador se encontra transversalmente. Finalmente, foram comparados os valores entre cada participante para medir o impacto que as diferentes massas dos partici-

pantes têm nos testes experimentais. Foi observado que o participante com menor massa consegue alcançar melhores resultados para as diferentes configurações do gerador montado verticalmente na sua perna, no entanto, quando o gerador é colocado transversalmente o participante com maior massa consegue um desempenho ligeiramente superior.

2.1.3 Categoria 3 - Múltiplos enrolamentos e um único íman em levitação

O modelo sugerido por Mann e Sims [50] foi constituído por dois enrolamentos de múltiplas camadas, dois ímanes fixos em cada extremidade e um íman a levitar, como é observado na Fig. 2.10. Em ambas as extremidades da estrutura cilíndrica existe uma rosca, de modo a que o espaçamento entre os ímanes possa ser variado de modo estático.

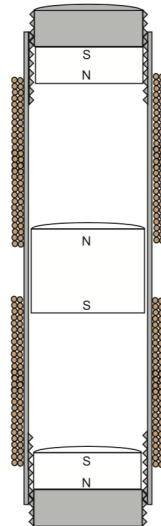


Figura 2.10: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Mann e Sims [50].

Mann e Sims [50] propuseram um modelo computacional que foi utilizado para calcular uma série de previsões de velocidades relativas em função de frequências, para diferentes amplitudes de excitação e dois níveis de amortecimento. A razão de usarem dois níveis de amortecimento teve como objetivo evidenciar a não linearidade do comportamento da resposta, sendo esta fortemente dependente desse parâmetro, o que significa que afeta muito a velocidade do íman central. Na verdade, com o aumento do coeficiente de amortecimento, há uma diminuição da velocidade dos ímanes em levitação. Pequenas amplitudes na excitação mecânica exterior conduziram a um comportamento linear na velocidade do íman em levitação, resultando numa resposta com um único atrator periódico (única solução com quaisquer condições iniciais), como destacado na Fig. 2.11a. No entanto, o aumento da amplitude da excitação mecânica exterior mostrou um comportamento

altamente não linear caracterizado por múltiplos atratores periódicos e histerese (Fig. 2.11b).

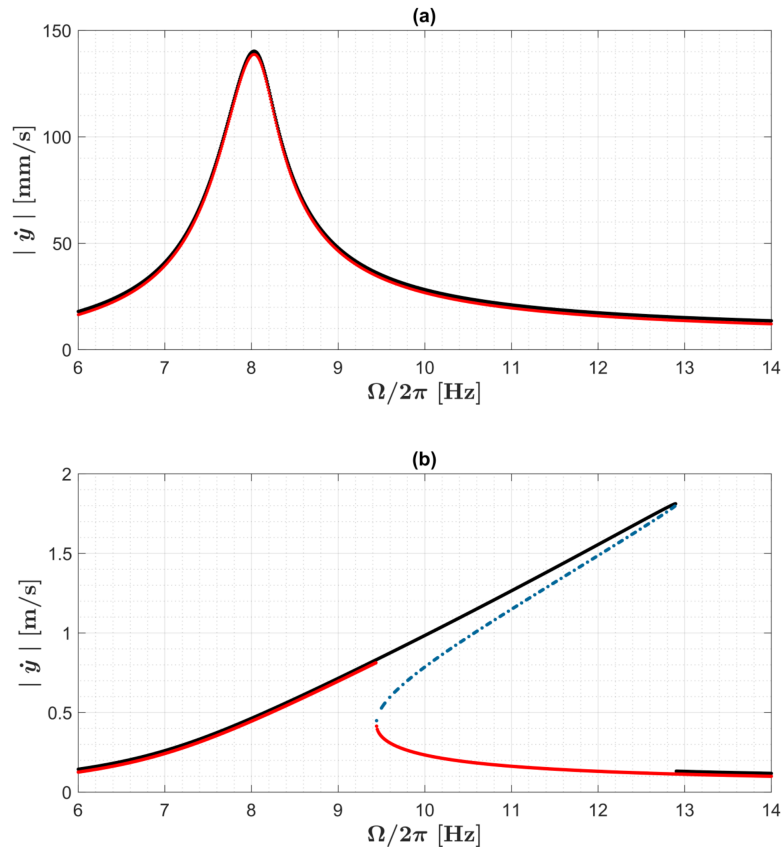


Figura 2.11: Resposta da velocidade relativa com a amplitude de excitação exterior de: $0,5 \text{ m/s}^2$ (a) e 4 m/s^2 (b). O comportamento teórico devido à não linearidade observado nas frequências com trajetórias ascendentes e descendentes é identificado pelas linhas sólidas em preto e vermelho (soluções periódicas estáveis), enquanto a linha tracejada azul ilustra soluções periódicas instáveis [50].

Os resultados teóricos foram validados com ensaios experimentais. Este trabalho conduziu a duas conclusões principais: (1) a resposta não linear pode resultar em velocidades relativamente grandes numa maior gama de frequências; (2) a frequência de excitação onde ocorre a velocidade máxima relativa pode ser a uma frequência bastante diferente da frequência de ressonância linear. Por fim, os autores desenvolveram uma equação analítica que permite computacionalmente encontrar a frequência de excitação na qual a potência elétrica máxima ocorre.

Bonisoli *et al.* [51] desenvolveram o projeto de um gerador eletromagnético que visa a obtenção de energia a partir da deformação do pneu de um carro em movimento. O gerador é composto por uma estrutura com dois enrolamentos com espiras em direções opostas em 90% da sua superfície exterior. Foi utilizado um

ímã em levitação e dois amortecedores não magnéticos (*bumpers*, cujo material não foi identificado) para evitar danos no ímã em movimento. Um ímã de menor tamanho que o ímã em levitação, foi fixo na extremidade inferior para aplicar uma pré-carga não linear elástica (Fig. 2.12).

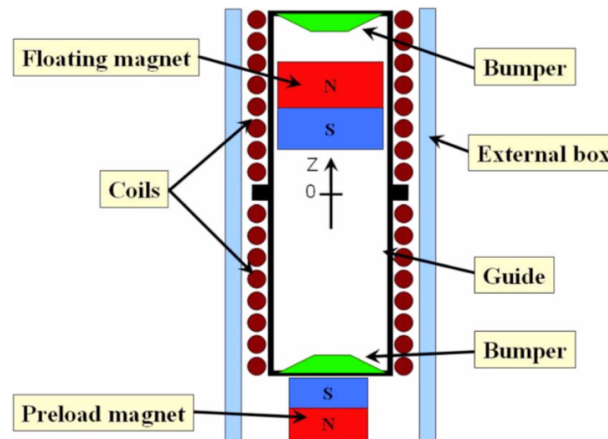


Figura 2.12: Esquema do gerador proposto Bonisoli et al. [51].

Com o propósito de melhorar o desempenho do gerador numa gama mais ampla de velocidades foram levados em conta dois comportamentos dinâmicos: o de baixas velocidades, em que a força magnética elástica não linear é usada para ajustar a ressonância mecânica do gerador e para aumentar as oscilações do ímã em levitação; o de velocidades médias e altas, a contribuição da ressonância tem progressivamente menos impacto conforme o aumento do número de revoluções no movimento do pneu sendo este o comportamento adequado para a recuperação de energia. Foi realizada uma análise com várias configurações de ímanes e analisadas as diferentes forças magnéticas associadas. Foi analisada a frequência num intervalo de [6 - 250] Hz em função do deslocamento e, a potência e tensão elétricas em função da velocidade. Os resultados mostraram que a potência elétrica aumenta progressivamente com a velocidade até atingir perto de 170 km/h (12 mW), tendo uma zona entre 40 e 100 km/h em que o aumento de potência elétrica observado mostra uma tendência aproximadamente linear. Quando a velocidade é superior a 170 km/h a tendência é um decréscimo da potência elétrica produzida pelo gerador. Analisando os resultados experimentais e simulados, estes mostraram uma boa concordância entre eles. Concluindo, este estudo mostrou uma nova aplicação para estes dispositivos e mostrou que para uma grande gama de velocidades existe uma produção razoável de energia. No entanto, dependendo dos parâmetros de construção do gerador, efeitos de saturação são observados para grandes velocidades.

O gerador proposto por Morais *et al.* [52] foi constituído por uma estrutura de Teflon com dois enrolamentos externos separados por uma determinada distância e com a orientação das espiras em direções opostas. No interior da estrutura

existe um ímã móvel de neodímio acoplado a uma mola fixa na parte superior da estrutura; na parte inferior existe um ímã fixo que funciona como um travão magnético (Fig. 2.13).

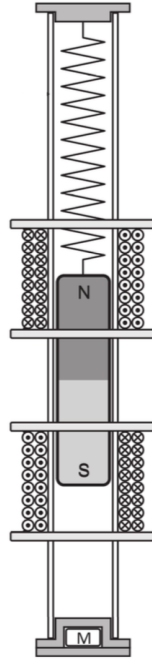


Figura 2.13: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Morais *et al.* [52].

O primeiro gerador a ser testado experimentalmente foi composto por um enrolamento e um ímã em levitação. Este protótipo não apresentou um desempenho satisfatório. A principal razão para esses resultados foi a massa inercial (ímã em levitação) ser demasiado pequena para permitir atingir a frequência de ressonância. Outra razão apresentada foi que a proximidade dos pólos magnéticos do ímã em levitação poderiam ter um efeito negativo nos resultados. Foram realizados ensaios utilizando um enrolamento com um ponto médio para permitir que fossem medidas duas zonas do enrolamento. A análise da resposta permitiu observar que o enrolamento total apresentava uma amplitude positiva e negativa, menor que a medida em cada zona do enrolamento individualmente. Esta análise mostrou que os pólos do ímã estavam a funcionar um contra o outro relativamente ao enrolamento. Para reduzir ou eliminar os efeitos criados pelos pólos, a distância entre eles foi aumentada utilizando um ímã mais longo. Assim foram obtidas linhas de campo magnético quase perpendiculares à orientação das espiras do enrolamento.

Um novo gerador foi construído tendo em conta as considerações aprendidas com o primeiro protótipo sem aumentar o seu volume inicial. Os efeitos na saída foram comparados entre as duas configurações. Ensaios teóricos e experimentais medindo a evolução da tensão e potência elétricas para um conjunto de cargas e

frequências de excitação diferentes foram analisados. Ficou demonstrado que o gerador tem potencial para gerar energia para vários dispositivos e que o seu desempenho pode ser maximizado com o uso de uma mola adaptada para a frequência de ressonância do gerador.

Yang *et al.* [53] propôs uma nova estrutura de gerador no qual utiliza um enrolamento extra para extrair mais energia do movimento do íman em levitação. Esta estrutura é similar à de Constantinou *et al.* [41, 42], os quais usaram dois ímanes fixos nas extremidades, um íman em levitação, um enrolamento em torno de uma estrutura de plexiglass e no centro dos ímanes passa um guiamento que tem como função diminuir o atrito do íman em levitação relativamente à estrutura. A diferença é que neste caso o guiamento foi constituído por um tubo em plexiglass que contém no seu interior um segundo enrolamento que permite produzir mais energia a partir do movimento do íman em levitação (Fig. 2.14).

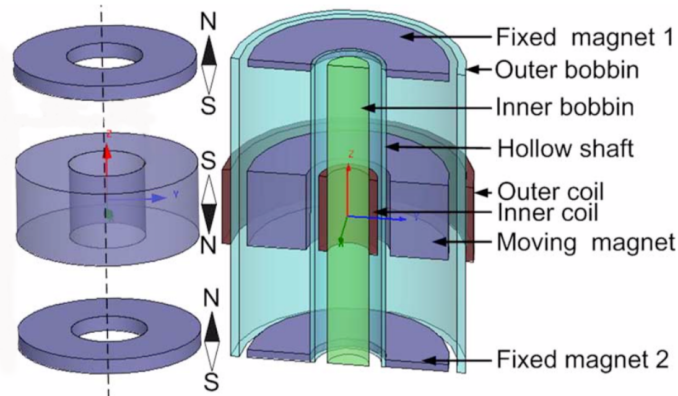


Figura 2.14: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Yang *et al.* [53].

A magnitude das forças magnéticas repulsivas foram comparadas com a força da gravidade e de atrito. Visto a magnitude das forças magnéticas repulsivas serem sempre cinco vezes maiores que as outras duas, os autores decidiram ignorar o seu efeito. Foi realizada uma simulação utilizando um modelo FEM que permitiu uma análise à distribuição e à intensidade do campo magnético do gerador. A maior intensidade de campo magnético estava concentrada na área em redor do íman em levitação o que implicou um aumento da tensão elétrica induzida total com a diminuição da distância entre o íman em movimento e os enrolamentos. O campo magnético no enrolamento interior era superior ao do enrolamento exterior. No entanto, devido ao enrolamento exterior ter um comprimento total maior que o interior, uma tensão elétrica em circuito aberto mais elevada foi obtida. Para garantir que a tensão elétrica produzida estava em fase em ambos os enrolamentos, um deles tinha as espiras orientadas no sentido horário e outro no sentido anti-horário. Todos os resultados teóricos e computacionais mostraram uma boa concordância.

2.1.4 Categoria 4 - Múltiplos enrolamentos e múltiplos ímanes em levitação

Apo e Priya [54] propuseram uma estrutura tubular com dois ímanes fixos em cada uma das extremidades, com vários enrolamentos e três configurações diferentes de ímanes em levitação. Os ímanes têm um guiamento para diminuir o atrito nas paredes da estrutura do gerador, como também foi utilizado por Constantinou *et al.* [41, 42]. O objetivo deste estudo foi minimizar a influência do comprimento do gerador na frequência de ressonância. Três configurações foram simuladas: um único íman em levitação e nenhum espaçador; dois ímanes em levitação e um espaçador; três ímanes em levitação e dois espaçadores (Fig. 2.15). O material utilizado nos espaçadores foi o aço carbono. A altura do conjunto em levitação foi mantida constante ao longo de toda a experiência. Os ímanes foram sempre dispostos de forma a repelirem-se. A união dos ímanes em levitação aos espaçadores foi feita recorrendo a epoxy.

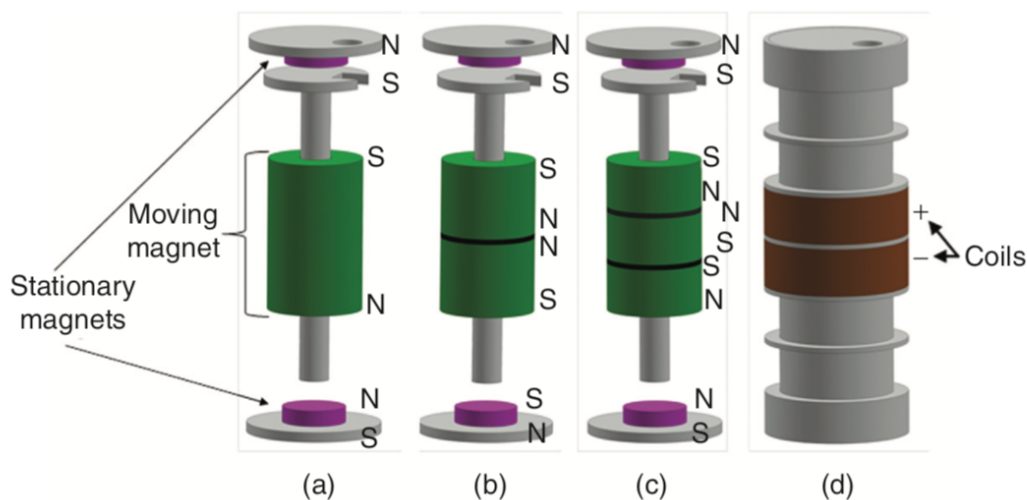


Figura 2.15: Diferentes configurações do gerador proposto por Apo e Priya [54], (a) um único íman em levitação e nenhum espaçador, (b) dois ímanes em levitação e um espaçador, (c) três ímanes em levitação e dois espaçadores, (d) enrolamento e design para as diferentes configurações.

Foram realizadas simulações utilizando modelos FEM e modelação matemática para analisar as forças magnéticas de repulsão, o campo magnético, a dinâmica e a tensão elétrica produzida pelo gerador. A configuração com três ímanes e dois espaçadores em levitação criou duas regiões com um campo magnético muito forte. Estas duas regiões onde o campo magnético é mais forte podem ser direcionadas por dois segmentos de enrolamentos colocados próximos um do outro, criando assim uma configuração mais eficiente. Segundo os resultados das simulações, a configuração com três ímanes em levitação foi a que apresenta uma menor rigidez. Os autores concluíram que quanto maior o número de ímanes em levitação

menor será a rigidez do sistema. A posição de repouso do conjunto de ímanes em levitação em relação ao íman fixo inferior diminui à medida que o conjunto de ímanes em levitação passou de um íman sem espaçador para três ímanes e dois espaçadores. A partir do modelo computacional foi observado que a não linearidade do sistema aumentou conforme foi alterada a configuração de um íman sem espaçador para três ímanes e dois espaçadores. Estes resultados foram reflexo das alterações das forças magnéticas de repulsão entre as diferentes configurações e os ímanes fixos nas extremidades. Com a configuração de três ímanes e dois espaçadores foram obtidos maiores deslocamentos dos ímanes em levitação à frequência de ressonância. A frequência de ressonância diminuiu conforme a configuração foi alterada de um íman em levitação para três ímanes e dois espaçadores em levitação. O amortecimento elétrico diminuiu com o aumento do número de ímanes no conjunto em levitação. Diminuir a proporção entre o tamanho do conjunto em levitação e o tamanho dos ímanes fixos teria um impacto positivo na dinâmica do gerador. Foi experimentalmente analisada a tensão elétrica em função da frequência e resistência de carga. Os dados experimentais e simulados mostraram uma boa concordância, com erros inferiores a 7% com exceção da frequência de ressonância, onde experimentalmente o pico de tensão elétrica não foi retirado. O uso de espaçadores demonstrou ganhos significativos relativamente às outras configurações similares de geradores, especialmente a baixas frequências de excitação.

Zhang *et al.* [55] projetaram uma nova estrutura de gerador para trabalhar a frequências menores que 10 Hz, pois é nesta gama de frequências que muitas aplicações reais exibem vibrações, como a marcha humana, vibração das pontes e ondas nos oceanos. O gerador foi composto por uma estrutura retangular plástica cortada a laser para reduzir o atrito, um íman fixo na parte inferior e um conjunto de dezasseis enrolamentos planares dispostos em forma de matriz de modo a ficarem de frente para um conjunto de ímanes também eles dispostos em forma de matriz. Relativamente à parte móvel, existe uma estrutura constituída por um íman na parte inferior, localizado no meio de duas folhas de grafite, que se opõem a campos magnéticos que por ventura possam ocorrer no exterior. Acolado a esse íman na parte inferior da estrutura em levitação existe um espaçador retangular que vai unir ao conjunto de ímanes dispostos em forma de matriz (Fig. 2.16). A frequência de ressonância pode ser diminuída aumentando a intensidade dos campos magnéticos dos ímanes em levitação ou diminuindo a massa da estrutura em levitação [55]. Contudo, a redução de massa da estrutura em levitação reduz a potência elétrica, pois existe uma relação linear entre a massa da estrutura em levitação e a aceleração segundo o modelo computacional utilizado. O conjunto de ímanes dispostos em forma de matriz tem uma orientação alternada norte-sul. Quando um dos enrolamentos planares está perto da fronteira entre os ímanes dispostos em forma de matriz consegue fornecer um campo magnético que muda muito rapidamente, produzindo uma maior potência elétrica. Foi simulada a tensão elétrica RMS em função da frequência para diferentes acelerações. Os resultados mostraram que uma alta eficiência de conversão de energia é mantida

para vibrações a baixas frequências e grandes amplitudes.

Um gerador de 180 g projetado para uma frequência de ressonância de 4 Hz foi colocado numa mochila para geração de energia a partir da marcha imposta pelo ser humano. Foi observada a produção de uma potência elétrica de 32 mW a partir de movimento à velocidade de 3,58 m/s.

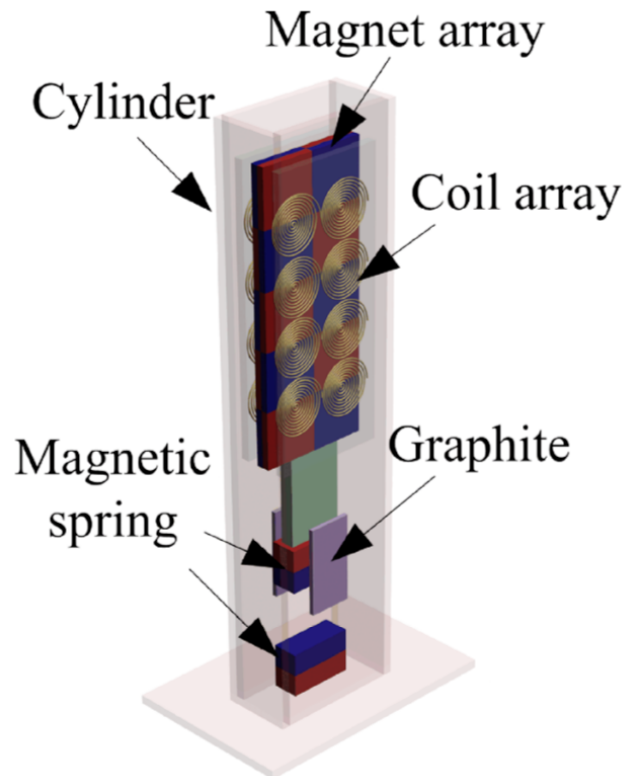


Figura 2.16: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Zhang *et al.* [55].

Saravia *et al.* [6] e Geisler *et al.* [39] apresentaram modelos similares usando múltiplos enrolamentos¹, múltiplos ímãs e múltiplos espaçadores numa estrutura cilíndrica. Ambos usaram modelos FEM para obter melhores aproximações do campo magnético e da intensidade do campo magnético.

Saravia *et al.* [6] apresentaram uma estrutura cilíndrica com quatro ímãs em levitação (Fig. 2.17). O modelo computacional apresentado permitiu simulações com diferentes geometrias de ímãs, com os pólos dispostos em qualquer posição e com um número ilimitado de enrolamentos [6].

¹A configuração com múltiplos enrolamentos requer uma ligação fora de fase dos enrolamentos, caso contrário, o grupo de enrolamentos iria comportar-se como um único enrolamento e, portanto, o termo múltiplos enrolamentos seria incorreto [6].

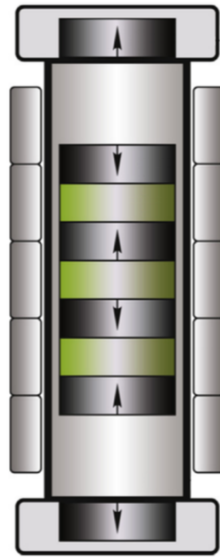


Figura 2.17: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Savaria *et al.* [6].

Foi usado um modelo FEM para obter a força magnética de repulsão entre os ímanes em função do deslocamento do gerador. Em seguida, os autores utilizaram uma técnica de identificação de funções para extrair a função analítica da força-deslocamento. Em vez do polinômio de terceira ordem usualmente utilizado [7, 46, 49, 50, 54, 57] foi feita uma aproximação a um polinômio de quinta ordem. Utilizando esse polinômio foi possível fazer previsões mais exatas da força magnética de repulsão para deslocamentos muito pequenos. Foi observado que os espaçadores ferromagnéticos influenciam bastante a dinâmica do sistema e têm um impacto positivo no campo magnético maior do que colocando outro íman.

Os autores tiveram em conta dois tipos de amortecimento diferentes conforme a excitação exterior do sistema ocorresse a baixas ou altas frequências, amortecimento por atrito e amortecimento viscoso, respectivamente. A tensão elétrica em função do tempo obtida tanto experimentalmente como por modelo computacional foi utilizada para ajuste do coeficiente de amortecimento mecânico. Com uma carga de 100Ω foram feitas comparações entre a potência elétrica média, potência elétrica de pico e tensão elétrica de pico entre os dados simulados e experimentais, comparação esta que mostrou uma correlação excelente entre eles.

Geisler *et al.* [39] introduziu um gerador do tamanho de uma bateria AA com múltiplos enrolamentos que converte o movimento de baixa frequência do corpo humano em energia para alimentar sensores sem fios que medem grandezas fisiológicas (Fig. 2.18). A estrutura foi composta de forma semelhante à de Wang *et al.* [7] possuindo dois ímanes fixos em ambas as extremidades e um conjunto de três ímanes em levitação. No entanto, neste caso os ímanes em levitação são separados por discos ferromagnéticos para expandir as linhas de campo magnético. Geisler

et al. [39] utilizou um número maior de enrolamentos para aumentar a potência elétrica produzida pelo gerador. A estrutura foi feita em poliamida sintetizada. Os autores compararam os seus resultados com outros autores usando a DP como um dos parâmetros de comparação [39]. Os seus resultados mostraram uma maior densidade de potência relativamente aos outros estudos comparados, conseguindo ganhos superiores a aproximadamente 600% quando o gerador é agitado com a mão.

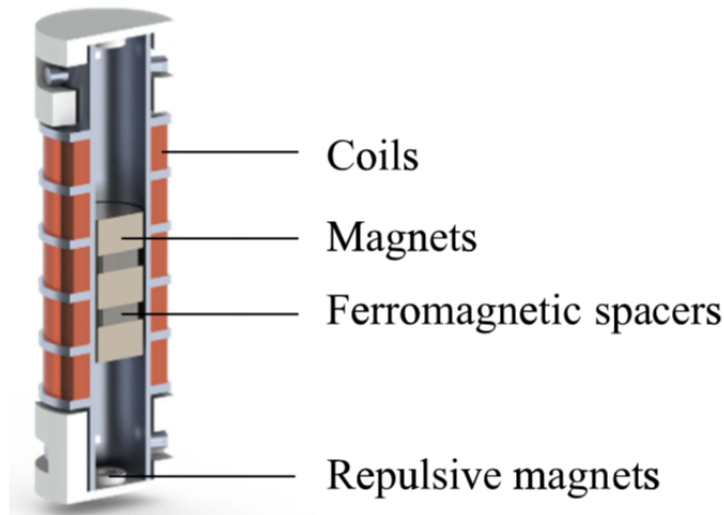


Figura 2.18: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Geisler *et al.* [39].

Foram realizados modelos FEM utilizando o COMSOL para diferentes raios de enrolamento para detetar as alterações de fluxo magnético axial. Posteriormente, os ensaios experimentais mostraram uma boa concordância com os resultados teóricos.

Foram feitas diversas comparações experimentais colocando o gerador em diferentes locais do corpo humano – (parte superior do braço, perna (região tibial), quadril, peito), medindo a potência elétrica RMS como função da velocidade do participante a correr, mostraram que o protótipo obtém melhores resultados na parte superior do braço.

Struwig *et al.* [56] propuseram e desenvolveram um modelo computacional de gerador que permite a otimização de parâmetros para maximizar o desempenho do gerador. Os parâmetros da configuração que podem ser alterados são: o número de enrolamentos, a altura do enrolamento, o espaçamento entre enrolamentos, o número de ímanes, o espaçamento entre ímanes e o tamanho físico da estrutura. A modelação e protótipos desenvolvidos tiveram como objetivo otimizar o gerador para o movimento de caminhar tanto de um ser humano, como de um animal.

Foram construídas quatro estruturas, cada uma delas constituídas por uma estrutura tubular impressa em PLA numa impressora 3D com uma diferença entre

o raio do íman em levitação e a estrutura tubular de 0,5 mm. O conjunto de ímanes em levitação consiste em vários ímanes permanentes separados por espaçadores num material ferromagnético. Na extremidade inferior existe um íman fixo.

Inicialmente foi criado um modelo computacional de um gerador com um único íman em levitação e um enrolamento. O objetivo do modelo foi analisar a tensão elétrica induzida RMS para diferentes alturas do enrolamento. Os resultados mostraram que a tensão elétrica induzida RMS em circuito aberto aumenta rapidamente com o aumento da altura do enrolamento até um determinado valor. A partir desse valor a altura do enrolamento já não influencia significativamente a tensão elétrica induzida. Posteriormente, os autores criaram modelos computacionais incluindo vários enrolamentos e vários ímanes.

Foram simuladas sete configurações de forma a obter os melhores parâmetros para o design do gerador. A melhor configuração proveniente dos modelos computacionais foi obtida com dois ímanes, um espaçador e dois enrolamentos cada um deles com uma altura de 9,72 mm.

Foram construídos quatro protótipos com diferentes configurações, incluindo diferentes comprimentos da estrutura e enrolamentos, com base nas sete simulações computacionais. As configurações foram: (i) um íman em levitação e um enrolamento; (ii) dois ímanes e um espaçador em levitação e, um enrolamento; (iii) três ímanes e dois espaçadores em levitação e, um enrolamento; (iv) dois ímanes e um espaçador em levitação e, dois enrolamentos. Os ensaios experimentais realizados nos quatro geradores mostraram uma boa correlação com os modelos computacionais desenvolvidos. A configuração com pior desempenho foi a de um íman em levitação e um enrolamento. Os autores concluíram que o aumento do número de enrolamentos e de ímanes em levitação influencia positivamente o desempenho do gerador.

Fan *et al.* [57] apresentaram uma nova configuração para resolver o problema do fraco desempenho dos geradores para excitações a baixas frequências. Esta nova configuração foi composta por um gerador com dois graus de liberdade (2-DOF). Os geradores de um 1-DOF neste momento ainda não são capazes de extrair energia de forma eficiente a partir de excitações com baixas frequências ($f < 10$ Hz). Os autores construíram dois geradores com 1-DOF e 2-DOF. A estrutura do gerador com 2-DOF é composta por um gerador com 1-DOF dentro de outro gerador com 1-DOF (Fig. 2.19). O gerador exterior consegue explorar o movimento relativo dos ímanes fixos nas extremidades do gerador com 1-DOF interior utilizando dois enrolamentos perto de cada uma das suas extremidades. Os enrolamentos foram ligados em série. Ambos os geradores (2-DOF e 1-DOF) foram construídos com resina.

Foram utilizados modelos FEM para validar o modelo analítico das forças magnéticas, tendo sido obtida uma boa correlação entre os resultados teóricos e experimentais. Estudos experimentais foram realizados com os protótipos de 1-DOF e 2-DOF. Numa primeira fase foram realizados ensaios com os dois protótipos utilizando um excitador mecânico externo (*shaker*), tendo depois sido comparados os

valores experimentais e simulados em circuito aberto, da tensão e da potência elétricas, em função da frequência. Os autores concluíram a partir dos resultados que a configuração com 2-DOF permite ao enrolamento do gerador interno produzir uma tensão elétrica de pico superior à produzida sob a configuração com 1-DOF; além da ressonância principal ($f = 7,8$ Hz), outra ressonância auxiliar é produzida no gerador de 2-DOF; a amplitude da tensão elétrica produzida pelo gerador interno em conjunto com os enrolamentos do gerador exterior, tornam o gerador de 2-DOF superior ao de 1-DOF a nível de desempenho. Além disso, o gerador de 2-DOF consegue mais 152% de largura de banda relativamente ao gerador de 1-DOF. Os autores analisaram a influência do acoplamento magnético nos dois protótipos para diferentes comprimentos utilizando os modelos computacionais. Para o gerador com 1-DOF o aumento do comprimento enfraquece a interação repulsiva, levando a que a frequência de ressonância se desloque para frequências muito menores, no entanto a amplitude da potência elétrica é mantida aproximadamente constante. No gerador de 2-DOF as frequências de ressonância deslocam-se muito ligeiramente para a esquerda (baixas frequências) mas a amplitude da potência elétrica tem aumentos significativos para determinados comprimentos.

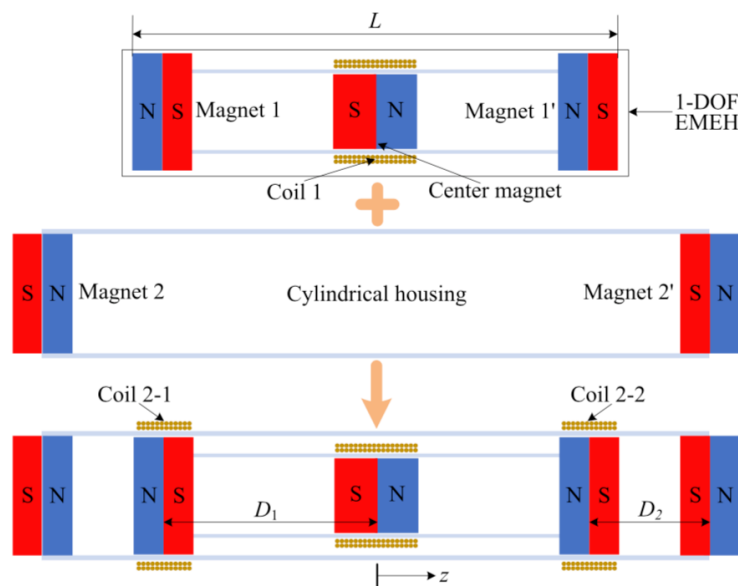


Figura 2.19: Esquemático representativo do gerador eletromagnético proposto por Fan *et al.* [57].

Numa segunda parte foram realizados ensaios experimentais com o movimento de um ser humano durante a marcha e a corrida, com o gerador na mão ou acoplado numa mochila. Foi medida a aceleração e a tensão elétrica em cada conjunto de enrolamentos em função do tempo. Foi observada uma potência elétrica máxima de 1,22 mW durante a corrida a 9 km/h. Para testar a sua funcionalidade foi ainda alimentado um higrótermógrafo com um consumo de aproximadamente 0,1 mW.

Este estudo apresentou um gerador de 2-DOF que aparece como uma solução para produzir energia em baixas frequências, tendo como vantagem em relação aos geradores de 1-DOF o facto de obter uma potência elétrica mais elevada assim como, uma largura de banda de operação maior e um ajuste conveniente da banda de frequências de operação sem aumentar excessivamente a sua complexidade estrutural.

2.1.5 Metodologias de modelação dos mecanismos de transdução

O comportamento dinâmico geral dos sistemas aqui analisados, incluiu sempre a dinâmica mecânica e elétrica, tendo sido sempre modelada por equações diferenciais ordinárias dependentes do tempo. Foram distinguidas quatro abordagens de modelação para modelar cada fenómeno físico: (i) empírico, que é baseado em equações paramétricas que se ajustam aos dados experimentais; (ii) analítico, focado nas leis da física, compreendendo os parâmetros com significado físico, para explicar os mecanismos físicos com base em observações experimentais; (iii) semi-analítico, estabelecido como um conjunto de aproximações analíticas para descrever os mesmos fenómenos físicos; (iv) e método dos elementos finitos (FEM), uma técnica numérica usada para realizar uma análise de elementos finitos (FEA) para qualquer fenómeno físico. A validação experimental do campo magnético foi realizada apenas em quatro estudos; a força magnética de repulsão e a tensão elétrica induzida foram validadas em dez e seis estudos, respetivamente (Tab. 2.1). Relativamente ao coeficiente de acoplamento eletromecânico apenas dois dos estudos validaram computacional e experimentalmente obtendo uma boa correlação, Constantinou *et al.* [42] e Kecik *et al.* [46]. A corrente elétrica, coeficiente de amortecimento e forças não foram validados em nenhum dos artigos presentes.

O campo magnético (B) do íman em levitação foi modelado principalmente por métodos de elementos finitos, semi-analíticos e analíticos. O uso de software de elementos finitos é, no geral, uma ótima ferramenta para se obterem boas aproximações aos dados experimentais em períodos de tempo inferiores aos necessários para se desenvolverem modelos analíticos ou semi-analíticos. Porém, esse tipo de metodologia não é o mais adequado para resolver problemas relativos à otimização. A variação do campo magnético é necessária para acionar o mecanismo de transdução mecânico-elétrica, portanto é fundamental que este seja corretamente modelado. Da análise foram retirados três métodos para modelar esse fenómeno: (i) o campo magnético é constante ao longo do espaço tri-dimensional fechado pelo gerador; (ii) definir o campo magnético como uma única variável em função da distância axial ao centro do conjunto em levitação; (iii) o campo magnético é descrito como uma função que depende de duas variáveis, da distância radial e axial ao centro do conjunto em levitação.

A força magnética total é dada pela soma das forças magnéticas repulsivas que mantém a massa magnética inercial em levitação. A força magnética e, portanto, a frequência de ressonância do sistema, podem ser alteradas/ajustadas alterando

a massa inercial, o curso percorrido pelo conjunto em levitação, a graduação dos ímanes (N42, N45, etc...) ou fixando ímanes só numa das extremidades da estrutura. Alguns dos autores utilizaram polinômios de diversos graus para modelar as forças de repulsão magnética em função da distância entre os ímanes em levitação e os ímanes nas extremidades. Este fenómeno foi analiticamente analisado ou combinado com outros métodos: (i) empírico-analítico, ajustando os dados aos valores medidos experimentalmente; (ii) FEM-analítico, ajustando os valores aos dados simulados; (iii) semi-analítico-analítico, usando a Lei das forças de *Ampère*.

A energia mecânica é convertida em energia elétrica quando o campo magnético muda através do enrolamento, induzindo uma força eletromotriz. A força eletromotriz induzida foi descrita principalmente pela lei de indução de *Faraday* ou em função do coeficiente de acoplamento eletromecânico e velocidade do íman(es) em levitação (Tab. 2.1).

A corrente elétrica induzida no enrolamento foi normalmente deduzida pela Lei de *Ohm*. Os únicos autores que formularam uma solução analítica foram Mann e Sims [50] que tiveram em conta a dinâmica do sistema não linear sob uma excitação harmónica.

O coeficiente de acoplamento eletromecânico é representado como a taxa de transdução eletromecânica. Relaciona as energias mecânicas e elétricas de entrada e saída. Este parâmetro foi geralmente considerado constante, como resultado de uma análise simplificada que considera o campo magnético constante ao longo do espaço tridimensional fechado pelo gerador. *Kecik et al.* [46] propôs um método que colocando o íman em levitação em movimento a uma determinada velocidade e com recurso à medição da corrente elétrica permite construir e obter um conjunto de valores que são posteriormente traduzidos numa função polinomial ímpar de treze graus. Este coeficiente também foi considerado não linear por outros autores que o calcularam como a soma do coeficiente de acoplamento eletromecânico de cada volta do enrolamento.

O coeficiente de amortecimento e as forças foram modelados frequentemente com recurso a métodos analíticos e métodos analítico-empíricos (Tab. 2.1). O amortecimento elétrico foi desprezado em vários estudos pelo facto de os ensaios serem realizados em circuito aberto, sendo tido apenas em conta o amortecimento mecânico. O amortecimento mecânico está normalmente relacionado com o atrito que o íman em levitação tem em contacto com a estrutura, mas outras fontes de amortecimento também costumam estar envolvidas, como o amortecimento de compressão do ar. De modo a evitar que a compressão do ar tivesse um efeito negativo na dinâmica do íman em levitação normalmente, foram projetados pequenos orifícios nas extremidades do gerador para que desta forma quando o íman em levitação se movesse o ar que se encontrava dentro da estrutura possa ser expelido para o exterior.

Para obter uma análise mais resumida sobre todos os resultados alcançados, assim como as excitações e cargas aplicadas ao sistema, foi construída a Tab. 2.2. A maioria dos autores utilizou amplitudes de excitação bem delineadas (com exceção das excitações personalizadas) que iam desde 0,039g até aos 8g, relativamente às

frequências utilizadas estas mantiveram-se entre os 0,75 e 46 Hz. Grande parte dos estudos foi realizado com resistências que garantem a máxima transferência de potência, igualando a resistência de carga à resistência interna do sistema. Os valores de resistência de carga encontrados nesta revisão foram entre 4Ω e $1 \text{ M}\Omega$. A utilização de resistências de carga mais elevadas serviu para alguns autores desprezarem a influência do amortecimento elétrico nos seus estudos. As quatro últimas colunas da tabela referem-se às saídas do sistema para os diferentes geradores. A potência máxima instantânea atingida foi 1,9 W por Masoumi e Wang [49], no entanto, mais de metade dos estudos nunca excedeu acima dos 8 mW. Por forma a obter melhores comparações e conseguir prever o comportamento destes geradores se forem construídos nas mais diversas escalas, foi utilizado o valor da densidade de potência, relacionando assim o volume do gerador com a potência gerada. Novamente o maior destaque vai para o gerador criado por Masoumi e Wang [49] que apresenta uma densidade de potência de $8015 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ (aproximadamente $8 \text{ kW}/\text{m}^3$). Apesar de mostrarem resultados diversificados, a maioria dos restantes geradores obteve valores que não excedem os $110 \mu\text{W}/\text{cm}^3$. Relativamente à tensão elétrica, o valor máximo encontrado foi 43,4 V (Masoumi e Wang [49]), no entanto, em média nenhum dos autores atingiu valores superiores a 7 V. A corrente elétrica máxima de 150 mA foi alcançada por Constantinou *et al.* [42], mas geralmente os valores não ultrapassam os 10 mA.

Tabela 2.1: Análise global das modelações utilizadas^(a)

	Referências	Campo magnético	Força magnética repulsiva	Tensão induzida	Corrente elétrica	Coefficiente acoplamento	Coefficiente amort./força	Validação geral dos modelos	Validação do modelo relacionada com cada fenômeno
Categoria 1	Constantinou <i>et al.</i> [41]	ND	SA/A	A	A	SA	ND	Elétrica: ND; mecânica: frequências ressonantes com um erro médio de 1,6% para 3 distâncias diferentes entre os ímanes fixos.	CM: ND; FMR: ND; V: boa aproximação (OC); I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Constantinou <i>et al.</i> [42]	SA	SA/A/E	A	A	SA	A/E	Elétrica: potência (2.1g, 37 Hz, ΔR_I) apresenta ligeiras diferenças; mecânica: ND.	CM: ND; FMR: boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: boa aproximação; ND; CF: ND.
	Foissal <i>et al.</i> [43]	A	A	A	ND	A	A	ND	ND
	Berdy <i>et al.</i> [44]	A	A	A	A	SA	A/E	Elétrica: a potência manifesta-se muito boa e tem uma boa concordância (0.1g/0.075g, ΔR_I); mecânica: a frequência de ressonância (0.05g) apresenta um erro de $\approx 3\%$.	CM: ND; FMR: ND; V: o teste de "ringdown" apresenta uma correlação precisa (OC); I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Liu <i>et al.</i> [45]	A	A	A	A	A	A/E	ND	CM: ND; FMR: ND; V: erros entre 3.7% e 20% (0.5g-0.65g, 4.2-4.8 Hz); I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Berdy <i>et al.</i> [38]	A	A	A	A	SA	A/E	Elétrica: a potência foi prevista com uma média a rondar os 14% dos dados de saída medidos; mecânica: a frequência de ressonância apresenta erros de 4.48%, 4.54% e 5.17% quando montado verticalmente, e com um ângulo de 15° e 30°, respectivamente.	CM: ND; FMR: ND; V: testes de "ringdown" (OC) para os 3 dispositivos montados em diferentes configurações, bem como sob excitações personalizada ($R_I=1000 \Omega$, Δf) exibem uma ótima concordância; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Soares dos Santos <i>et al.</i> [16]	SA	SA	SA	A	NA	A/SA	Elétrica: erro absoluto médio percentual de 6.02% e correlações cruzadas de 86%; mecânica: ND.	ND
Kecik <i>et al.</i> [46]	ND	E/A	A	A	E/A	E	ND	CM: ND; FMR: boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: muito boa aproximação; CF: ND.	
Categoria 2	Saha <i>et al.</i> [47]	FEM	FEM/A	A	ND	ND	A/E	Elétrica: ND; mecânica: a frequência de ressonância (OC, 0.039g) apresenta um erro de 5%.	CM: ND; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Dallago <i>et al.</i> [48]	FEM	FEM/A	A	A	A	A/E	Elétrica: a tensão induzida (1g, 9/10.4 Hz, ΔR_I) apresenta um erro máximo: sem força de Lorentz (20/80%) e considerando a força de Lorentz (7/6%), respectivamente; mecânica: ND.	CM: ND; FMR: boa aproximação; V: a tensão de pico tem um erro médio de 10.4% (1g, 7-12 Hz); I: ND; CA: ND; CF: ND.

Continuação

	Referências	Campo magnético	Força magnética repulsiva	Tensão induzida	Corrente elétrica	Coefficiente acoplamento	Coefficiente amort.força	Validação geral dos modelos	Validação do modelo relacionada com cada fenômeno
Categoria 2	Munaz <i>et al.</i> [24]	SA/FEM	ND	A	ND	NA	ND	ND	CM: ND; FMR: ND; V: tensão RMS OC (0.5g, 6 Hz) erro de 5.7%; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Masoumi, Wang [49]	FEM	E/A	A	ND	A	A/E	ND	CM: ND; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Wang <i>et al.</i> [7]	FEM	E/A	A	A	ND	A/E	Elétrica: a resposta em tensão para incrementos na frequência indica erros relativos máximos menores que 15% enquanto que a resposta a decrementos na frequência mostra ligeiras diferenças, sem comparação com a simulação; mecânica: ND.	CM: ND; FMR: boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
Categoria 3	Mann, Sims [50]	ND	E/A	A	A	A	A/E	Elétrica: ND; mecânica: quando a excitação era suficiente para causar histerese, as velocidades mais altas do íman central não eram alcançáveis (os dados experimentais restantes correspondiam à solução analítica).	CM: ND; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Bonisoli <i>et al.</i> [51]	ND	ND	A	A	A	A	Elétrica: a potência e a tensão induzida conseguiram boas aproximações; mecânica: ND.	ND
	Morais <i>et al.</i> [52]	E	A	A	ND	A	A/E	Elétrica: a potência e a tensão induzida (0.09g-0.55g, 0.75-1.85 Hz, ΔR_l) exibem ligeiras diferenças; mecânica: ND.	ND
	Yang <i>et al.</i> [53]	FEM	A	SA	ND	NA	ND	ND	ND
Categoria 4	Apo, Priya [54]	FEM	A	A	A	A	A/E	ND	ND
	Zhang, Wang, Kim [55]	SA/FEM	A	A	ND	NA	A	ND	ND
	Saravia <i>et al.</i> [6]	FEM	E/A	A	A	A	A/E	Elétrica: a potência e a tensão induzida (1g, $R_l=100 \Omega$, Δf) foram bem aproximadas; mecânica: ND.	CM: ND; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Geisler <i>et al.</i> [39]	FEM	SA	A	A	NA	A	Elétrica: a potência (1g, $R_l=950 \Omega$, Δf) foi bem aproximada; mecânica: ND.	CM: boa aproximação; FMR: ND; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Struwig <i>et al.</i> [56]	ND	A/FEM	A/FEM	A	NA	E	ND	CM: ND; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.
	Fan <i>et al.</i> [57]	FEM	A/FEM	A	ND	ND	A	Elétrica: a potência e a tensão induzida (0.5g, 5-25 Hz, $R_l=42 \Omega$) obtiveram uma concordância razoável; mecânica: ND.	CM: boa aproximação; FMR: muito boa aproximação; V: ND; I: ND; CA: ND; CF: ND.

(a) Terminologia: NA - não aplicável; ND - não definido; NV - não validado; A - analítico; SA - semi-analítico; E - empírico; FEM - método de elementos finitos; Δvar - variável variada num intervalo específico; OC - circuito aberto; CM - campo magnético; FMR - força magnética repulsiva; V - tensão induzida; I - corrente elétrica; CA - coeficiente de acoplamento; CF - coeficiente de amortecimento e forças;

Tabela 2.2: Desempenho dos geradores^(b)

	Referências	\ddot{z} [m/s ²]	R_l [Ω]	P [mW]	P_ρ [μW/cm ³]	U [V]	I [mA]
Categoria 1	Constantinou <i>et al.</i> [41]	$4, 3g \sin(2\pi 46t)$	9	180 (RMS)	4500	1,3 (RMS)	140 (RMS)
	Constantinou <i>et al.</i> [42]	$2g \sin(2\pi 37t)$	≈4	90 (AVR)	600	0,6 (AVR)	150 (AVR)
	Foissal <i>et al.</i> [43]	$0, 5g \sin(2\pi ft)$ $7 < f < 10$	ND	2,37 (MAX) 2,09 (MAX)	21,92	ND	ND
	Berdy <i>et al.</i> [44]	$0, 1g \sin(2\pi 6, 7t)$	1×10^3	0,41 (MAX)	53,2	0,6 (MAX)	0,6 (MAX)
	Liu <i>et al.</i> [45]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,45g < A < 0,6g$ $4,4 < f < 4,8$	10	0,015-0,28 (RMS)	3, 5-45, 3	0, 012-0,053 (RMS)	1, 2-5, 3 (RMS)
		pers. $f=4,5; A=0,01m$	$6 < 93$	≈0, 1-0, 31 (RMS)	≈15,9-49,4	≈0, 035-0,094 (RMS)	≈1-5, 6 (RMS)
	Berdy <i>et al.</i> [38]	$0, 075g \sin(2\pi 6, 7t)$	ND	0,33 (MAX)	42,9	ND	ND
		pers. $4,8-9,7 \text{ km/h}$	1×10^3	0, 071-0, 34 (RMS)	9,2-44,4	0,3-0,6 (RMS)	0,3-0,6 (RMS)
	Soares dos Santos <i>et al.</i> [16]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,84g < A < 1,96g$ $3,5 < f < 9$	$3,5 \times 10^3$	≈0, 8-10, 3 (MAX)	≈66, 7-858, 3	≈1, 7-6 (MAX)	≈0, 5-1, 7 (MAX)
		$A \sin(2\pi ft)$ $0,84g < A < 1,8g$ $3,5 < f < 8$	$8,9 \times 10^4$	≈0, 1-1, 1 (MAX)	≈11, 7-93, 3	≈3, 5-10 (MAX)	≈0, 039-0, 1 (MAX)
Kecik <i>et al.</i> [46]	$A \sin(2\pi ft)$ $A < 10,2g$ $f < 15,9$	ND	ND	ND	ND	≈0-38 (MAX)	
Categoria 2	Saha <i>et al.</i> [47]	$0, 039g \sin(2\pi 7, 6t)$	7300	0,015 (MAX)	1,18	0,3 (MAX)	0,045 (MAX)
	Dallago <i>et al.</i> [48]	pers. $2 < f < 2,75$ $0, 5g < A < 1g$	800	0, 3-2, 46 (AVR)	74,8-193,7	0,9-1,4 (AVR)	1-1, 8 (AVR)
		$1g \sin(2\pi ft)$ $f=9/10,4$	1×10^4	≈0, 48-24	≈36, 9-1846	≈0, 25-3, 2	≈0, 2-25
	Munaz <i>et al.</i> [24]	$0, 5g \cos(2\pi 6t)$	1×10^3	4,84 (RMS)	535	2,2 (RMS)	2,2 (RMS)
	Masoumi, Wang [49]	$3, 4g \sin(2\pi ft)$ $6 < f < 12$	1×10^3	190-1,8 × 10 ³ (MAX)	≈808, 5-7831	13,8-42,9 (MAX)	13,8-42,9 (MAX)
		$A \sin(2\pi 9t)$ $1,22g < A < 3,41g$	1×10^3	3, 8-1,9 × 10 ³ (MAX)	≈16, 2-8015	1,9-43,4 (MAX)	1,9-43,4 (MAX)
	Wang <i>et al.</i> [7]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,35g < A < 0,85g$ $4 < f < 10$	1×10^4	0-0,081 (MAX)	≈0-1,1	0-0,9 (MAX)	0-0,09 (MAX)
pers. $5-9 \text{ km/h}$		5	0,4-6 (AVR)	≈5, 6-60	0,2-0,7 (MAX)	8,9-34,6 (AVR)	
Categoria 3	Mann, Sims [50]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,21g < A < 0,95g$ $6 < f < 13$	1×10^6	≈1,6 × 10 ⁻⁴ -0,13 (MAX)	ND	≈0, 4-11, 6 (MAX)	≈4 × 10 ⁻⁴ -1,2 × 10 ⁻² (MAX)
	Bonisolì <i>et al.</i> [51]	pers. $40-100 \text{ km/h}$	ND	2-11 (AVR)	ND	2-8 (MAX)	ND
	Morais <i>et al.</i> [52]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,09g < A < 0,55g$ $0,75 < f < 1,85$	5×10^3	≈0, 3-6, 5 (RMS)	≈79, 8-1710	≈1, 2-5, 6 (RMS)	≈0, 2-1, 1 (RMS)
	Yang <i>et al.</i> [53]	$8g \sin(2\pi 20t)$	ND	28,3 (MAX)	ND	2,67 (MAX)	10,59 (MAX)
Categoria 4	Apo, Priya [54]	$A \sin(2\pi ft)$ $0,25g < A < 1g$ $13 < f < 16$	$3,8 \times 10^3$	5,9-12,9 (RMS)	958-2080	4,7-7 (RMS)	1,2-1,8 (RMS)
	Zhang, Wang, Kim [55]	$A \sin(2\pi 4t)$ $0,03g < A < 0,11g$	96	0,04-1,23 (RMS)	0,3-10,3	0,1-0,7 (RMS)	0,6-3,5 (RMS)
		pers. $1,6-12,9 \text{ km/h}$	96	≈0-32	≈0-266,7	≈0-1,8	≈0-18,3
	Saravia <i>et al.</i> [6]	$1g \sin(2\pi ft)$ $4 < f < 10$	100	≈5-85 (MAX)	≈67, 6-1148	≈0, 8-2, 9 (MAX)	≈7, 1-29, 2 (MAX)
	Geisler <i>et al.</i> [39]	$1g \sin(2\pi 9, 5t)$	950	≈2, 25 (MAX)	≈250	≈1, 5 (MAX)	≈1, 5 (MAX)
		pers. $6,4/8 \text{ km/h}$	950	3,9-5 (AVR)	438-550	1,9-2,2 (AVR)	2-2,3 (AVR)
	Struwig <i>et al.</i> [56]	pers. $f=6; A=2g$	950	6, 6 (AVR)	730	2,5 (AVR)	2,6 (AVR)
		pers. $A=2,2g$	40	3 (AVR)	179,4	0,35 (AVR)	8,7 (AVR)
	Fan <i>et al.</i> [57]	$0, 5g \sin(2\pi ft)$ $5 < f < 25$	42	3,06 (RMS)	1,55	≈0,735 (MAX)	ND
		pers. $4-9 \text{ km/h}$	42	2,58 (RMS)	1,31	≈0,635 (MAX)	ND

^(b) Terminologia: ND - não definido; pers. - personalizado; AVR - médio; MAX - máximo; RMS - raiz do valor quadrático ou valor eficaz.

Capítulo 3

Métodos

3.1 Projeto mecânico do gerador instrumentado adaptativo

O conceito que se pretende demonstrar com este projeto torna necessário o desenvolvimento e construção de um gerador instrumentado com capacidade de adaptar o seu curso (alteração da distância entre os ímanes nas extremidades da estrutura) de acordo com as variações na fonte exterior de energia mecânica. Para este efeito foi incluído um atuador e uma estrutura mecânica associada que permite o deslocamento de um desses ímanes (Fig. 3.1). Desta forma pretende-se demonstrar, tanto experimentalmente, como em simulação, que a alteração da distância entre ímanes nas extremidades vai melhorar o desempenho destes geradores mesmo com variações da excitação mecânica exterior. Apesar de ser acrescentado um atuador (consumidor de energia), o conceito poderá ser investigado para que a energia produzida devido à alteração no curso do gerador seja maior que a despendida para deslocar o íman na extremidade. O objetivo principal desta secção foi documentar a construção de um protótipo de gerador adaptativo e o aparato experimental que foi usado para testes experimentais. Um modelo computacional foi utilizado para simular o desempenho do gerador e, assim, identificar o curso do gerador que otimiza o seu desempenho para variações da excitação. Todos os desenhos técnicos referentes ao projeto podem ser observados no apêndice A.

3.1.1 Projeto mecânico

O gerador foi dividido em três estruturas principais: parte inferior, parte central e parte superior. A parte inferior foi composta pelo suporte para o íman inferior (colado com Araldite) e pelo suporte para a estrutura exterior que vai excitar o sistema (Fig. 3.2).

A parte central foi a região onde o íman se deslocou, o que requereu uma superfície interior com pouco atrito. O atrito foi um dos motivos pelo qual foi escolhido como material o PTFE, e não o Nylon, pois este último tem um maior

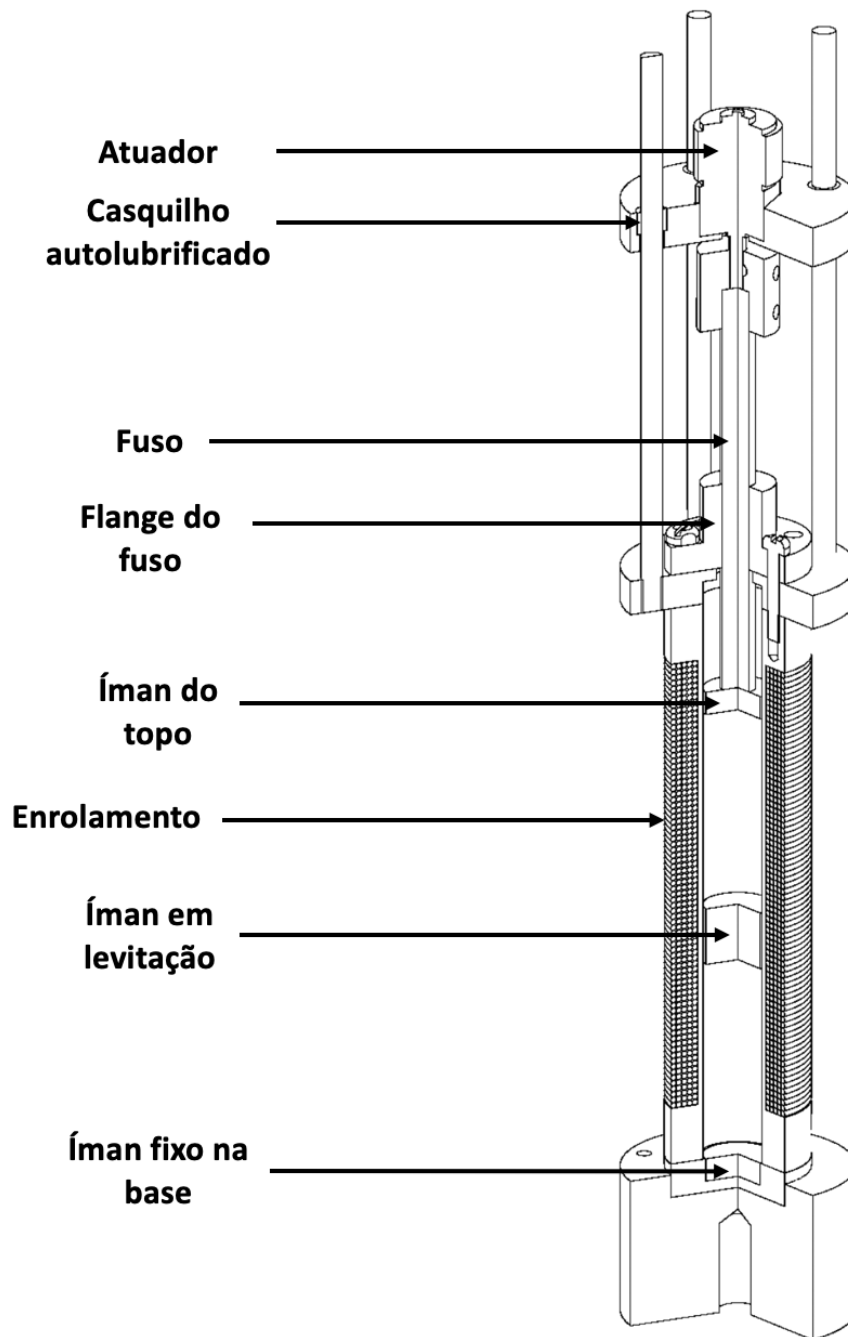


Figura 3.1: Protótipo de gerador eletromagnético adaptativo (vista trimétrica em corte).

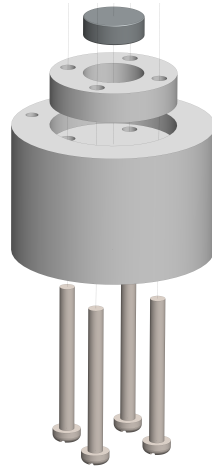


Figura 3.2: Vista explodida da parte inferior do gerador eletromagnético adaptativo.

coeficiente de atrito. Na superfície exterior da estrutura, na parte central, foi colocado um enrolamento de cobre com cerca de 80 mm de altura (Fig. 3.3), que permitiu ao gerador produzir uma tensão elétrica a partir da alteração do campo magnético. A espessura que separou mecanicamente o enrolamento do interior do gerador foi de especial importância pois tem um forte impacto na geração de energia. A espessura deve ser a menor possível para se maximizar a energia elétrica. Neste caso e por causa de restrições, tanto de maquinação, como das propriedades do material, manteve-se uma espessura de 1 mm.

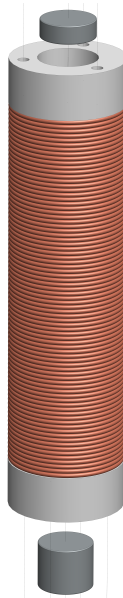


Figura 3.3: Vista explodida da parte central do gerador eletromagnético adaptativo.

Na parte superior do gerador, existe uma peça que une a parte superior à parte central. Esta peça serviu igualmente de suporte aos quatro varões que guiaram o suporte do atuador, assim como realizou o acoplamento da fêmea do fuso. Estes varões têm 4 mm de diâmetro, são de aço inox austenítico 304 devido à sua baixa permeabilidade magnética e conseguiram fornecer a rigidez pretendida num diâmetro muito pequeno. A rigidez mecânica do PTFE para o diâmetro de varão pretendido não iria conseguir impedir a sua deformação, impossibilitando assim o seu uso. O fuso foi acoplado ao atuador por meio de um acoplamento mecânico projetado especificamente para as dimensões do fuso ($\varnothing 6$ mm) e do veio do atuador ($\varnothing 3$ mm). Este acoplamento foi fabricado em Nylon devido à sua rigidez. Na peça que atravança o atuador foram colocados quatro casquilhos auto-lubrificados em *iglidur G*¹ para proporcionar um menor atrito entre o suporte do motor e os varões.

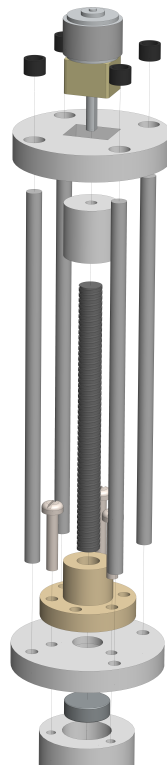


Figura 3.4: Vista explodida da parte superior do gerador eletromagnético adaptativo.

Todas as peças referentes à estrutura do gerador foram fabricadas em PTFE, exceto as peças descritas acima. O uso de materiais com uma baixa permeabilidade magnética foi de extrema importância no projeto, pois a estrutura não deve interferir nos campos magnéticos dos ímanes e enrolamento.

¹Iglidur é um material originário da empresa *Igus* em Colónia (Alemanha). Este polímero é extremamente resistente ao desgaste e foi melhorado por aditivos, entre os quais lubrificantes sólidos [58].

3.1.2 Arquitetura do gerador eletromagnético

O gerador eletromagnético foi projetado com uma arquitetura de categoria 1 tendo em conta as novas funcionalidades de adaptação do curso do gerador (Fig. 3.5). O gerador foi composto por:

- Tubo em PTFE que constitui a parte central do gerador: $\varnothing 25 \times 13$ mm, 100 mm de altura
- Ímanes fixos cilíndricos em neodímio: magnetização N45, com revestimento em níquel, 12×2 mm
- Íman cilíndrico para levitação em neodímio: magnetização N45, com revestimento em níquel, 12×10 mm
- Arquitetura do enrolamento: 45000 espiras, diâmetro do fio 0,06 mm. $\varnothing_{exterior}$ 23 mm, $\varnothing_{interior}$ 15 mm, numa altura de 80 mm

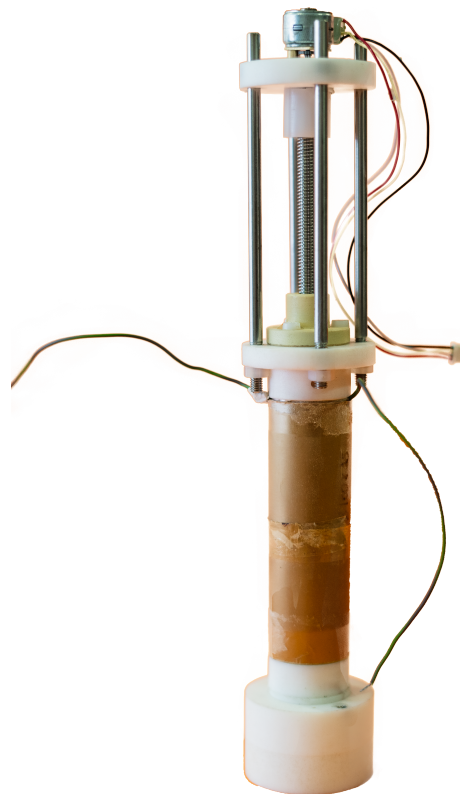


Figura 3.5: Estrutura geral do gerador eletromagnético adaptativo.

O gerador tem um comprimento total de 233 mm e um peso total de 275,2 g.

3.1.3 Seleção do atuador

A escolha de um motor foi baseada em dois fatores base: baixo consumo e binário. O primeiro advém da necessidade energética; o segundo devido à força rotacional que é necessária suportar devido às forças de repulsão magnéticas entre o íman em levitação e o íman no qual se deseja adaptar o posicionamento axial.

Medindo a massa do fuso, do acoplamento ao motor, do suporte do motor e do motor, obteve-se 49,8 g. A partir do modelo analítico com integrais de *Bessel* (subsecção 3.7.1) foi possível prever o valor máximo de força magnética de repulsão, tendo sido obtido 43,33 N. Com este valor foi possível efetuar os seguintes cálculos:

$$\tau_{max} = (F_{m_{max}} + F_{atrito} - F_g)R = 0,06 \text{ N/m} \quad (3.1)$$

Onde R é o raio do atuador (1,5 mm). A força de atrito foi apenas considerada entre o fuso e a flange do fuso. Esta força tem o valor de 0,06 N [58]. A partir destes resultados foi escolhido o motor de passo GM15BY que tem um binário máximo de 0,08 N/m, proporcionando assim um coeficiente de segurança de 1,2. A escolha de um motor de passo, em detrimento de outro tipo de motor, partiu do facto deste poder funcionar em malha aberta com uma boa precisão no seu posicionamento e permitir diferentes velocidades, sem haver necessidade de um sensor para medir o descolamento do íman na extremidade, que seria outro consumidor de energia.

O motor vem com uma caixa redutora de 100:1 para permitir um binário de saída maior (Fig. 3.6a). Este motor é o elemento que movimenta o íman superior conforme a frequência do sistema é alterada para possibilitar o ajuste da distância entre ímanes e assim maximizar a geração de energia. Para o controlo do motor foi utilizado o driver DRV8825 da *Texas Instruments* especificamente dedicada a este tipo de motores de pequenas dimensões (Fig. 3.6b). Este driver permite variar a resolução pretendida para o passo do motor.

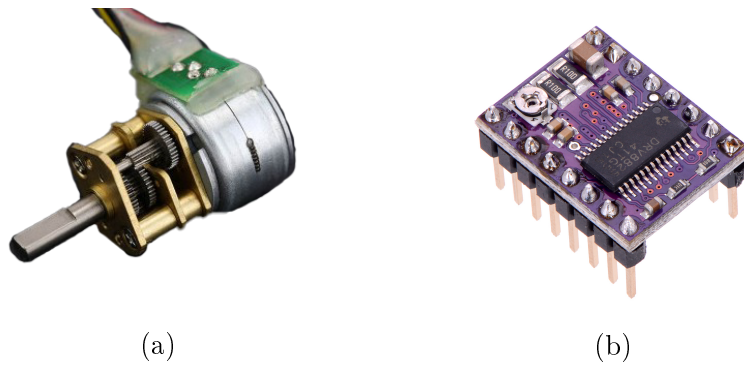


Figura 3.6: (a) Motor de passo GM15BY; (b) Driver DRV8825 da *Texas Instruments* [59].

3.1.4 Aparato experimental para identificação dos parâmetros do gerador

Para a identificação de parâmetros como a força magnética de repulsão entre ímãs e o coeficiente de acoplamento eletromecânico foi construído um outro aparato experimental para se acoplar à parte superior do gerador. No processo de identificação destes parâmetros foi retirada a estrutura composta pelo motor de passo (visto não ser necessária) e colocado este aparato experimental. Este dispõe de um veio com uma base que acopla o íman central e permite colocar o sensor para monitorização da dinâmica da excitação mecânica em vez do motor na parte superior do sistema (Fig. 3.7).

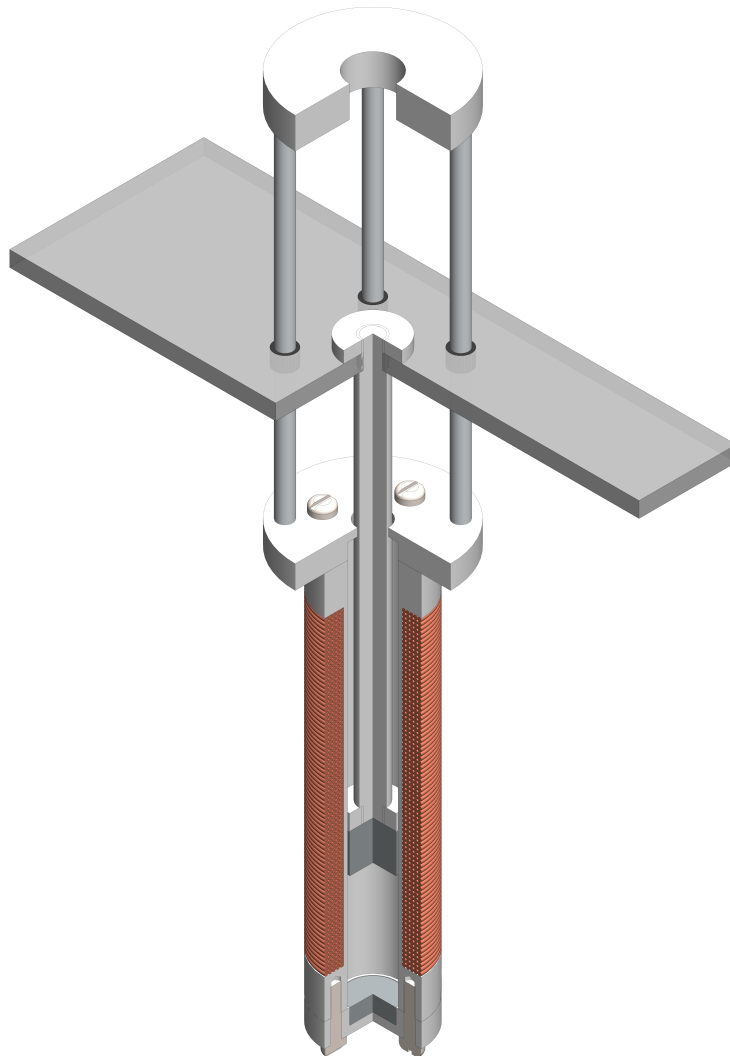


Figura 3.7: Desenho 3D do gerador com a estrutura que suporta as massas para o ensaio das forças magnéticas de repulsão com o íman central acoplado.

3.2 Plataforma Experimental

Nesta secção foi desenvolvido um aparato experimental que possibilitou realizar ensaios experimentais no gerador eletromagnético com arquitetura em levitação magnética. Foi selecionado um sistema de excitação mecânica e um sensor para monitorizar a dinâmica da excitação externa. Posteriormente realizou-se a modelação e fabrico de suportes para estes sistemas de excitação mecânica e sensorial (Fig. 3.8). Para fornecer energia ao sistema de excitação mecânica e ao sensor foi utilizada uma fonte de alimentação (Fig. 3.9). Ao longo desta secção foi descrito todo o equipamento utilizado.

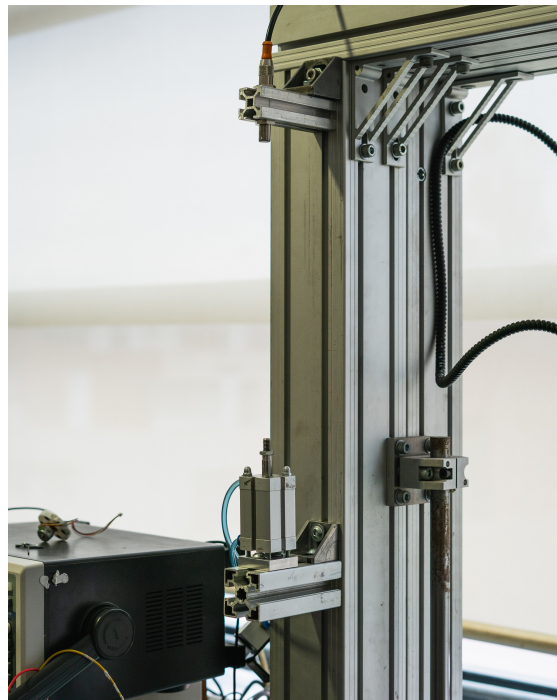


Figura 3.8: Plataforma experimental sem o gerador eletromagnético adaptativo.



Figura 3.9: Fontes de alimentação, multímetro e osciloscópio utilizados.

3.2.1 Sensor de monitorização da dinâmica da excitação mecânica

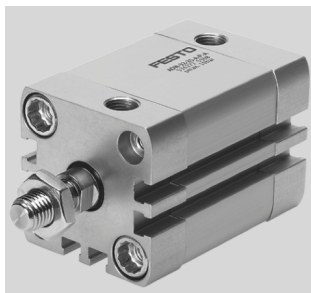
O sensor ultrassónico da *Microsonic* nano 15/CU foi utilizado para monitorizar a dinâmica da excitação mecânica e a posição do íman em levitação quando foi utilizada a estrutura externa para a identificação dos parâmetros referentes ao gerador (Fig. 3.10). Este sensor mede num intervalo de 20 mm a 250 mm, com 0,069 mm de resolução e com uma tensão elétrica de saída linear de 0-10 V.



Figura 3.10: Sensor ultrassónico *Microsonic* nano 15/CU [60].

3.2.2 Sistema de excitação mecânico

O sistema utilizado para excitar o gerador eletromagnético adaptativo foi um cilindro pneumático da *FESTO* ADN-25-30-A-P-A, que tem um curso máximo de 30 mm. Para atuar esse cilindro foi utilizada a eletroválvula da *FESTO* MPYE-5-1/8-HF-010-B (Fig. 3.11).



(a)



(b)

Figura 3.11: Cilindro pneumático (a) e eletroválvula pneumática (b) da *FESTO* [61, 62].

3.2.3 Suportes para o sistema de excitação e monitorização

A estrutura que suporta o sistema de excitação foi construída com uma disposição que facilita a montagem tanto do sistema de excitação como do gerador (Fig. 3.12a). O sensor para monitorização da dinâmica da excitação mecânica foi instalado numa região superior à estrutura que sustenta o sistema de excitação e o

gerador (Fig. 3.12b). A estrutura com o sensor foi ajustada verticalmente para garantir uma eficaz monitorização nos diversos ensaios, como é descrito a seguir. Todos os suportes foram montados numa estrutura de uma máquina de compressão fixa ao chão.

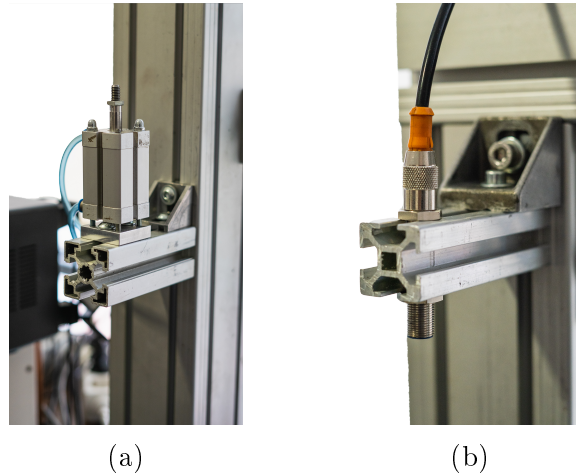


Figura 3.12: Suporte do sistema de excitação (a) e suporte do sensor para monitorização da dinâmica da excitação mecânica (b).

3.2.4 Aquisição de dados e controlo

Os vários parâmetros foram monitorizados e controlados por uma placa de controlo DSP (DS1104 da *dSPACE*) (Fig. 3.13). Os módulos E/S da DS1104 foram inicializados e configurados em conjunto com o *Simulink* (v. 10.0, MathWorks) e o *MATLAB* (v. 9.7 R2019b, MathWorks). Um programa com interface gráfica foi desenvolvido no software *ControlDesk* (v. 7.0, *dSPACE*) para interagir em tempo real com a aplicação (Fig. 3.14).



Figura 3.13: Placa de controlo *DSP* (DS1104 da *dSPACE*) [63].

Na Fig. 3.14 é possível visualizar a interface do programa desenvolvido para

os ensaios experimentais, sendo que: o “Sinal da eletroválvula pneumática” é o sinal sinusoidal que vai fazer atuar o cilindro pneumático; a “Leitura do sensor de ultrassons” é o sinal proveniente do sensor de ultrassons; a “Leitura da tensão produzida” é a tensão elétrica produzida pelo gerador; e por fim, “PWM motor de passo” é o sinal que é enviado para o motor de passo se mover.

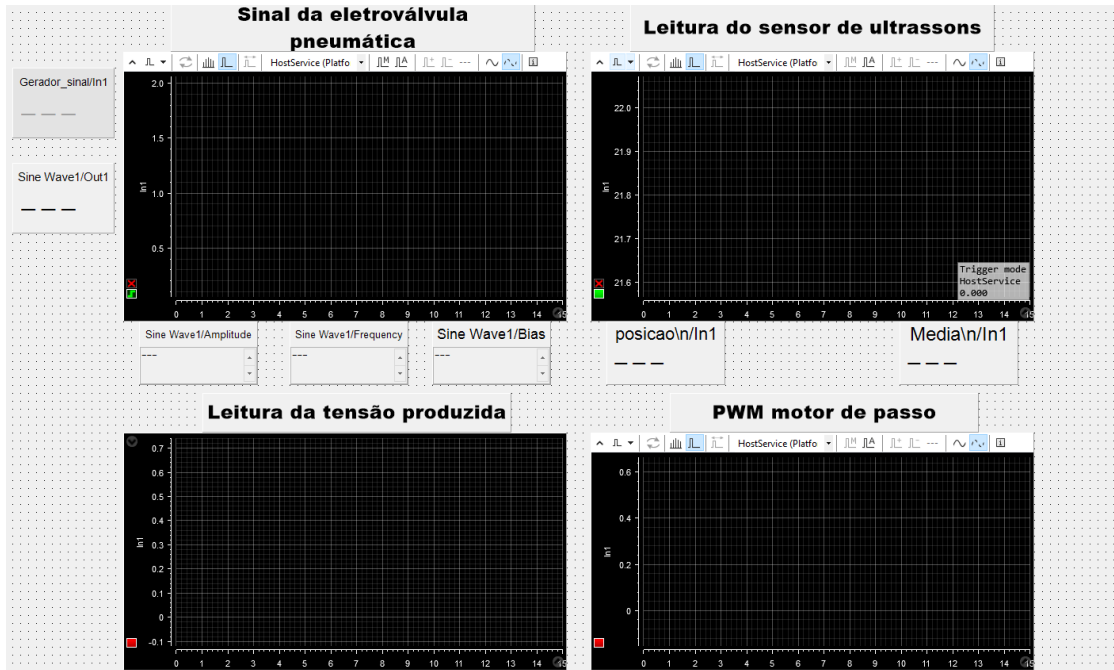


Figura 3.14: Interface do programa desenvolvido no *ControlDesk* 7.0 para os ensaios experimentais.

A placa DS1104 da *dSPACE* é limitada em termos da gama de monitorização de tensões elétricas, pois só adquire valores até ± 10 V. O gerador eletromagnético projetado não necessita de grandes amplitudes de excitação para produzir tensões elétricas superiores a 10 V, sendo necessário desenvolver um circuito de condicionamento baseado num divisor de tensão (Fig. 3.15), para que a tensão elétrica produzida possa ser monitorizada pela placa da *dSPACE* e ainda assim se conhecer os valores reais de tensão elétrica (Eq. 3.2). Num simples teste de vibração manual foram obtidos valores até 70 V, pelo que, por uma questão de segurança, o valor utilizado nos cálculos do divisor de tensão foi $V_{entrada} = \pm 80$ V.

$$V_{saída} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{entrada} \quad (3.2)$$

Numa primeira iteração foram utilizados os valores $V_{entrada} = \pm 80$ V e $V_{saída} = \pm 10$ V. Pretendendo-se obter uma resistência de carga equivalente à resistência interna do gerador foi possível resolver a equação em ordem a R_2 . O uso da resistência de carga igual à resistência interna do sistema provém de a potência máxima gerada ser obtida quando a resistência interna se aproxima da resistência de carga.

Esta informação advém diretamente do teorema da máxima transferência de Potência de *Moritz von Jacobi*. Desta primeira iteração retirou-se que é necessário uma resistência R_2 de 2438Ω , o que implica $R_1 = 17063 \Omega$ para obter a tensão elétrica desejada à saída.

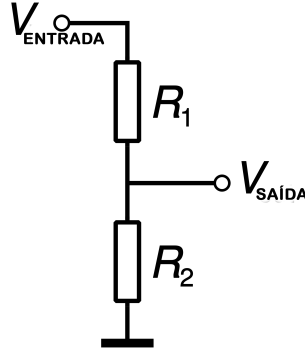


Figura 3.15: Esquema do divisor de tensão.

Os valores medidos das resistências foram utilizados numa segunda iteração para obtenção do valor máximo de tensão elétrica à saída do divisor de tensão. Os valores medidos foram $R_1 = 17051 \Omega$ e R_2 de 2361Ω o que implicou uma tensão elétrica máxima de $\pm 9,73 \text{ V}$. A relação entre a tensão elétrica de entrada e a tensão elétrica de saída do divisor de tensão foi dada pela seguinte equação:

$$V_{saída} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{entrada} = 0,1216 V_{entrada} \quad (3.3)$$

3.3 Parâmetros constantes

Nesta secção encontram-se os parâmetros constantes que foram considerados tanto nos ensaios experimentais como no desenvolvimento dos modelos computacionais. Os parâmetros apresentados na Tab. 3.1 foram obtidos através de medições ou eram já conhecidos do projeto mecânico do gerador eletromagnético adaptativo.

Tabela 3.1: Parâmetros físicos do protótipo do gerador eletromagnético

Parâmetro	Valor	Unidades
m	0,0084	kg
R_{int}	$19,5 \times 10^3$	Ω
d_0	0,035	m
g	9,81	m/s^2

Nas tabelas seguintes encontram-se as características dos ímanes nas extremidades (iguais) (Tab. 3.2) e do íman em levitação (Tab. 3.3). Foram utilizados ímanes de neodímio por estes possuem a vantagem de ter um campo magnético estático muito forte, conseguindo desta forma uma força magnética superior a muitos outros.

Tabela 3.2: Parâmetros dos ímanes fixos

Parâmetro	Valor	Unidades
<i>Espessura</i>	0,002	m
<i>Diâmetro</i>	0,012	m
<i>Campo Magnético</i>	1,559	T
<i>Magnetização</i>	$1,240 \times 10^5$	A/m

Tabela 3.3: Parâmetros do íman central

Parâmetro	Valor	Unidades
<i>Espessura</i>	0,010	m
<i>Diâmetro</i>	0,012	m
<i>Campo Magnético</i>	1,559	T
<i>Magnetização</i>	$1,240 \times 10^5$	A/m

3.4 Ensaios experimentais

Foram efetuados cerca de 180 ensaios experimentais. Em cada um deles foram adquiridos dados de tensão elétrica e do posicionamento do gerador durante dez segundos com uma velocidade de aquisição de 0,5 ms.

O gerador foi roscado no cilindro pneumático. Por cima do gerador foi montado o sensor de monitorização da dinâmica da excitação mecânica. Depois de colocados nos respetivos suportes foi realizado o alinhamento do gerador com o sensor para garantir uma boa aquisição de dados.

Os ensaios experimentais foram efetuados com uma resistência de carga ($R_{carga} = 19,4 \text{ k}\Omega$) próxima da resistência interna do sistema ($R_{int} = 19,5 \text{ k}\Omega$) para desta forma maximizar a energia produzida pelo gerador eletromagnético adaptativo. O objetivo principal foi a análise dos valores de tensão, potência e energia elétricas produzidas pelo gerador eletromagnético para diferentes distâncias entre ímanes, mantendo a sua amplitude fixa e variando as diferentes distâncias para cada uma das frequências.

3.4.1 Variação de distância entre os ímanes das extremidades

A distância entre os ímanes fixos nas extremidades foi descrita com Δd (Fig. 3.16). Esta distância pode diminuir ou aumentar 20 mm como no intervalo 3.4.

$$-\frac{4}{7}d_0 \leq \Delta d \leq \frac{4}{7}d_0 \quad (3.4)$$

Nesta fase preliminar de validação experimental do conceito, o intervalo Δd foi definido como um valor superior a $d_0/2$. Os ensaios foram realizados mantendo uma amplitude e frequência fixa e variando a posição do íman superior desde $4d_0/7$ até $-4d_0/7$ com um passo de 5 mm, para cada uma das amplitudes e frequências utilizadas.

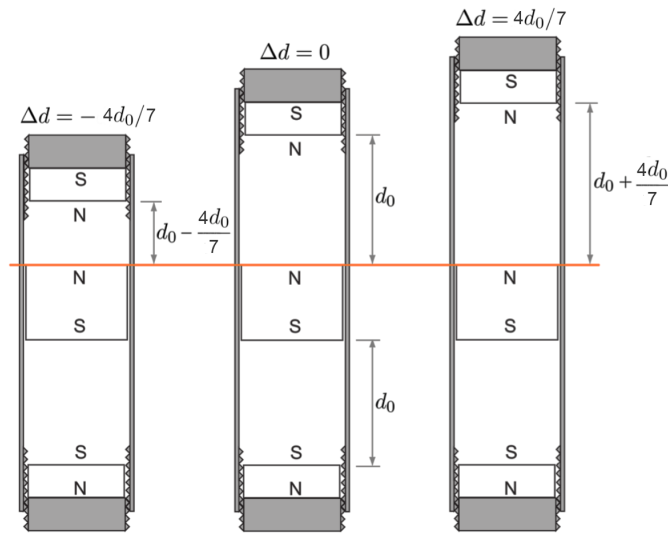


Figura 3.16: Variação da distância entre os ímanes das extremidades.

3.4.2 Variação da amplitude de excitação

Duas excitações mecânicas sinusoidais foram aplicadas ao sistema de geração de energia de acordo com a seguinte equação:

$$E_x = A_e \sin(2\pi ft) \quad (3.5)$$

em que E_x é excitação mecânica e A_e a amplitude da excitação mecânica externa. Foram consideradas duas amplitudes $A_e = 14$ mm e $A_e = 28$ mm.

3.4.3 Variação da frequência

A frequência foi variada entre 1 Hz e 5 Hz com incrementos de 0,5 Hz. As limitações do aparato experimental impediram testes experimentais com frequências superiores a 5 Hz.

3.5 Modelo do mecanismo de transdução

3.5.1 Design do gerador eletromagnético

O modelo computacional usado para a simulação advém de um gerador composto por uma estrutura cilíndrica oca, três elementos magnéticos cilíndricos (dois ímãs fixos e um em levitação) e dois enrolamentos em torno da estrutura central do gerador (Fig. 3.17). Este tipo de arquitetura é muito utilizado na literatura pois inclui elementos fundamentais do processo de transdução [50–53].

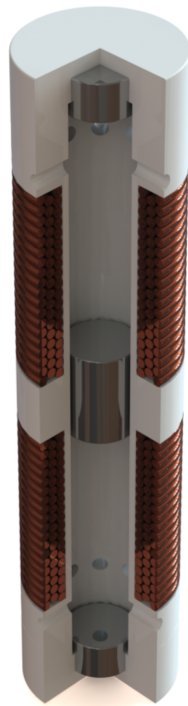


Figura 3.17: Gerador de levitação magnética desenvolvido por Mann e Sims [50]

3.5.2 Mecanismo de transdução

O modelo analítico desenvolvido por Mann e Sims [50] foi utilizado como base (com algumas alterações) para validar o conceito de gerador adaptativo pois assegura a dinâmica fundamental do mecanismo de transdução mecânico-elétrica. Este modelo utiliza a variável z para descrever a dinâmica da excitação do gerador a qual é definida em termos de amplitude (A) e frequência angular de excitação (Ω). Também usa a variável x para descrever a dinâmica do ímã em levitação no interior do gerador (Fig. 3.18b). No modelo definido por Mann e Sims [50] a força magnética repulsiva é modelada como uma mola não linear cujo comportamento é similar ao comportamento de um oscilador de *Duffing*. A sua curva força-deslocamento é dada pela soma das forças magnéticas (F_m) ao longo da direção axial, onde k é a

rigidez linear e k_3 é o coeficiente não-harmônico (Eq. 3.6).

$$F_m = kx + k_3x^3 \quad (3.6)$$

Pelas leis de *Kirchoff's* foi possível introduzir a Eq. 3.7 que traduz a parte elétrica do sistema (Fig. 3.18a).

$$i(R_{carga} + R_{int}) - \alpha(\dot{x} - \dot{z}) = 0 \quad (3.7)$$

onde i é a corrente elétrica, R_{carga} a resistência externa de carga, R_{int} a resistência interna do enrolamento e α é o coeficiente de acoplamento eletromecânico. Este coeficiente foi muitas vezes definido como $\alpha = NBl$, em que N é o número de espiras do enrolamento, B é o campo magnético médio e l o comprimento total do enrolamento. Definiu-se inicialmente a dinâmica mecânica através da seguinte equação:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{z}) + k(x - z) + k_3(x - z)^3 = -mg \quad (3.8)$$

onde m é massa do íman a levitar, g é a aceleração devido à gravidade, o coeficiente de amortecimento total é $c = c_m + c_e$, onde c_m é o coeficiente de amortecimento mecânico e $c_e = \alpha^2/(R_{carga} + R_{int})$ é o coeficiente de amortecimento elétrico. Uma alteração de variável usando $y = x - z$ permite que a dinâmica mecânica do sistema seja modelada por:

$$m\ddot{y} + m\ddot{z} + c_m\dot{y} + ky + k_3y^3 + \alpha i = -mg \quad (3.9)$$

Sabendo que $\ddot{z} = -A\Omega^2 \cos(\Omega t)$, é possível definir \ddot{y} como expresso na Eq. 3.10.

$$\ddot{y} = \frac{A\Omega^2 \cos(\Omega t)m - c_m\dot{y} - \alpha i - ky - k_3y^3 - mg}{m} \quad (3.10)$$

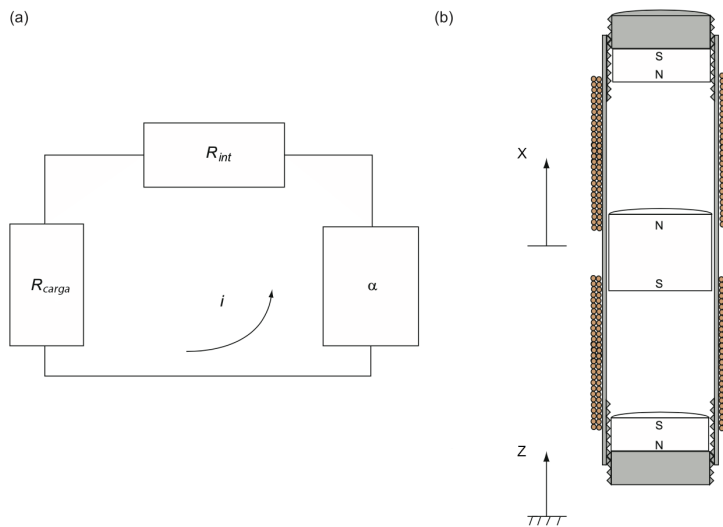


Figura 3.18: Circuito elétrico (a) referente à arquitetura em (b) [50]

3.5.3 Limitações do modelo

Apesar deste modelo obter bons resultados existem várias limitações. O primeiro deles é que só é válido para resistências de carga muito elevadas em relação à resistência do enrolamento, o que inviabiliza o seu uso no cenário da máxima transferência de potência. O campo magnético B é considerado constante, o que não acontece na realidade, implicando α constante ($\alpha = NBl$) e o coeficiente de amortecimento elétrico c_e também. Outro facto é o desprezo da influência da indutância do enrolamento. Outra limitação advém do modelo só poder ser utilizado numa gama limitada do curso do gerador [40].

3.6 Detalhes do modelo computacional

A plataforma experimental não permitiu realizar ensaios com trajetórias ascendentes e descendentes para a mesma amplitude, portanto foram desenvolvidos modelos computacionais que permitem prever a dinâmica do gerador considerando determinadas excitações que descrevem o comportamento do sistema para a trajetória ascendente e descendente para a mesma amplitude de excitação.

3.6.1 Variação de distância entre os ímanes das extremidades

A gama de distâncias entre ímanes das extremidades usada no modelo computacional foi descrita com Δd . Esta distância pode diminuir ou aumentar $4d_0/7$ como no intervalo 3.11.

$$-\frac{4}{7}d_0 \leq \Delta d \leq \frac{4}{7}d_0 \quad (3.11)$$

O intervalo Δd foi definido igual ao selecionado anteriormente na parte experimental. Foram utilizados 100 valores intermédios no intervalo definido acima.

3.6.2 Variação da amplitude de excitação

Seis amplitudes de excitação foram aplicadas ao gerador: 0,1; 2; 4; 6; 8 e 10 m/s². Estes valores de excitação foram suficientes para se obter uma larga gama de resultados diferentes e são comumente usados nos estudos analisados na revisão da literatura.

3.6.3 Variação da frequência

A frequência de excitação exterior do sistema foi variada num intervalo de 1 até 60 Hz.

3.6.4 Variação da resistência de carga

As resistências utilizadas nos modelos foram: uma resistência de carga igual à resistência interna ($19,5 \text{ k}\Omega$) para simular a dinâmica do gerador na máxima transferência de potência elétrica e uma resistência de carga de $100 \text{ M}\Omega$ para simular o desempenho do gerador em circuito aberto.

3.6.5 Método de simulação

Todas as simulações foram efetuadas utilizando o *MATLAB* (v. 9.7 R2019b, MathWorks) e o *Simulink* (v. 10.0, MathWorks). No *Simulink* as equações foram resolvidas por integração numérica utilizando um passo fixo de 1×10^{-4} e o *solver* ode14x (Fig. 3.19). A excitação de entrada do sistema foi composta por uma onda sinusoidal de amplitude fixa que muda de frequência ao longo do tempo (Fig. 3.20).

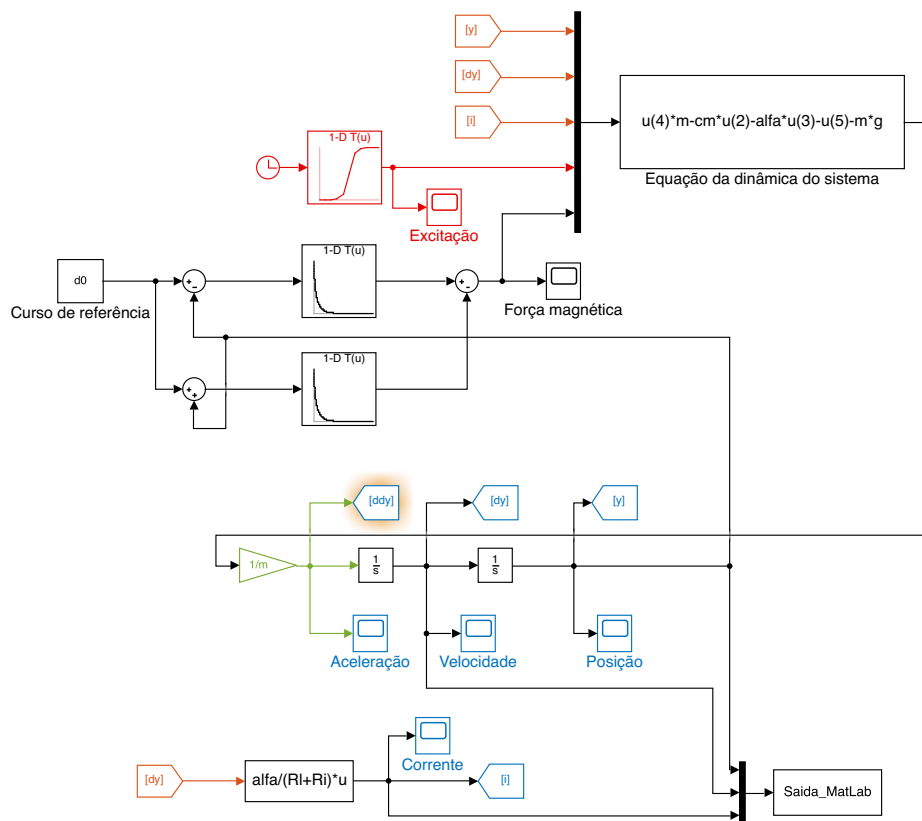


Figura 3.19: Modelo em *Simulink* que permitiu realizar a previsão da dinâmica do gerador eletromagnético adaptativo.

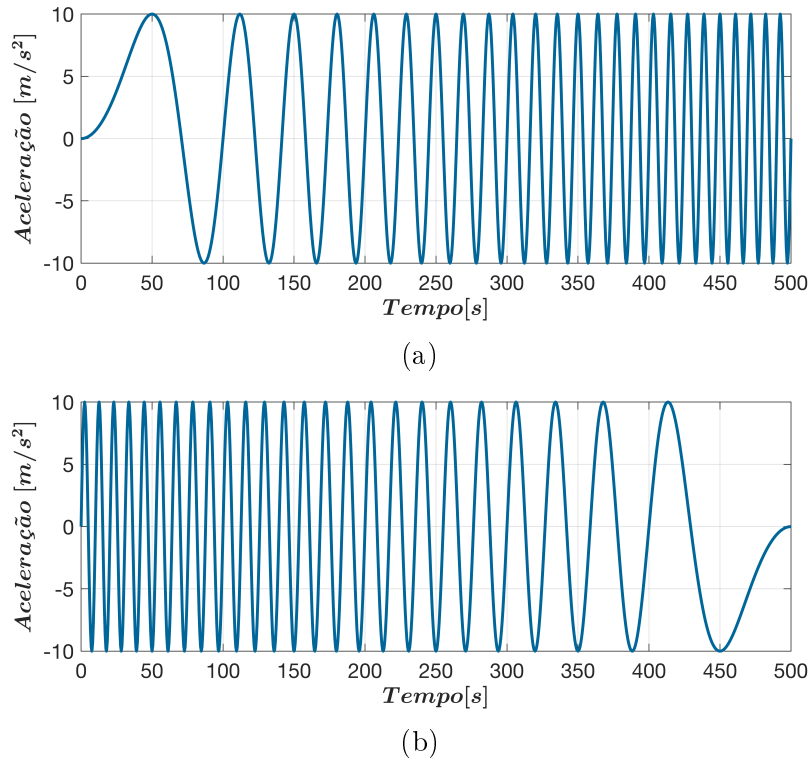


Figura 3.20: Imagem representativa da excitação aplicada ao sistema com uma amplitude de 10 m/s^2 ; Excitação de frequência ascendente: onda sinusoidal a variar de 0 até $0,1 \text{ Hz}$ (a); Excitação de frequência descendente: onda sinusoidal a variar de $0,1$ até 0 Hz (b).

3.7 Parametrização

Nesta secção foram descritos os métodos utilizados para parametrizar as forças magnéticas de repulsão, o coeficiente de acoplamento eletromecânico e o coeficiente de amortecimento mecânico.

3.7.1 Parametrização das forças magnéticas de repulsão

Modelo analítico com integrais de *Bessel*

Numa primeira parte, com recurso ao Integral de *Bessel* [64] foi possível descrever qual a força axial aplicada pelo íman em levitação em função da distância a que este se encontra do íman fixo na extremidade (Eq. 3.12). Neste estudo foram desprezados os efeitos das forças magnéticas radiais, pelo facto da sua reduzida influência nos resultados. O uso deste modelo analítico elimina a limitação apresentada pelo modelo de Mann e Sims [50] permitindo utilizar qualquer gama de curso do gerador.

$$F_{miz} = \mu_0 \pi R_i R_c M_i M_c \int_0^\infty J_1(\varepsilon R_i) J_1(\varepsilon R_c) [e^{-\varepsilon(S_i+L_i)} + e^{-\varepsilon(S_i+L_c)} - e^{-\varepsilon(S_i)} - e^{-\varepsilon(S_i+L_i+L_c)}] \varepsilon^{-1} d\varepsilon \quad (3.12)$$

sendo o índice i de *inferior* referente aos parâmetros do íman na parte inferior e c de *central* referente ao íman central, R refere o raio do íman, M a magnetização de saturação, L é a altura do íman. S_i é neste caso a distância entre o íman em movimento e o íman fixo na extremidade inferior e J_1 é a função de 1ª ordem de *Bessel*. A Eq. 3.12 também pode ser utilizada para calcular a força entre o íman em levitação e o íman fixo na extremidade superior, utilizando R_s , M_s , L_s e S_s .

Modelo FEM

O segundo método foi realizado com recurso a modelos FEM usando o software COMSOL *Multiphysics* (v. 5.3 COMSOL) [65]. Todos os domínios da modelação foram considerados homogêneos e isotrópicos. Os parâmetros de entrada no modelo podem ser consultados na Tab. 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros de entrada da simulação em COMSOL

Descrição	Valor	Unidades
<i>Amplitude de Magnetização</i>	$1,09 \times 10^6$	m/A
<i>Campo magnético</i>	1,559	T

Foi utilizada uma malha extremamente fina 3D de elementos lineares tetraédricos de segunda ordem com uso do método de *Delaunay*. Dez simulações foram realizadas relativas às dez distâncias diferentes entre ímanes.

O valor da distância entre ímanes foi variado para cada simulação em [0,1; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30] mm. Foram modelados dois ímanes e uma esfera de ar envolvente, as características dos ímanes de neodímio provieram da Tab. 3.2, Tab. 3.3 e Tab. 3.4. Os parâmetros do ar vieram diretamente do software de elementos finitos.

Os valores de força e do campo magnético foram simulados utilizando a interface física do COMSOL “The Magnetic Fields, No Currents”. Esta interface física permite através da Lei de *Gauss* obter o campo magnético usando o potencial escalar magnético como uma variável dependente (Eq. 3.13).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (3.13)$$

onde: \mathbf{E} - é a intensidade do campo elétrico [V/m]; ϵ_0 - é a constante de permissividade do vácuo [F/m]; ρ - é a densidade de carga volumétrica [C/m³].

Modelo empírico baseado em medições experimentais

As forças magnéticas de repulsão do protótipo foram adquiridas com o uso de uma estrutura que foi adicionalmente desenvolvida para colocar na zona superior do gerador (Fig. 3.21). A estrutura foi desenvolvida de forma a possibilitar a colocação de diversas massas sobre o ímã em levitação e a acoplar o sensor de ultrassons nano -15/CD da *Microsonic*. O sensor foi utilizado para obter as diferentes distâncias entre o ímã móvel e o ímã fixo na extremidade inferior quando sujeito às diferentes massas. Nesta parte o ímã fixo na extremidade superior, o motor, suporte do motor e o fuso são retirados para que seja possível montar a estrutura adicional.

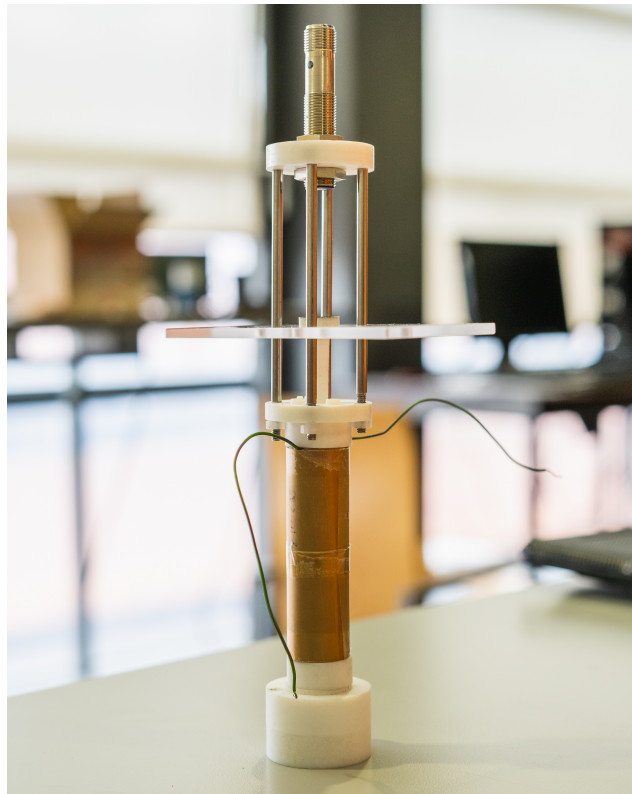


Figura 3.21: Gerador eletromagnético com a estrutura para medição da força magnética de repulsão.

Foram pesadas todas as massas, assim como, a estrutura adicionada visto que a mesma tem influência nos resultados. Posteriormente foram colocadas diferentes massas sobre a estrutura adicional de forma a realizar várias medições. Este processo foi realizado progressivamente até o ímã em levitação ter sobre ele uma massa total de 2,64 kg, o equivalente a 25,9 N.

3.7.2 Parametrização do coeficiente de acoplamento eletromecânico

Para a determinação experimental do coeficiente de acoplamento eletromecânico foi utilizada a mesma estrutura que para as forças magnéticas. Nesta parte foi retirado também o íman na extremidade inferior ficando apenas o íman central no interior do tubo. Este íman foi alocado à parte inferior do veio utilizado para medir a distância, sendo assim possível garantir que o valor medido é efetivamente onde o íman se encontra (Fig. 3.21 e 3.22). O objetivo nesta parte experimental foi obter diferentes valores de tensão elétrica e de velocidade para conseguir obter o coeficiente de acoplamento eletromecânico. Estes testes foram realizados através de vibração manual do gerador durante trinta segundos. Foi utilizada a placa DS1104 da *dSPACE* em conjunto com o sensor de ultrassons para adquirir a tensão elétrica produzida pelo gerador e o deslocamento do íman em levitação.

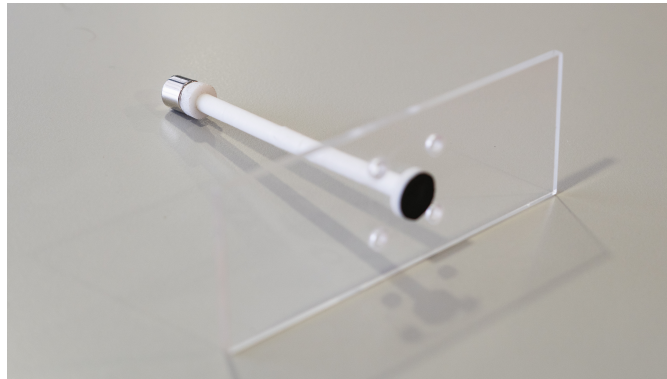


Figura 3.22: Estrutura central com o íman acoplado que permite o ensaio das forças magnéticas de repulsão e do coeficiente de acoplamento eletromecânico.

3.7.3 Parametrização do coeficiente de amortecimento mecânico

Foi realizado um ensaio de queda livre cuja posição inicial foi 90 mm para obter experimentalmente o coeficiente de amortecimento mecânico. Para a aquisição do deslocamento do íman central foi utilizada a placa DS1104 e o sensor de ultrassons. Posteriormente foram utilizados os softwares *MATLAB* e o *Simulink* para simular a dinâmica mecânica do gerador eletromagnético sem qualquer excitação externa ou parâmetros elétricos. O uso da função *fminsearch* do *MATLAB* permitiu uma comparação entre os dados obtidos experimentalmente e diferentes simulações do modelo computacional desenvolvido, variando o coeficiente de amortecimento mecânico. Este método resultou no valor de coeficiente de amortecimento mecânico que através do modelo computacional mostrou uma dinâmica mecânica mais aproximada da dinâmica obtida experimentalmente.

3.8 Análise de resultados

3.8.1 Análise gráfica

Neste modelo foi possível variar a frequência da excitação embora mantendo a sua amplitude fixa, tanto na trajetória ascendente como na descendente, variando a distância Δd para cada uma das simulações. Na simulação foram utilizadas duas resistências de carga diferentes, 19,5 k Ω e 100 M Ω . Desta forma foi possível identificar qual o curso que permite obter os melhores desempenhos do gerador. O valor considerado foi o ponto (“x”) máximo alcançável em ambas as trajetórias: quando a frequência tem uma trajetória ascendente e quando a frequência tem uma trajetória descendente (Fig. 3.23). Posteriormente estes são os pontos que para uma determinada amplitude e frequência de excitação permitem identificar a melhor distância Δd que maximiza o desempenho do gerador.

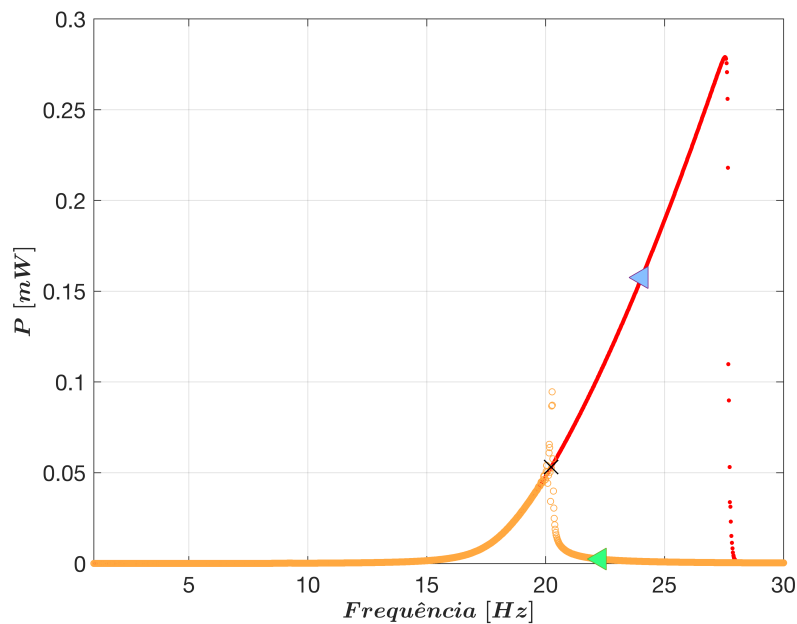


Figura 3.23: Imagem representativa de uma simulação com a amplitude e distância fixa; Excitação de frequência ascendente: onda sinusoidal a variar de 0 até 30 Hz (a vermelho); Excitação de frequência descendente: onda sinusoidal a variar de 30 até 0 Hz (a laranja).

3.8.2 Correlações e aproximações analíticas

A ferramenta *curve fitting tool* do *MATLAB* permitiu aproximar os dados obtidos a equações, utilizando o método dos mínimos resíduos absolutos. Este método encontra uma curva que minimiza a diferença absoluta dos resíduos, em vez de utilizar as diferenças ao quadrado. Isso implica que os valores extremos têm uma

influência menor no ajuste aos pontos. Em termos de algoritmo foi utilizado o *Levenberg-Marquardt* que minimiza a soma dos quadrados. Para correlacionar os diferentes dados obtidos durante o estudo foi utilizada a função *corrcoef* do *MATLAB*. Por definição a função calcula os valores com um intervalo de confiança de 95%.

3.8.3 Parâmetros analisados

Os parâmetros analisados experimentalmente foram a tensão, potência e energia elétricas geradas pelo sistema sob determinadas excitações exteriores. No modelo computacional foi especialmente importante a análise da potência e a relação do curso do gerador com os restantes parâmetros (frequência e amplitude de excitação).

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo foi dividido em três seções: (i) a primeira parte foi focada nos resultados dos ensaios experimentais com o protótipo do gerador eletromagnético adaptativo; (ii) na segunda parte foram analisados os resultados das parametrizações da força magnética de repulsão, do coeficiente de acoplamento eletromecânico e do coeficiente de amortecimento mecânico; (iii) por último, foram abordados os resultados de simulação a partir do modelo computacional desenvolvido.

4.1 Resultados experimentais

Nesta seção foram apresentados os resultados experimentais obtidos utilizando a resistência de carga que maximiza a transferência de energia. Os ganhos apresentados são sempre em relação à distância de referência entre os ímãs das extremidades ($\Delta d = 0$). Até à Fig. 4.5 foram somente apresentadas as frequências de excitação [1, 2, 3, 4, 5] Hz para uma melhor visualização dos resultados.

Na Fig. 4.1, em ambas as amplitudes de excitação à frequência de 1 Hz existe apenas um ligeiro aumento na tensão elétrica máxima alterando a distância entre os ímãs das extremidades, não sendo observado um aumento significativo (aumentou cerca de 11% aumentando 5 mm).

Na Fig. 4.1a existiu um aumento acentuado da tensão elétrica máxima a 2 Hz e 5 Hz aumentando a distância entre os ímãs das extremidades em 5 mm foram obtidos ganhos de 88% e 44%, respectivamente. Ainda na Fig. 4.1a foi possível verificar um aumento de cerca de 186% à frequência de excitação de 3 Hz quando se diminui a distância entre os ímãs das extremidades em 10 mm. O comportamento observado a 4 Hz mostra um desempenho superior em ambos os extremos, no entanto é com a maior distância Δd que os ganhos são mais elevados (182% relativamente à distância de referência). A tensão elétrica máxima absoluta obtida foi 12,25 V à frequência de excitação de 4 Hz.

Na Fig. 4.1b foi observado um ganho de 74% a 2 Hz quando se aumentou em 15 mm o comprimento do gerador. À frequência de excitação de 3 Hz e 4 Hz com um aumento Δd de 10 mm foram alcançados ganhos que chegaram aos 189%. Contudo, à frequência de 4 Hz com Δd máximo (20 mm) foram observados ganhos de 260%

e uma tensão elétrica máxima absoluta de 18,19 V. Com uma frequência de 5 Hz o melhor desempenho foi observado com a distância de referência entre os ímanes das extremidades. No geral em ambas as figuras a variação da distância entre os ímanes das extremidades provocou ganhos significativos (até 260%) na tensão elétrica máxima absoluta produzida pelo gerador. A tensão elétrica máxima mais elevada foi 32,28 V.

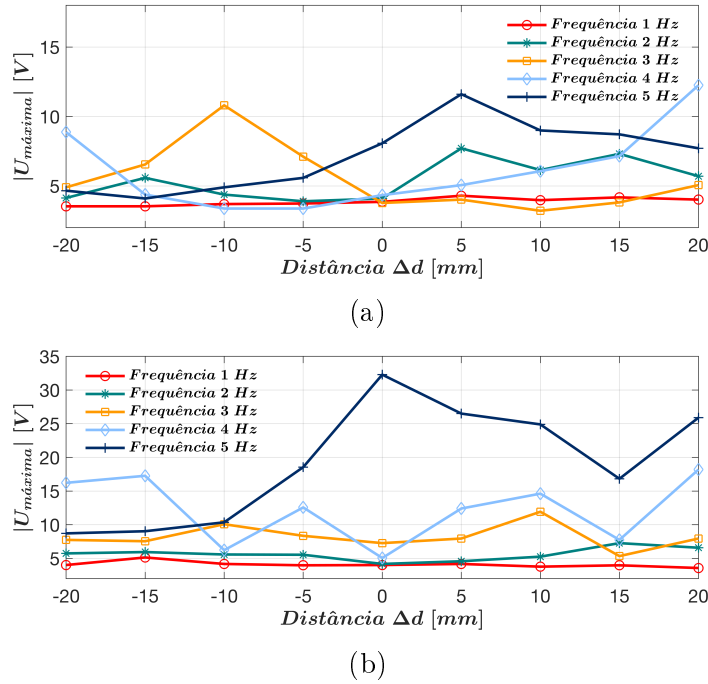
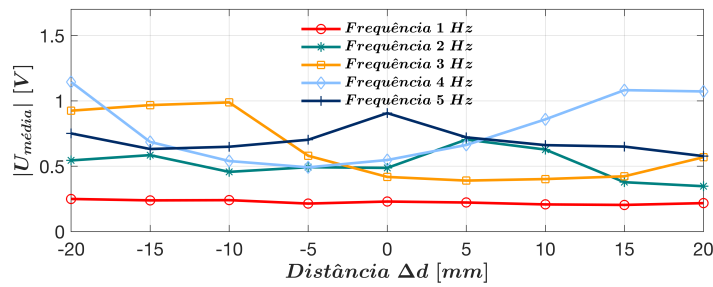


Figura 4.1: Tensão elétrica máxima absoluta: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.

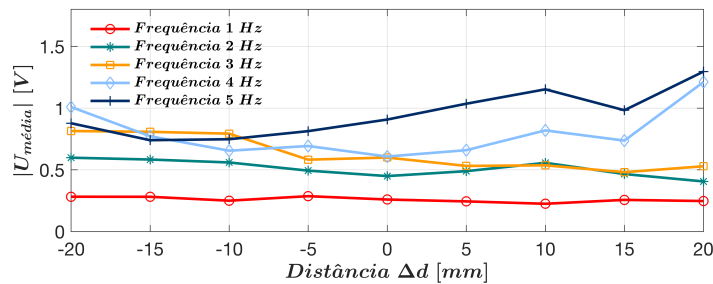
A tensão elétrica média absoluta mostrou do mesmo modo melhores desempenhos com a alteração da distância entre os ímanes das extremidades (Fig. 4.2). Na Fig. 4.2a o aumento mais significativo foi observado a uma frequência de 3 Hz e uma amplitude de excitação de 14 mm, tendo sido obtidos ganhos de 136%. Contudo, à frequência de excitação de 4 Hz também foi observado um ganho de 98%.

Na Fig. 4.2b com uma frequência de excitação de 3 Hz foi observado um melhor desempenho do gerador com distâncias Δd inferiores a -10 mm. Os resultados observados na Fig. 4.2 mostraram ganhos significativos com a alteração das distâncias Δd para todas as frequências de excitação com exceção da amplitude de excitação de 14 mm, que mostrou à frequência de 5 Hz um decréscimo na tensão elétrica média. O valor máximo de tensão elétrica média absoluta foi 1,30 V.

A Fig. 4.3a mostrou ganhos bastante significativos para frequências acima dos 2 Hz, apresentando ganhos até 723%. Com a amplitude de excitação de 14 mm a potência elétrica máxima mais elevada foi 7,73 mW.



(a)



(b)

Figura 4.2: Tensão elétrica média absoluta: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.

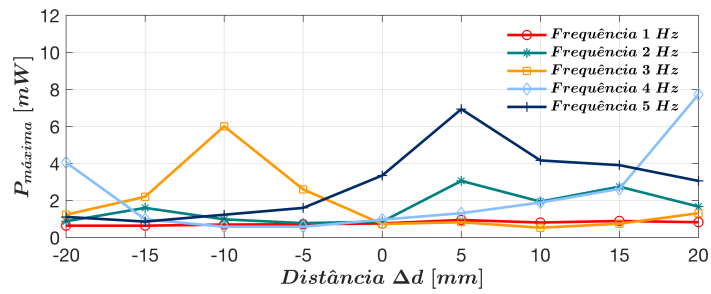
Na Fig. 4.3b o valor mais elevado de potência elétrica máxima foi 53,69 mW à frequência de excitação de 5 Hz com a distância de referência entre os ímanes nas extremidades. Foram observados ganhos de 169% e de 1200% com frequências de excitação de 3 Hz e 4 Hz, respetivamente.

Na Fig. 4.4a foram alcançados ganhos de 467% e 377%, com frequências de 3 Hz e 4 Hz, respetivamente. À frequência de excitação de 2 Hz ainda foram observados ganhos de 137%.

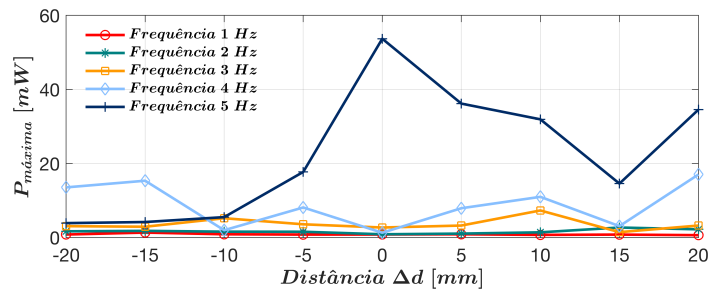
Na Fig. 4.4b foi observado que a maior distância entre os ímanes das extremidades para frequências acima dos 3 Hz permite um melhor desempenho no que se refere à potência elétrica média. A potência elétrica média mais elevada foi 0,30 mW à frequência de 5 Hz e com uma amplitude de excitação de 28 mm (Fig. 4.4b).

Durante os dez segundos analisados nestes ensaios a energia elétrica máxima produzida foi 3 mJ (Fig. 4.5). Este resultado apresentou ganhos de 153% em relação à distância de referência dos ímanes das extremidades.

Utilizando a Fig. 4.6 foi possível identificar qual a distância entre os ímanes das extremidades necessária para produzir uma maior energia elétrica para cada amplitude e frequência de excitação. Com a amplitude de excitação de 28 mm foi verificado que para frequências acima dos 3 Hz o gerador consegue obter um melhor desempenho para distâncias Δd superiores a 10 mm.

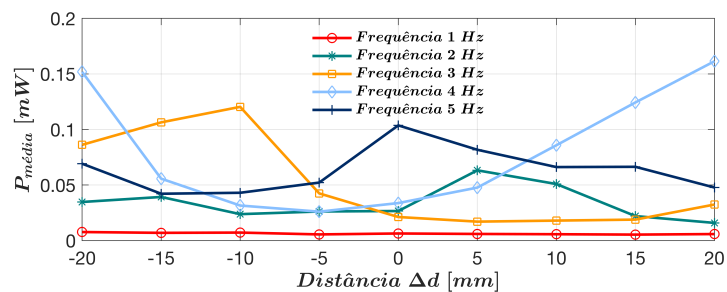


(a)

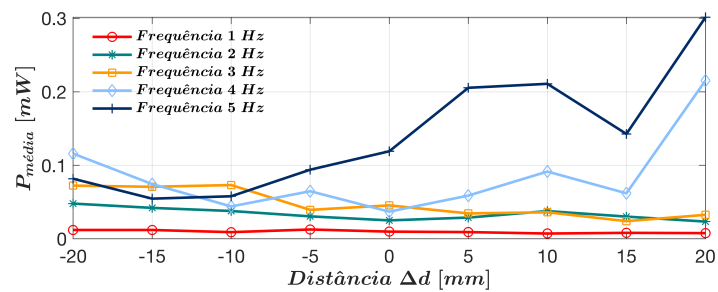


(b)

Figura 4.3: Potência elétrica máxima: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.

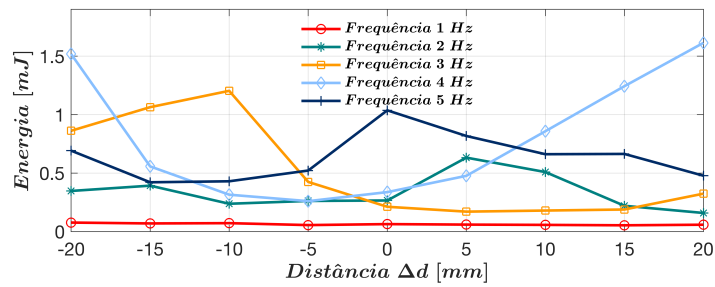


(a)

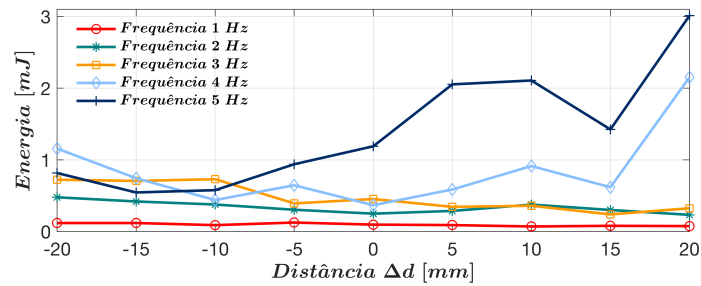


(b)

Figura 4.4: Potência elétrica média: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.



(a)



(b)

Figura 4.5: Energia elétrica: (a) Amplitude de excitação 14 mm; (b) Amplitude de excitação 28 mm.

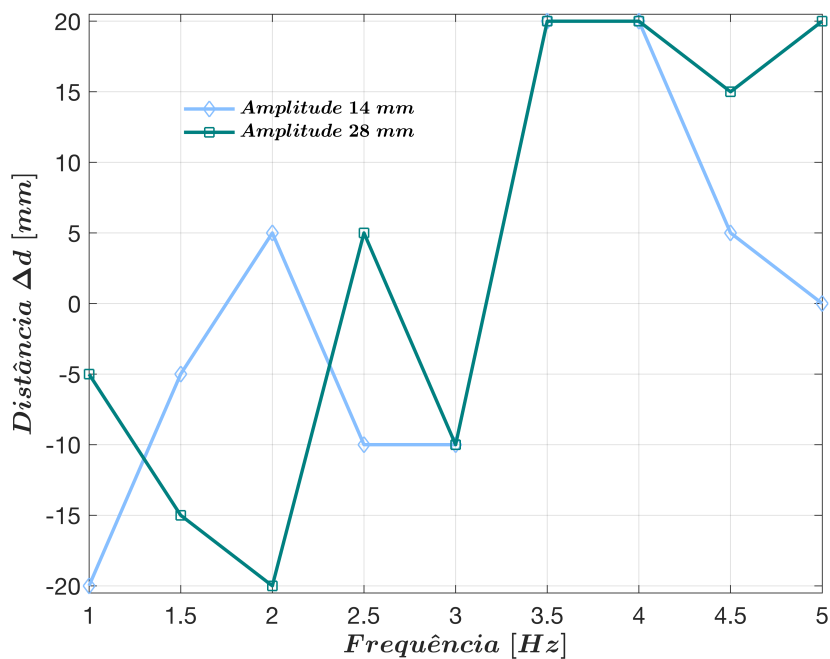


Figura 4.6: Distância ótima entre os ímãs das extremidades para o melhor desempenho do gerador conforme a amplitude e frequência de excitação.

A Fig. 4.7 destaca ganhos significativos de energia elétrica quando o gerador se encontra com a distância Δd máxima para as frequências de excitação de 3.5 Hz e 4 Hz. Só à frequência de excitação de 5 Hz é que a distância de referência entre os ímanes das extremidades mostrou ter um melhor desempenho. Os restantes resultados mostraram que o desempenho pode ser maximizado alterando as distâncias Δd .

Na Fig. 4.8 foi observado que para frequências de excitação superiores a 3.5 Hz são obtidos valores mais elevados de energia elétrica com distâncias entre os ímanes das extremidades superiores em 10 mm em relação à referência. O melhor desempenho do gerador adaptativo nunca foi obtido com a distância de referência entre os ímanes das extremidades ($\Delta d = 0$).

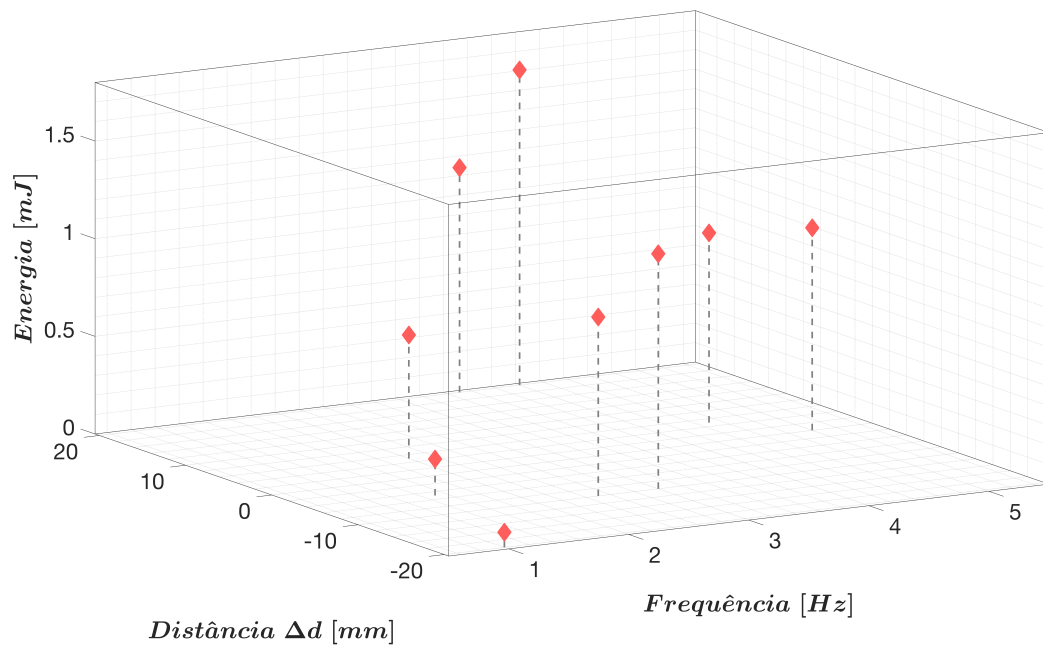


Figura 4.7: Energia elétrica produzida para diferentes distâncias Δd e frequências de excitação. A amplitude de excitação foi 14 mm.

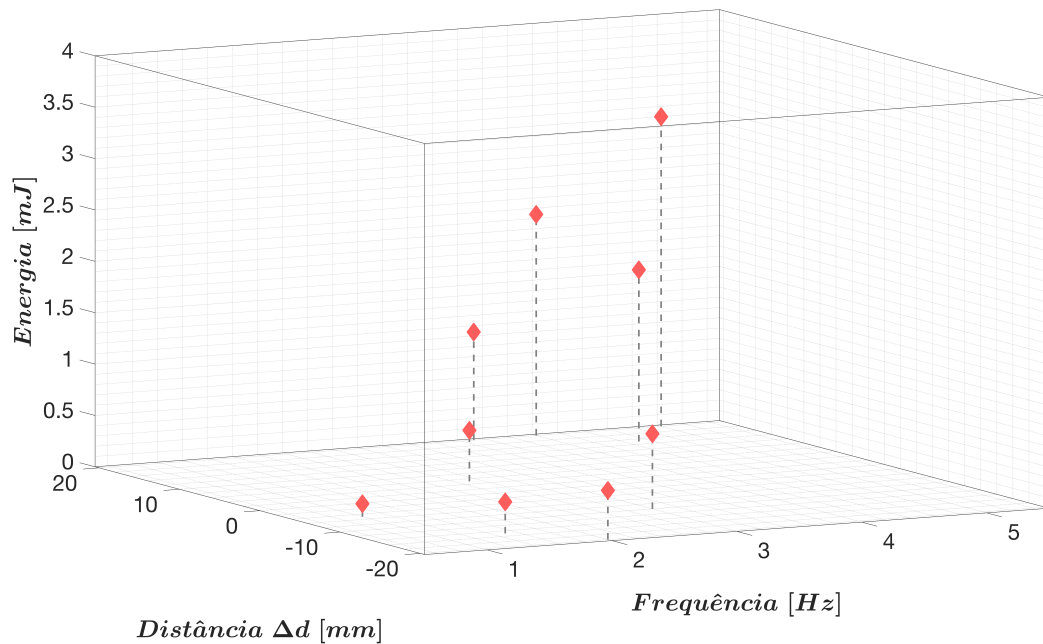


Figura 4.8: Energia elétrica produzida para diferentes distâncias Δd e frequências de excitação. A amplitude de excitação foi 28 mm.

4.2 Resultados da parametrização

Nesta secção foi realizada a identificação da força magnética de repulsão, do coeficiente de acoplamento eletromecânico e do coeficiente de amortecimento mecânico. Estes parâmetros foram posteriormente utilizados no modelo computacional.

4.2.1 Identificação da força magnética de repulsão

Foram utilizados diferentes modelos para o cálculo destas forças em função da distância entre ímanes: modelo analítico com integrais de *Bessel*; modelo FEM; e modelo empírico baseado em medições experimentais.

Modelo FEM

Foi realizado um modelo FEM com os ímanes dispostos com os pólos numa configuração repulsiva para analisar o campo magnético e as forças aplicadas aos ímanes. A disposição dos pólos implicou linhas de fluxo magnético que se vão afastar entre elas (Fig. 4.9). Foi observado que o campo magnético é mais forte nas laterais dos ímanes e menos na zona central.

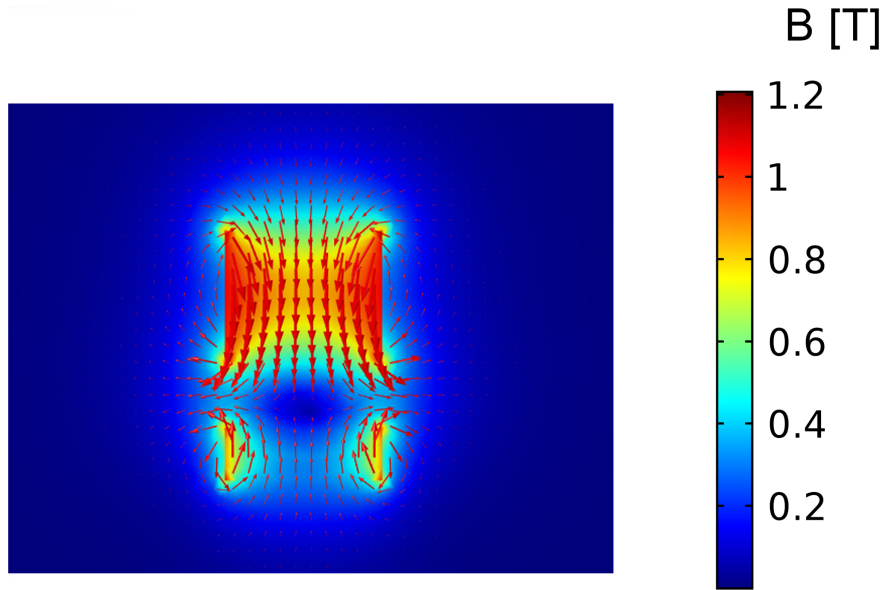


Figura 4.9: Campo magnético e linhas de fluxo referente ao ímã inferior e central a uma distância 5 mm entre eles.

Utilizando a *curve fitting tool* do *MATLAB* foi possível correlacionar os dados obtidos com uma equação exponencial de segunda ordem (Fig. 4.10). A equação obteve uma correlação de 99,98% ($R^2 = 0,999$), o que significa que consegue identificar com excelente exatidão as forças obtidas por simulação do modelo FEM (Eq. 4.1).

Equação aproximada dos resultados obtidos por FEM:

$$Y(x) = ae^{bx} + ce^{dx}; \quad [0 < x \leq d_0 + 4d_0/7] \quad (4.1)$$

$$a = 33,81; \quad b = -244,10; \quad c = 15,87; \quad d = -1306;$$

Modelo empírico baseado em medições experimentais

O uso da *curve fitting tool* do *MATLAB* permitiu encontrar uma equação exponencial de primeira ordem que define o comportamento das forças magnéticas de repulsão medidas experimentalmente com um $R^2 = 0,998$ (Fig. 4.10). Esta equação é definida por:

Equação aproximada dos resultados medidos:

$$Y(x) = ae^{bx}; \quad [0 < x \leq d_0 + 4d_0/7] \quad (4.2)$$

$$a = 31,26; \quad b = -241,60;$$

Comparação entre os diferentes modelos de parametrização

A Fig. 4.10 mostra os comportamentos das forças magnéticas de repulsão em função da distância entre os ímãs das extremidades. Foram realizadas comparações entre os resultados de simulação dos modelos computacionais e os resultados experimentais. O erro máximo e o erro mínimo também foram calculados. Foram comparados os dados entre os resultados de simulação do modelo analítico com integrais de *Bessel* e os resultados experimentais. Foi observada uma correlação de 99,14%, o que mostra uma excelente correspondência entre os resultados. O erro máximo obtido foi de 4,79% e o erro mínimo de 0,0026%. Foi utilizado o mesmo método para comparar os dados entre os resultados do modelo FEM e os resultados experimentais. Foi observada uma correlação de 99,54%. O erro máximo e mínimo observado foi de 4,81% e 0,0073%, respectivamente. O modelo analítico com integrais de *Bessel* foi utilizado no modelo computacional para simular o comportamento do gerador adaptativo.

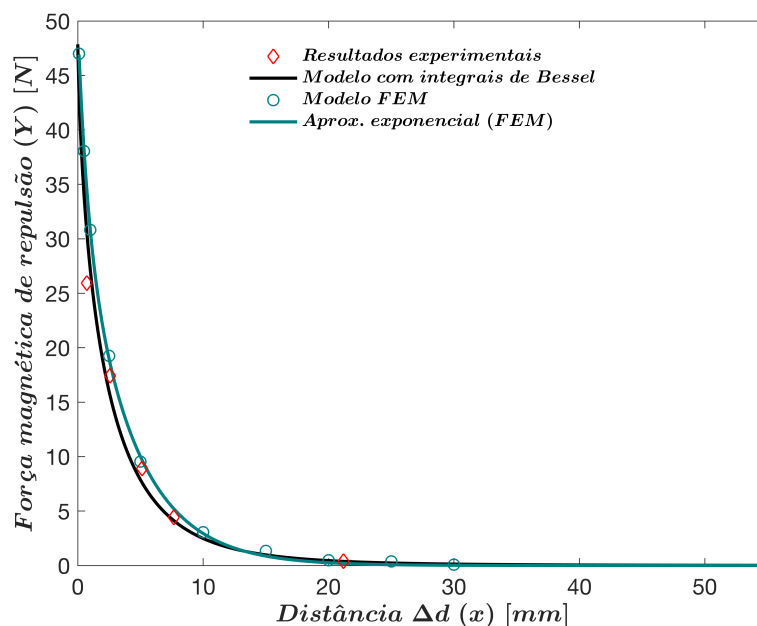


Figura 4.10: Medições experimentais da força magnética de repulsão (a vermelho); Modelo com integrais de *Bessel* (a preto); Modelo FEM (a verde); Aproximação do modelo FEM com uma exponencial de segundo grau (linha verde).

4.2.2 Identificação do coeficiente de acoplamento eletromecânico

Os dados adquiridos experimentalmente com diferentes amplitudes e frequências de excitação permitiram retirar o valor médio do coeficiente de acoplamento eletromecânico. Foi obtido o valor médio de 2,281 Vs/m (Fig. 4.11).

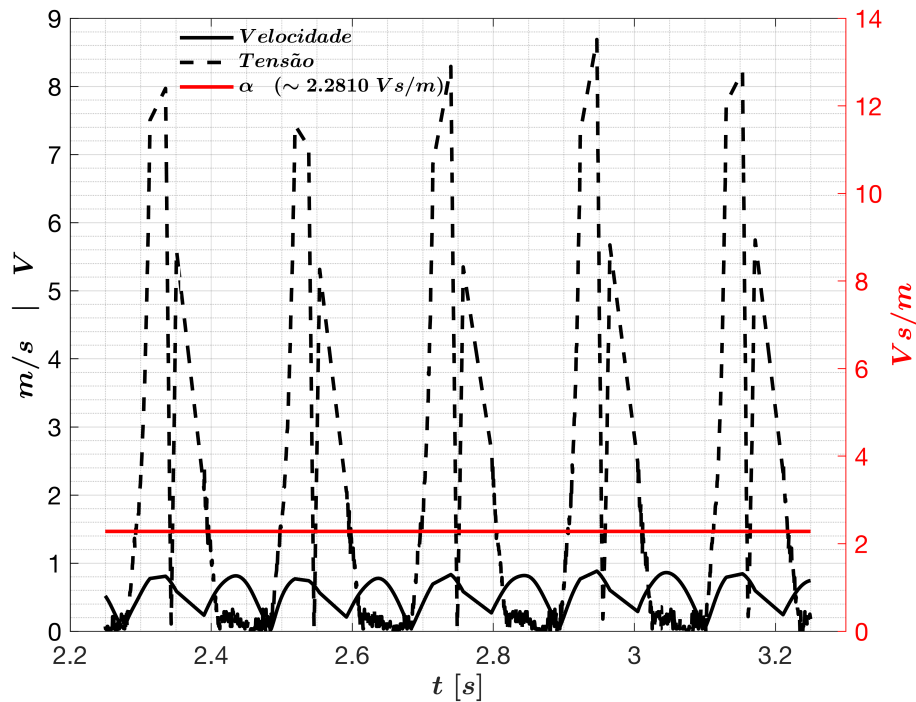


Figura 4.11: A velocidade experimental do íman central (linha contínua preta) e a tensão elétrica de saída (linha tracejada preta); Média do coeficiente de acoplamento eletromecânico (linha vermelha).

4.2.3 Identificação do coeficiente de amortecimento mecânico

O coeficiente de amortecimento mecânico que na simulação obteve uma dinâmica do íman em levitação mais próxima do ensaio experimental foi 0,03 Ns/m. A Fig. 4.12 mostra os resultados do ensaio experimental e da simulação. As diferenças observadas entre as duas dinâmicas poderão estar relacionadas com alguns fatores que foram negligenciados no modelo computacional: a não concentricidade entre o íman em levitação e o íman fixo; os efeitos dinâmicos da força de atrito; os efeitos da não axialidade e da não uniformidade das forças de atrito ao longo do comprimento total da parede interna da estrutura. Todos estes efeitos descritos associados a um comprimento significativo do gerador.

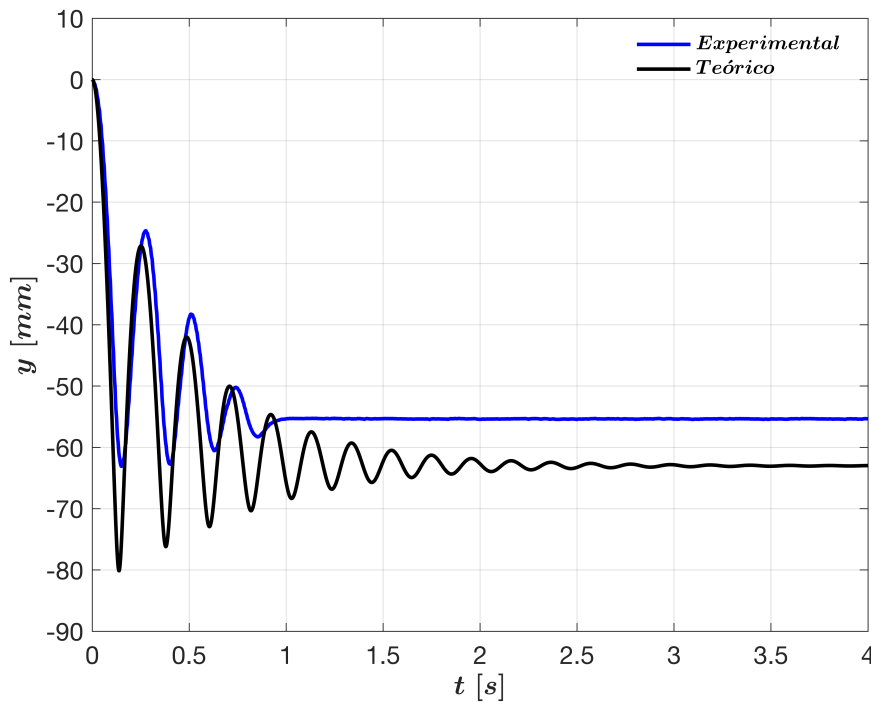


Figura 4.12: Dinâmica do íman em levitação: adquirida experimentalmente (linha azul); adquirida através de simulação (linha preto).

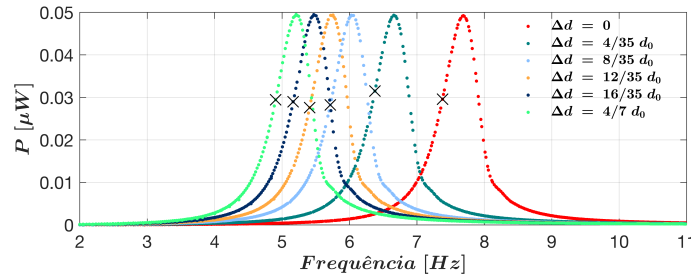
4.3 Resultados da adaptação do curso do gerador

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos através do modelo computacional desenvolvido e foi realizada a identificação da distância entre os ímanes das extremidades que maximiza a potência elétrica obtida pelo gerador eletromagnético para cada uma das frequências e amplitudes de excitação. Esta secção foi dividida em três partes: (1) A primeira parte mostra os resultados de simulação com $R_{carga} = 19,5 \text{ k}\Omega$, para se avaliar o desempenho máximo do gerador; (2) a segunda parte com $R_{carga} = 100 \text{ M}\Omega$ para analisar o comportamento em circuito aberto; (3) a terceira parte foca-se na otimização do curso do gerador para ambas as resistências de carga.

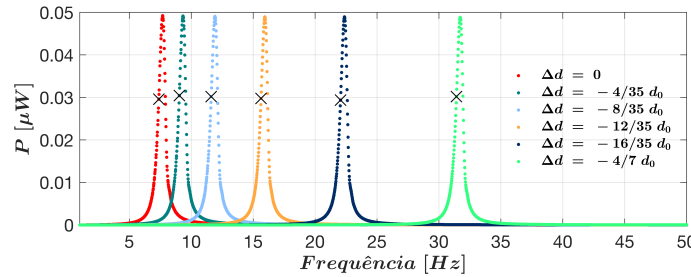
Neste conjunto de figuras foram só colocadas as simulações com a frequência em trajetória ascendente e o ponto máximo alcançável por ambas as trajetórias da frequência. A análise das figuras será realizada relativamente a esse ponto para cada uma das distâncias entre os ímanes das extremidades do gerador eletromagnético.

4.3.1 Desempenho do gerador para a resistência de carga que maximiza a transferência de energia (19,5 k Ω)

Na Fig. 4.13 a potência elétrica máxima atingida foi 31,5 nW com uma distância Δd de $4d_0/35$ mm à frequência de excitação de 6,4 Hz. A menor potência elétrica foi 27,6 nW à frequência de excitação de 5,4 Hz, com uma distância Δd de $12d_0/35$ mm. A frequência mais alta onde foi possível identificar uma distância Δd que consegue maximizar o desempenho do gerador foi 31,4 Hz.



(a)



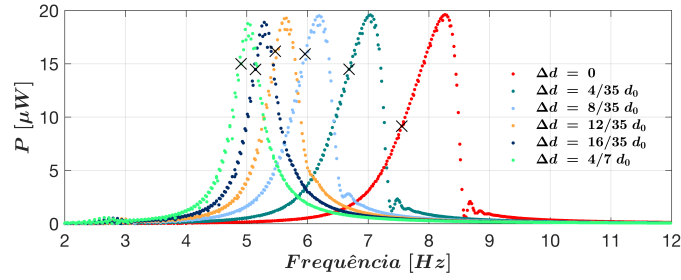
(b)

Figura 4.13: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de $0,1 \text{ m/s}^2$ e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

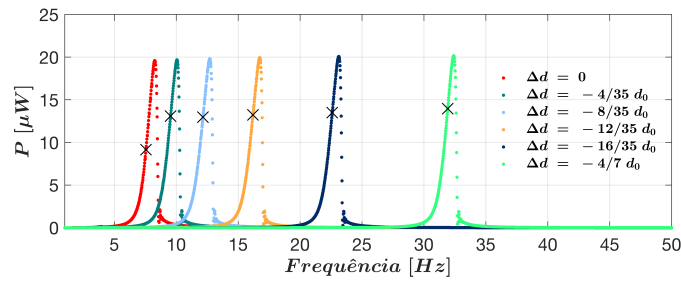
Na Fig. 4.14 a potência elétrica máxima alcançada foi $16 \mu\text{W}$, quando o gerador estava a $5,5 \text{ Hz}$, com uma distância Δd de $12d_0/35$ mm. O menor valor de potência elétrica foi $9,1 \mu\text{W}$, com o gerador na distância Δd de referência a $7,6 \text{ Hz}$.

Para algumas distâncias Δd apareceram comportamentos mais complexos que os restantes. Um desses casos pode ser observado na curva com a distância Δd máxima em que aparecem pontos próximos da curva característica (Fig. 4.15a). No entanto, estes resultados não tiveram influência significativa na captação do ponto máximo.

Na Fig. 4.15 a potência elétrica máxima foi $49,4 \mu\text{W}$ à frequência de excitação de $4,8 \text{ Hz}$, com a distância Δd máxima, enquanto que a potência elétrica mínima foi $23 \mu\text{W}$ a $12,4 \text{ Hz}$, com uma distância Δd de $-8d_0/35$ mm.

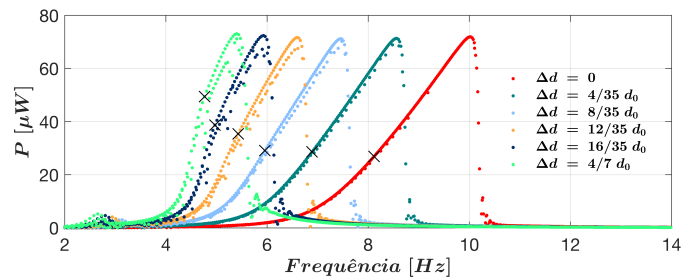


(a)

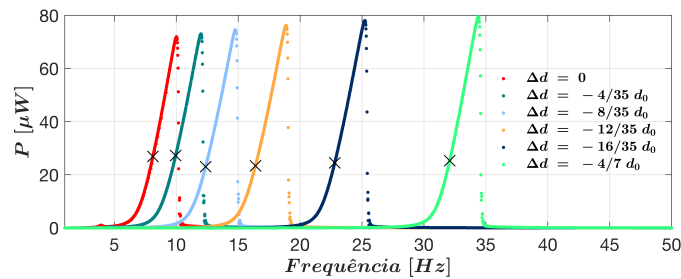


(b)

Figura 4.14: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 2 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.



(a)



(b)

Figura 4.15: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 4 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

A potência elétrica máxima com a amplitude de excitação de 6 m/s^2 foi $64,9 \mu\text{W}$ à frequência de $4,85 \text{ Hz}$, com a distância Δd máxima (Fig. 4.16). Foi observado na Fig. 4.16a um decréscimo da potência elétrica com a diminuição da distância Δd . O menor valor de potência elétrica foi de $34 \mu\text{W}$ à frequência de excitação de $10,1 \text{ Hz}$, com uma distância Δd de $-4d_0/35 \text{ mm}$.

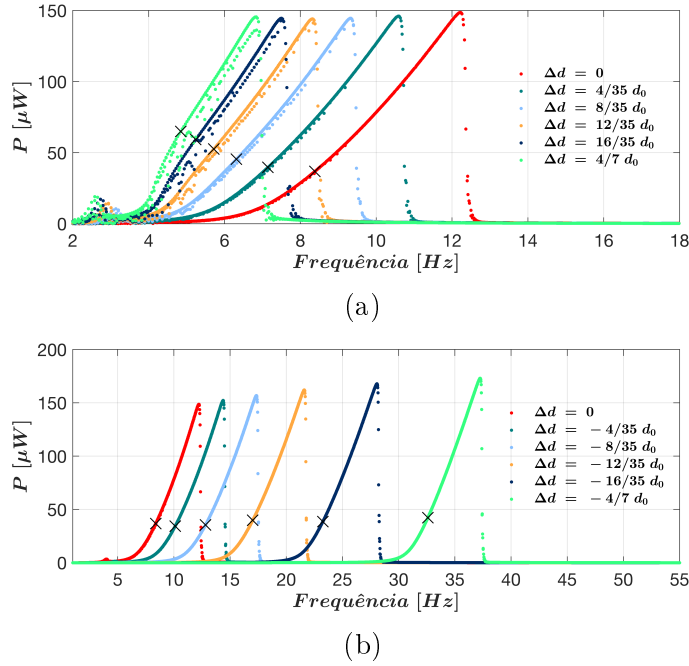


Figura 4.16: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 6 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

Na Fig. 4.17 a potência elétrica máxima foi $84,9 \mu\text{W}$ à frequência de $5,2 \text{ Hz}$, com a distância Δd máxima ($4d_0/7$). Na Fig. 4.17a foi novamente observado um decréscimo da potência elétrica com a diminuição da distância Δd a partir da distância Δd $16d_0/35 \text{ mm}$. O menor valor de potência elétrica foi $47 \mu\text{W}$ com a frequência de excitação de $10,6 \text{ Hz}$ e um Δd de $-4d_0/35 \text{ mm}$ (Fig. 4.17b).

Na Fig. 4.18 a potência elétrica máxima foi $93,5 \mu\text{W}$ com a distância Δd máxima e a frequência de excitação de $5,2 \text{ Hz}$. A potência elétrica mínima foi $54 \mu\text{W}$ a $10,8 \text{ Hz}$ com a distância Δd $-4d_0/35 \text{ mm}$. Ocorreu um decréscimo da potência elétrica com a diminuição da distância Δd a partir da distância Δd máxima até à distância Δd de referência, a partir do qual foi observado um aumento da potência até à distância Δd mínima ($-4d_0/7$).

No geral foi observado que para frequências abaixo dos $9,1 \text{ Hz}$ foram produzidas potências elétricas mais elevadas e que a distância entre ímanes das extremidades deve ser igual ou superior à distância Δd de referência.

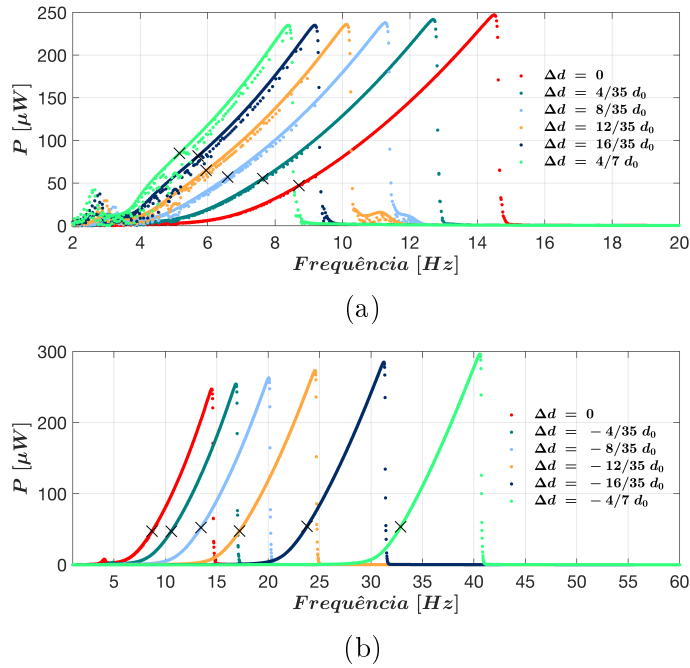


Figura 4.17: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 8 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

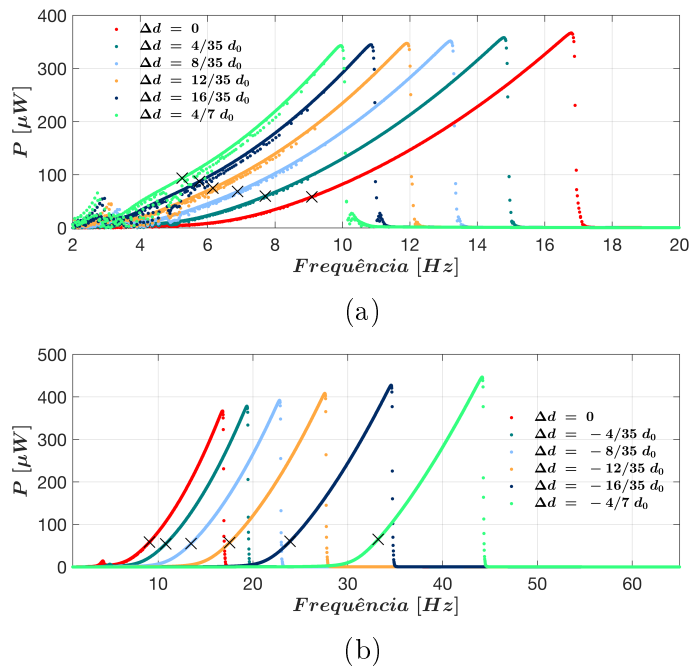
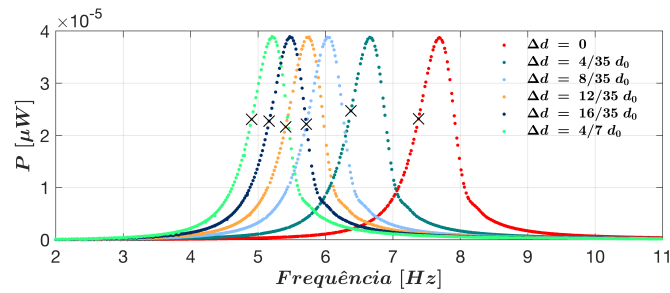


Figura 4.18: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 10 m/s^2 e a R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

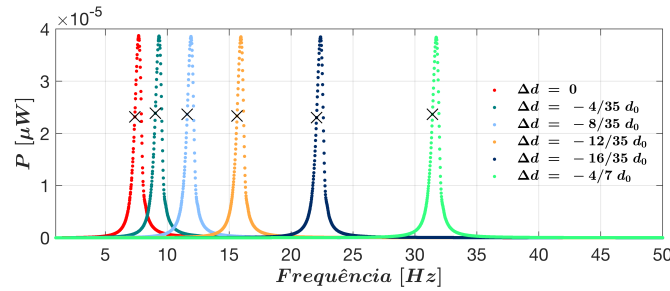
4.3.2 Desempenho do gerador para a resistência de carga de 100 M Ω

Com a resistência de carga mais elevada o sistema vai comportar-se como se de um circuito aberto se tratasse. Isto implica uma corrente muito inferior, fazendo com que o coeficiente de amortecimento elétrico seja igualmente muito pequeno (quase nulo).

Na Fig. 4.19 a potência elétrica máxima foi 24,7 μW à frequência de excitação de 6,4 Hz, com uma distância Δd de $4d_0/35$ mm. A potência elétrica mínima foi 21,6 μW à frequência de 5,4 Hz, com uma distância Δd de $12d_0/35$ mm.



(a)



(b)

Figura 4.19: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de $0,1 \text{ m/s}^2$ e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

Na Fig. 4.20 a potência elétrica máxima foi 13 nW à frequência de 5,5 Hz, com uma distância Δd de $12d_0/35$ mm. A potência mínima observada foi 7 nW à frequência de 7,6 Hz, com a distância Δd de referência. Na Fig. 4.20b acima da frequência de 16 Hz foi observado um ligeiro aumento de potência conforme a diminuição da distância Δd .

Na Fig. 4.21 a potência elétrica máxima atingida foi 38,6 nW à frequência de 4,8 Hz, com Δd máximo. A partir da distância Δd de $12d_0/35$ mm existe um decréscimo da potência até à distância Δd de referência. A Fig. 4.21b mostra uma potência elétrica mínima de 18 nW à frequência de 12,4 Hz, com a distância Δd de $-8d_0/35$ mm.

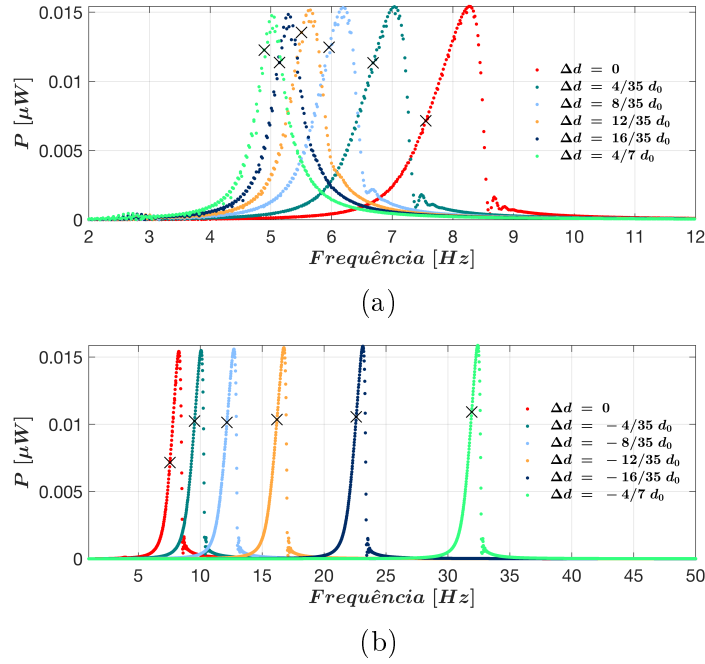


Figura 4.20: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 2 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

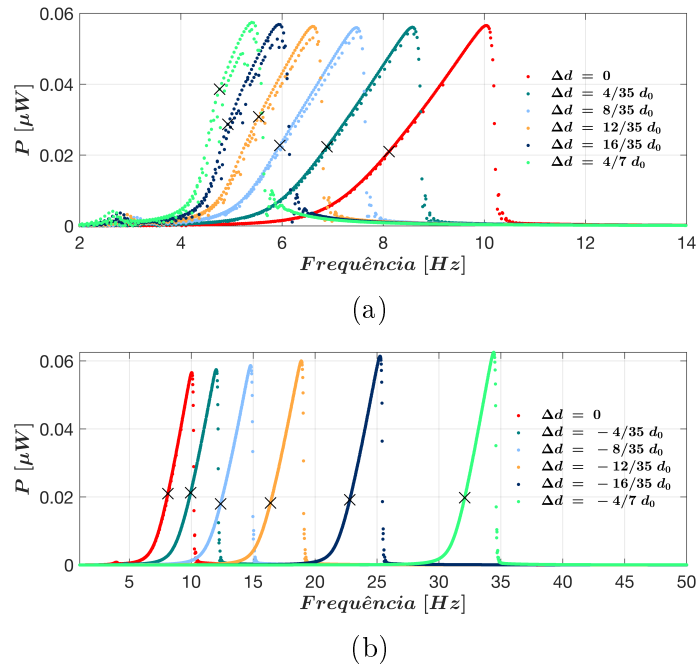


Figura 4.21: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 4 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

Existe uma tendência decrescente conforme a distância Δd diminui (Fig. 4.22a). A potência elétrica máxima foi 50,7 nW à frequência de excitação de 4,8 Hz, com Δd máximo. A potência elétrica mínima alcançada foi 26,7 nW a 10,1 Hz, com a distância Δd de $-4d_0/35$ mm (Fig. 4.22).

A Fig. 4.23 apresentou uma potência elétrica máxima de 65,1 nW a 5,1 Hz, com a distância Δd máxima. A potência elétrica mínima foi 36,7 nW à frequência de 10,6 Hz com uma distância Δd de $-4d_0/35$ mm.

Na Fig. 4.24 a potência elétrica máxima foi 75 nW à frequência de excitação de 5,3 Hz, quando o gerador se encontra com a distância Δd máxima. A potência elétrica mínima foi 42 nW a 10,8 Hz, com uma distância Δd de $-4d_0/35$ mm.

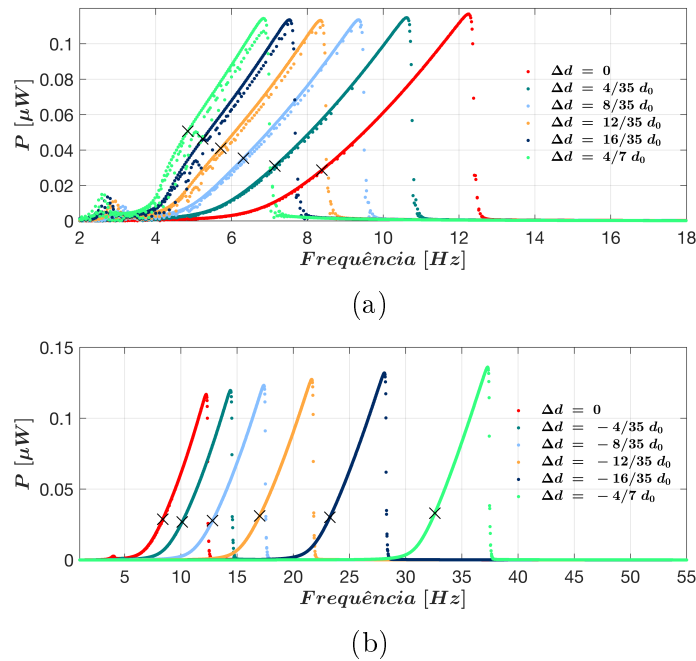
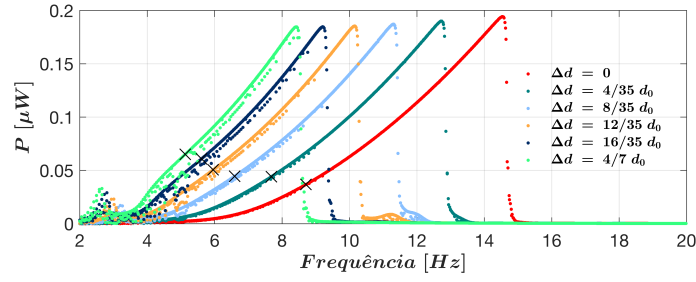
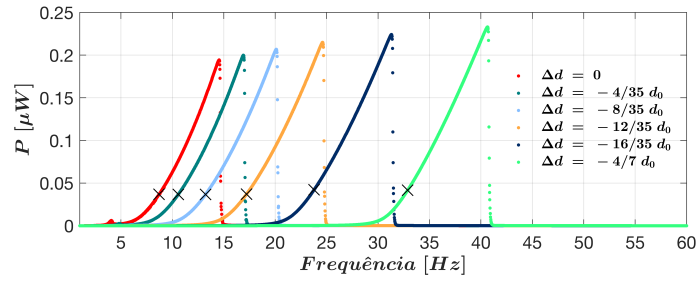


Figura 4.22: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 6 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

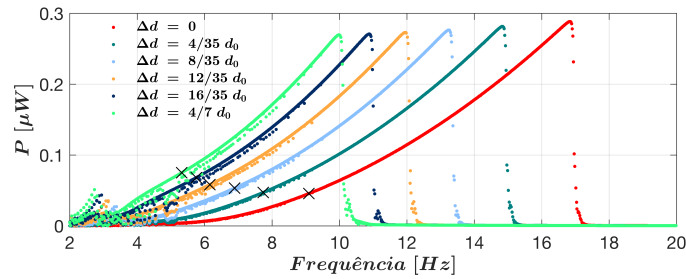


(a)

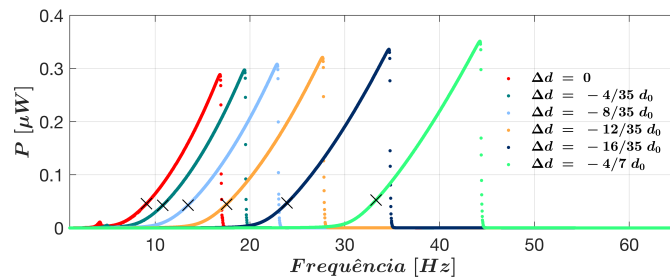


(b)

Figura 4.23: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 8 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.



(a)



(b)

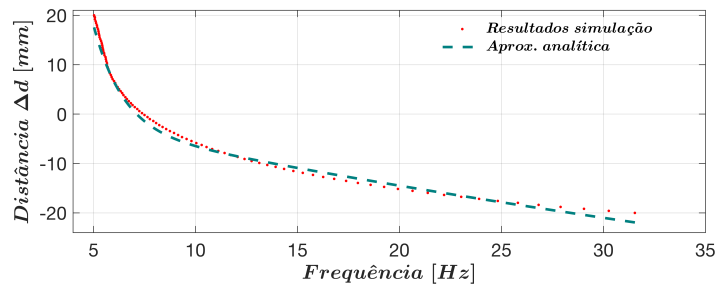
Figura 4.24: Potência elétrica de acordo com a frequência externa para diferentes cursos delimitados do gerador: $0 \leq \Delta d \leq 4d_0/7$ em (a) e $-4d_0/7 \leq \Delta d \leq 0$ em (b). A excitação foi de 10 m/s^2 e a R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

4.3.3 Análise do curso ótimo do gerador eletromagnético adaptativo

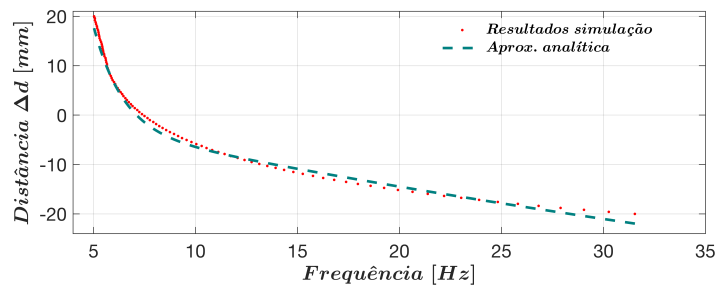
Retirando os pontos máximos para cada um dos cursos simulados (100) em cada uma das amplitudes de excitação, foi possível relacionar a distância entre os ímanes nas extremidades com as frequências e amplitudes de excitação utilizadas com as diferentes resistências de carga. Em cada uma das figuras seguintes está representada a distância Δd ótima para cada uma das frequências para as duas resistências de carga de forma a maximizar o desempenho do gerador. Os resultados mostraram que é possível com recurso a uma aproximação exponencial de segunda ordem obter equações que descrevem qual é o melhor Δd dependendo da amplitude e frequência de excitação. As frequências estão no intervalo entre 4,84 Hz e 33,10 Hz para 19,5 k Ω e entre 4,65 Hz e 33,10 Hz para 100 M Ω advém de que fora desses intervalos não se encontraram frequências onde exista um ponto máximo alcançável por ambas as trajetórias para as amplitudes de excitação utilizadas nestas simulações. Esta análise não está completa, pois não permite concluir qual será o valor de Δd para frequências inferiores a 4,65 Hz. Para realizar o estudo que maximiza o desempenho do gerador para frequências inferiores a 4,65 Hz é necessário um método para identificar qual o melhor comportamento do gerador para as diferentes distâncias Δd para cada amplitude e frequência de excitação. Esse método é idêntico ao utilizado na parte experimental.

Nos modelos utilizados existiram poucas diferenças nas equações exponenciais utilizadas, pelo que se poderá concluir que existirá uma gama de resistências de carga a partir da qual é possível utilizar as mesmas aproximações sem ser necessário recalcular tudo novamente. As aproximações nunca obtiveram um coeficiente de determinação (R^2) abaixo de 99% com coeficientes dentro de um intervalo de confiança de 95%, indicando que os modelos utilizados conseguem explicar os valores observados com as equações obtidas.

Como observado na Fig. 4.31 e Fig. 4.32, uma maior distância Δd é mais adequada quando o gerador se encontra a funcionar em frequências abaixo de 9 Hz. Para frequências acima de 9 Hz a distância Δd deve diminuir conforme o aumento da frequência. O intervalo de frequências (4,65 Hz até 9,1 Hz) em que se obtiveram os pontos máximos para distâncias Δd maiores que a referência foi mais pequeno que quando se diminuiu a distância Δd . Em comparação quando se diminui a distância entre ímanes das extremidades as frequências foram desde 9,1 Hz até 33,10 Hz. Em termos práticos isto implica que para frequências de excitação abaixo dos 9,1 Hz o atuador vai ter de se mover mais vezes para maximizar a potência elétrica produzida do que para frequências acima dessas. Nas figuras foi observada a ocorrência de zonas em que existem cruzamentos e sobreposições para diferentes amplitudes de excitação. Isso mostrou que existem frequências em que a amplitude de excitação pode mudar sem que seja necessário alterar a distância Δd .

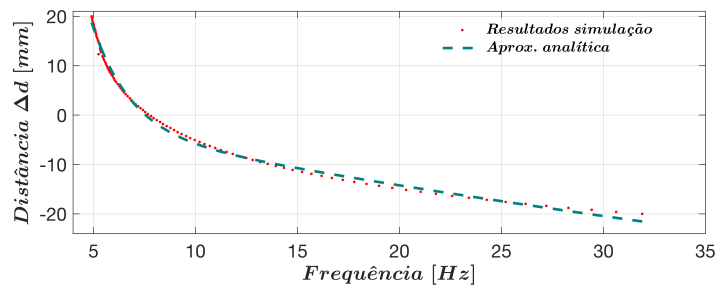


(a)

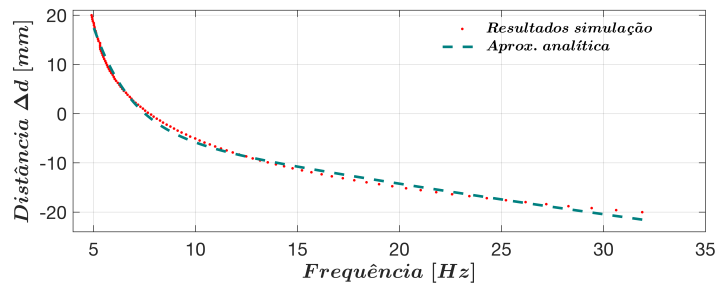


(b)

Figura 4.25: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de $0,1 \text{ m/s}^2$.

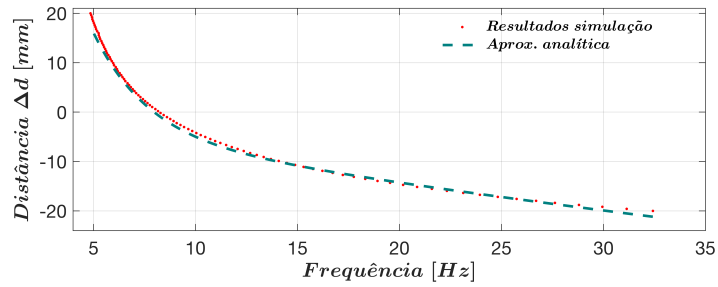


(a)

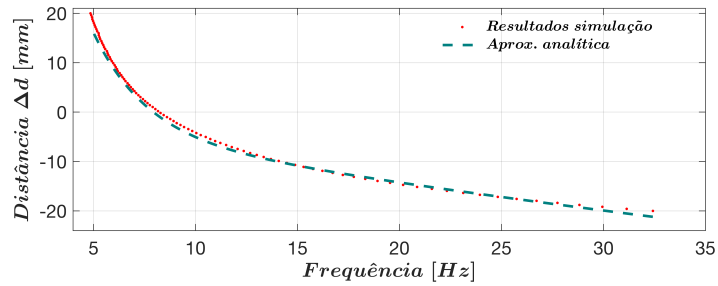


(b)

Figura 4.26: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de 2 m/s^2 .

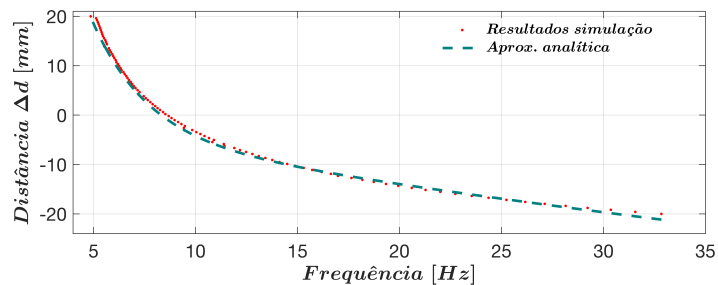


(a)

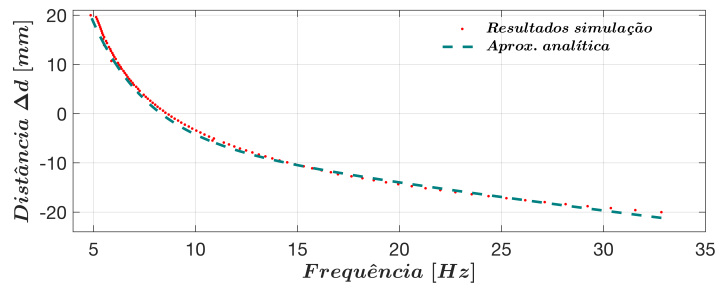


(b)

Figura 4.27: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de 4 m/s^2 .

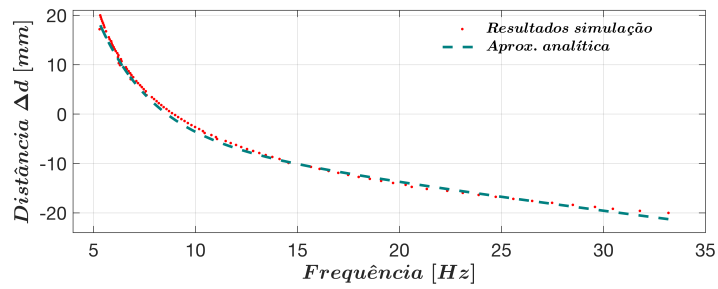


(a)

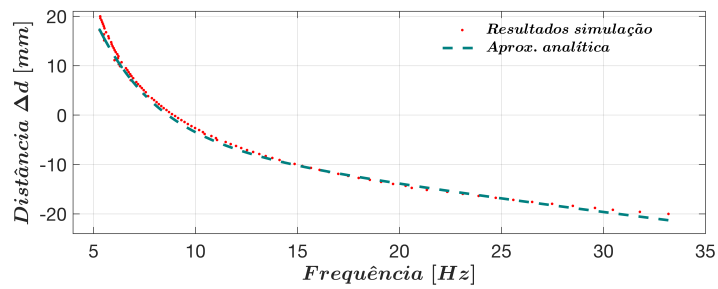


(b)

Figura 4.28: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de 6 m/s^2 .

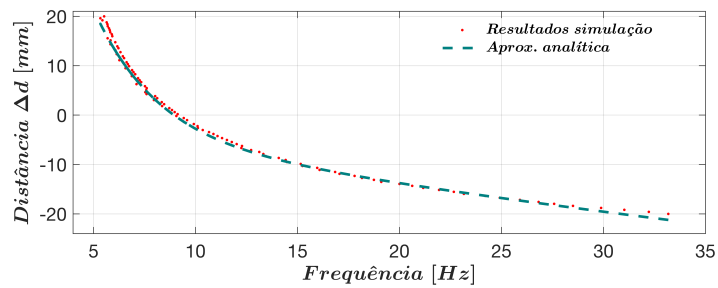


(a)

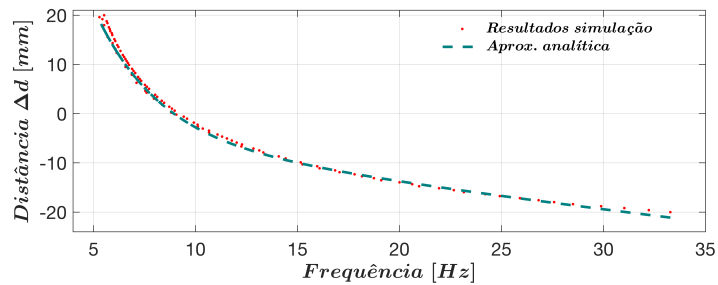


(b)

Figura 4.29: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de 8 m/s^2 .



(a)



(b)

Figura 4.30: Curso ótimo para diferentes frequências com R_{carga} de $19,5 \text{ k}\Omega$ em (a) e R_{carga} de $100 \text{ M}\Omega$ em (b). A excitação foi de 10 m/s^2 .

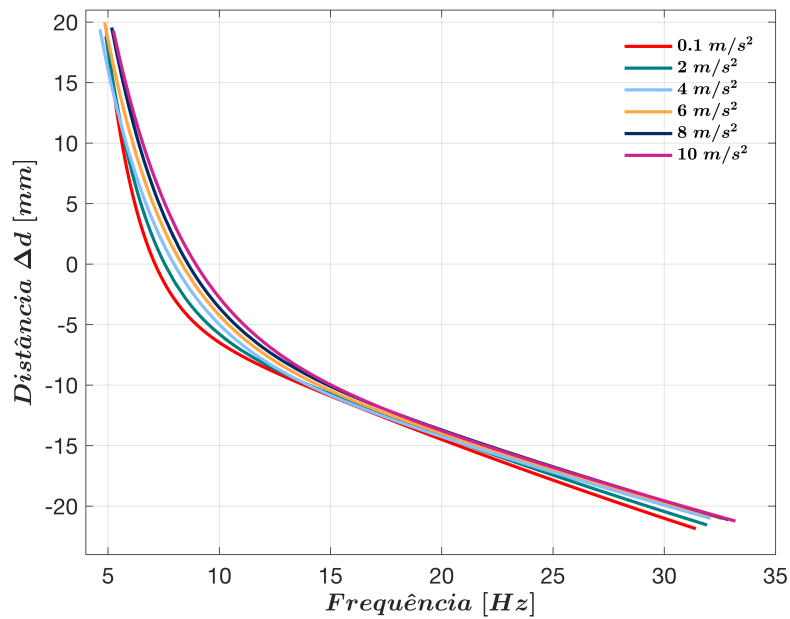


Figura 4.31: Curso ótimo para as diferentes frequências e amplitudes de excitação. A R_{carga} foi de $19,5 \text{ k}\Omega$.

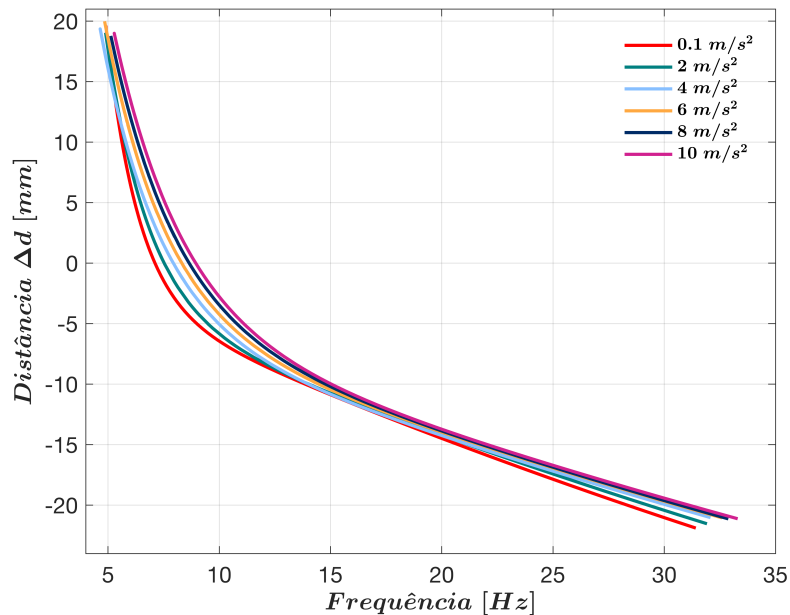


Figura 4.32: Curso ótimo para as diferentes frequências e amplitudes de excitação. A R_{carga} foi de $100 \text{ M}\Omega$.

Foi observada uma função analítica que permite descrever as várias aproximações realizadas para cada uma das amplitudes de excitação e resistências de carga

(Eq. 4.3). Os diferentes coeficientes referentes a essa equação foram colocados na Tab. 4.1.

$$\Delta d_{\text{ótimo}}(f) = c_1 e^{c_2 f} + c_3 e^{c_4 f} \quad (4.3)$$

Tabela 4.1: Parâmetros da equação que descreve o curso ótimo para uma determinada amplitude de excitação^(c)

A_e, R_{carga}	c_1	c_2	c_3	c_4	R^2
0,1 m/s ² , 19,5 kΩ	0,690	-0,698	0,071	0,013	0,996
0,1 m/s ² , 100 MΩ	0,717	-0,706	0,071	0,013	0,996
2 m/s ² , 19,5 kΩ	0,303	-0,533	0,071	0,012	0,997
2 m/s ² , 100 MΩ	0,314	-0,540	0,071	0,012	0,997
4 m/s ² , 19,5 kΩ	0,139	-0,379	0,069	0,011	0,997
4 m/s ² , 100 MΩ	0,143	-0,386	0,069	0,011	0,997
6 m/s ² , 19,5 kΩ	0,147	-0,371	0,069	0,011	0,996
6 m/s ² , 100 MΩ	0,148	-0,373	0,069	0,011	0,997
8 m/s ² , 19,5 kΩ	0,167	-0,379	0,069	0,011	0,996
8 m/s ² , 100 MΩ	0,138	-0,347	0,069	0,011	0,999
10 m/s ² , 19,5 kΩ	0,135	-0,330	0,069	0,011	0,999
10 m/s ² , 100 MΩ	0,134	-0,329	0,069	0,010	0,999

^(c) Terminologia: A_e - Amplitude da excitação mecânica externa; R^2 - Coeficiente de determinação.

Capítulo 5

Discussão e conclusão

5.1 Discussão

O uso de geradores eletromagnéticos com arquitetura por levitação magnética representam um imenso potencial no que traduz a conversão de movimento em energia elétrica. A busca por energias renováveis com baixo custo e manutenção reduzida fazem com que este tipo de geradores com uma arquitetura muito simples, tanto mecânica como elétrica, seja uma excelente opção visto as suas imensas vantagens. A eficiência na geração de energia autónoma deste tipo de gerador é por isso de enorme importância tanto científica como societal. Estes geradores podem ser aplicados para ajudar numa variedade de funções, desde implementações em micro-eletrónica, por exemplo, dispositivos biomédicos, MEMS (sistemas micro eletromecânicos), sensores, atuadores, ou até ao nível macro, por exemplo para fazer a transdução da energia das ondas em energia elétrica. Este tipo de sistemas é uma alternativa ao uso de baterias e outras fontes de energia convencionais não renováveis.

O presente estudo permitiu através de um aparato experimental desenvolvido aplicar uma excitação mecânica exterior no protótipo do gerador eletromagnético com o intuito de demonstrar que a variação do curso do gerador tem um impacto significativo no desempenho aquando da variação da excitação mecânica exterior. O aparato desenvolvido não permitiu uma excitação exterior de amplitude constante nos ensaios com diferentes frequências. Não obstante, as simulações feitas com diferentes acelerações demonstraram o potencial deste conceito de gerador adaptativo para a otimização do seu desempenho *a posteriori*, aquando da sua operação em ambientes em que ocorrem variações significativas nas dinâmicas da excitação exterior. Nenhum estudo realizado até à data propôs a metodologia aqui apresentada. Os autores focam-se essencialmente na modelação das dinâmicas mecânicas e elétricas dos geradores (utilizando métodos analíticos, semi-analíticos, empíricos e FEM) e na otimização de desempenhos a partir da alteração de algumas características geométricas, nomeadamente a geometria dos ímanes e do gerador, assim como o número de ímanes em levitação, o número de enrolamentos, entre outras. No entanto, ainda não foram realizadas otimizações multivariável *a*

priori da construção do gerador (incluindo a otimização da geometria do sistema para diferentes resistências de carga), nem uma otimização da estrutura dos geradores *a posteriori* (durante o seu funcionamento) que permita a obtenção dos melhores desempenhos ainda. A partir da metodologia proposta é possível otimizar uma das características dos geradores (o seu curso) para uma grande variedade de excitações, sem que para isso haja necessidade de sistemas mecânicos complexos e mantendo um design adaptativo com reduzida manutenção. O sistema adaptativo utilizado no sistema experimental desenvolvido é de simples implementação e tem um custo associado reduzido. Contudo, o modelo computacional desenvolvido carece de algumas limitações: tanto o campo magnético como o coeficiente eletromecânico foram considerados constantes, o que implica que o coeficiente de amortecimento elétrico seja modelado como estático. Por fim, a indutância do enrolamento foi igualmente considerada constante e o modelo de atrito aplicado era demasiado simplificado. Em termos computacionais o uso de métodos numéricos exige um custo computacional mais elevado comparativamente com métodos analíticos, o que limita a otimização multivariável *a priori* e *a posteriori*.

5.2 Conclusão e trabalhos futuros

Os resultados obtidos, tanto experimentalmente, como computacionalmente, demonstraram aumentos significativos de desempenho de um gerador eletromagnético com arquitetura em levitação magnética. A identificação das melhores distâncias entre ímanes para uma gama significativa de excitações e frequências foi realizada. Os resultados mostraram para ambas as resistências de carga que existe um conjunto de equações exponenciais de segunda ordem que permitem conforme a amplitude da excitação exterior obter a distância ótima entre os ímanes fixos para uma determinada gama de frequências. Relativamente às limitações ao nível do modelo computacional, as variáveis consideradas constantes são importantes para o desenvolvimento de um modelo que traduza a dinâmica do sistema de forma precisa, pelo que o desenvolvimento de um modelo mais complexo tendo em conta a dinâmica elétrica deverá ser criado. Este estudo demonstra o conceito de gerador eletromagnético instrumentado e a sua potencialidade para otimizar o desempenho global deste tipo de geradores.

O desenvolvimento deste conceito de gerador adaptativo muito provavelmente exigirá que no futuro sejam realizados os seguintes trabalhos:

1. Identificação do curso ótimo do gerador eletromagnético adaptativo para frequências inferiores a 4,65 Hz;
2. Desenvolvimento um novo gerador com guiamento do íman central. Este avanço permitirá uma diminuição do atrito, assim como um melhor estudo da dinâmica do sistema proporcionando uma análise mais completa desta ferramenta de otimização;

3. Desenvolvimento de um aparato experimental que permita a realização de ensaios com amplitudes fixas e frequências até menos 30 Hz;
4. Validação experimental dos resultados de simulação obtidos neste trabalho;
5. Otimização multivariável dos geradores;
6. Modelação do sistema de transdução utilizando redes artificiais neuronais;
7. Uso de redes artificiais neuronais para identificar Δd para diferentes configurações de geradores e diferentes excitações, nomeadamente não periódicas.

Bibliografia

- [1] M. Q. Le, J.-F. Capsal, M. Lallart, Y. Hebrard, A. Van Der Ham, N. Reffe, L. Geynet, P.-J. Cottinet, Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications, *Progress in Aerospace Sciences* 79 (2015) 147–157.
- [2] A. Abdelkefi, Aeroelastic energy harvesting: A review, *International Journal of Engineering Science* 100 (2016) 112–135.
- [3] A. Harb, Energy harvesting: State-of-the-art, *Renewable Energy* 36 (10) (2011) 2641–2654.
- [4] C. Bowen, H. Kim, P. Weaver, S. Dunn, Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications, *Energy & Environmental Science* 7 (1) (2014) 25–44.
- [5] A. R. M. Siddique, S. Mahmud, B. Van Heyst, A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms, *Energy Conversion and Management* 106 (2015) 728–747.
- [6] C. M. Saravia, J. M. Ramírez, C. D. Gatti, A hybrid numerical-analytical approach for modeling levitation based vibration energy harvesters, *Sensors and Actuators A: Physical* 257 (2017) 20–29.
- [7] W. Wang, J. Cao, N. Zhang, J. Lin, W.-H. Liao, Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: Design, modeling and experiments, *Energy Conversion and Management* 132 (2017) 189–197.
- [8] A. Dewan, S. U. Ay, M. N. Karim, H. Beyenal, Alternative power sources for remote sensors: A review, *Journal of Power Sources* 245 (2014) 129–143.
- [9] S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement science and technology* 17 (12) (2006) R175.
- [10] E. Koukharenko, S. Beeby, M. Tudor, N. White, T. O'Donnell, C. Saha, S. Kulkarni, S. Roy, Microelectromechanical systems vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications, *Microsystem technologies* 12 (10-11) (2006) 1071–1077.

-
- [11] P. Wang, K. Tanaka, S. Sugiyama, X. Dai, X. Zhao, J. Liu, A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on mems technology, *Microsystem technologies* 15 (6) (2009) 941–951.
- [12] J. A. Paradiso, T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *IEEE Pervasive computing* (1) (2005) 18–27.
- [13] Z. Wu, J. Tang, X. Zhang, Z. Yu, An energy harvesting bracelet, *Applied Physics Letters* 111 (1) (2017) 013903.
- [14] A. Khaligh, P. Zeng, C. Zheng, Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies – state of the art, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (3) (2009) 850–860.
- [15] X.-F. Teng, Y.-T. Zhang, C. C. Poon, P. Bonato, Wearable medical systems for p-health, *IEEE reviews in Biomedical engineering* 1 (2008) 62–74.
- [16] M. P. S. Dos Santos, J. A. Ferreira, J. A. Simões, R. Pascoal, J. Torrão, X. Xue, E. P. Furlani, Magnetic levitation-based electromagnetic energy harvesting: a semi-analytical non-linear model for energy transduction, *Scientific reports* 6 (2016) 18579.
- [17] J.-M. Kim, M.-M. Koo, J.-H. Jeong, K. Hong, I.-H. Cho, J.-Y. Choi, Design and analysis of tubular permanent magnet linear generator for small-scale wave energy converter, *AIP Advances* 7 (5) (2017) 056630.
- [18] I. Shahosseini, K. Najafi, Cylindrical halbach magnet array for electromagnetic vibration energy harvesters, in: 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2015, pp. 1051–1054.
- [19] H. Alemzadeh, R. K. Iyer, Z. Kalbarczyk, J. Raman, Analysis of safety-critical computer failures in medical devices, *IEEE Security & Privacy* 11 (4) (2013) 14–26.
- [20] B. K. Sovacool, The intermittency of wind, solar, and renewable electricity generators: Technical barrier or rhetorical excuse?, *Utilities Policy* 17 (3-4) (2009) 288–296.
- [21] M. Albadi, E. El-Saadany, Overview of wind power intermittency impacts on power systems, *Electric power systems research* 80 (6) (2010) 627–632.
- [22] S. Larsson, D. Fantazzini, S. Davidsson, S. Kullander, M. Höök, Reviewing electricity production cost assessments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014) 170–183.
- [23] D. Elliott, A balancing act for renewables, *Nature Energy* 1 (2016) 15003.

-
- [24] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung, A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Sensors and Actuators A: Physical* 201 (2013) 134–140.
- [25] M. Li, X. Jing, Novel tunable broadband piezoelectric harvesters for ultralow-frequency bridge vibration energy harvesting, *Applied Energy* 255 (2019) 113829.
- [26] D. F. Berdy, P. Srisungsitthisunti, B. Jung, X. Xu, J. F. Rhoads, D. Peroulis, Low-frequency meandering piezoelectric vibration energy harvester, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 59 (5) (2012) 846–858.
- [27] H. S. Kim, J.-H. Kim, J. Kim, A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, *International journal of precision engineering and manufacturing* 12 (6) (2011) 1129–1141.
- [28] S. P. Beeby, R. Torah, M. Tudor, P. Glynn-Jones, T. O’donnell, C. Saha, S. Roy, A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting, *Journal of Micromechanics and microengineering* 17 (7) (2007) 1257.
- [29] A. Nammari, S. Doughty, D. Savage, L. Weiss, A. Jaganathan, H. Bardaweel, Design and analysis of a small-scale magnetically levitated energy harvester utilizing oblique mechanical springs, *Microsystem Technologies* 23 (10) (2017) 4645–4657.
- [30] M. Gao, Y. Wang, Y. Wang, P. Wang, Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation, *Applied Energy* 220 (2018) 856–875.
- [31] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, J. H. Lang, Vibration-to-electric energy conversion, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 9 (1) (2001) 64–76.
- [32] S. Roundy, P. K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer communications* 26 (11) (2003) 1131–1144.
- [33] A. Varpula, S. J. Laakso, T. Havia, J. Kyynäräinen, M. Prunnila, Harvesting vibrational energy using material work functions, *Scientific reports* 4 (2014) 6799.
- [34] Z. L. Wang, T. Jiang, L. Xu, Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks, *Nano Energy* 39 (2017) 9–23.
- [35] Z. Zhang, J. He, T. Wen, C. Zhai, J. Han, J. Mu, W. Jia, B. Zhang, W. Zhang, X. Chou, et al., Magnetically levitated-triboelectric nanogenerator as a self-powered vibration monitoring sensor, *Nano Energy* 33 (2017) 88–97.

-
- [36] J. P. Tarelho, M. P. S. dos Santos, J. A. Ferreira, A. Ramos, S. Kopyl, S. O. Kim, S. Hong, A. Kholkin, Graphene-based materials and structures for energy harvesting with fluids—a review, *Materials Today* 21 (10) (2018) 1019–1041.
- [37] P. Carneiro, M. P. S. dos Santos, A. Rodrigues, J. A. Ferreira, J. A. Simoes, A. T. Marques, A. L. Kholkin, Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: a review, *Applied Energy* 260 (2019) 114191.
- [38] D. Berdy, D. Valentino, D. Peroulis, Kinetic energy harvesting from human walking and running using a magnetic levitation energy harvester, *Sensors and Actuators A: Physical* 222 (2015) 262–271.
- [39] M. Geisler, S. Boisseau, M. Perez, P. Gasnier, J. Willemin, I. Ait-Ali, S. Perraud, Human-motion energy harvester for autonomous body area sensors, *Smart Materials and Structures* 26 (3) (2017) 035028.
- [40] P. M. R. Carneiro, Architecture optimization of electromagnetic energy harvesting, Tese de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2018.
- [41] P. Constantinou, P. Mellor, P. Wilcox, A model of a magnetically sprung vibration generator for power harvesting applications, in: *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International*, Vol. 1, IEEE, 2007, pp. 725–730.
- [42] P. Constantinou, P. H. Mellor, P. D. Wilcox, A magnetically sprung generator for energy harvesting applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 17 (3) (2012) 415–424.
- [43] A. R. M. Foisal, C. Hong, G.-S. Chung, Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever, *Sensors and Actuators A: Physical* 182 (2012) 106–113.
- [44] D. Berdy, D. Valentino, D. Peroulis, Design and optimization of a magnetically sprung block magnet vibration energy harvester, *Sensors and actuators A: Physical* 218 (2014) 69–79.
- [45] H. Liu, S. Gudla, F. A. Hassani, C. H. Heng, Y. Lian, C. Lee, Investigation of the nonlinear electromagnetic energy harvesters from hand shaking, *IEEE Sensors Journal* 15 (4) (2014) 2356–2364.
- [46] K. Kecik, A. Mitura, S. Lenci, J. Warminski, Energy harvesting from a magnetic levitation system, *International Journal of Non-linear Mechanics* 94 (2017) 200–206.

- [47] C. Saha, T. O'donnell, N. Wang, P. McCloskey, Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, *Sensors and Actuators A: Physical* 147 (1) (2008) 248–253.
- [48] E. Dallago, M. Marchesi, G. Venchi, Analytical model of a vibrating electromagnetic harvester considering nonlinear effects, *IEEE Transactions on Power Electronics* 25 (8) (2010) 1989–1997.
- [49] M. Masoumi, Y. Wang, Repulsive magnetic levitation-based ocean wave energy harvester with variable resonance: Modeling, simulation and experiment, *Journal of Sound and Vibration* 381 (2016) 192–205.
- [50] B. Mann, N. Sims, Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation, *Journal of Sound and Vibration* 319 (1-2) (2009) 515–530.
- [51] E. Bonisoli, A. Canova, F. Freschi, S. Moos, M. Repetto, S. Tornincasa, Dynamic simulation of an electromechanical energy scavenging device, *IEEE Transactions on Magnetics* 46 (8) (2010) 2856–2859.
- [52] R. Morais, N. M. Silva, P. M. Santos, C. M. Frias, J. A. Ferreira, A. M. Ramos, J. A. Simões, J. M. Baptista, M. C. Reis, Double permanent magnet vibration power generator for smart hip prosthesis, *Sensors and Actuators A: Physical* 172 (1) (2011) 259–268.
- [53] X. Yang, B. Zhang, J. Li, Y. Wang, Model and experimental research on an electromagnetic vibration-powered generator with annular permanent magnet spring, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 22 (3) (2011) 5201504–5201504.
- [54] D. J. Apo, S. Priya, High power density levitation-induced vibration energy harvester, *Energy Harvesting and Systems* 1 (1-2) (2014) 79–88.
- [55] Q. Zhang, Y. Wang, E. S. Kim, Power generation from human body motion through magnet and coil arrays with magnetic spring, *Journal of Applied Physics* 115 (6) (2014) 064908.
- [56] M. N. Struwig, R. Wolhuter, T. Niesler, Nonlinear model and optimization method for a single-axis linear-motion energy harvester for footstep excitation, *Smart Materials and Structures* 27 (12) (2018) 125007.
- [57] K. Fan, Y. Zhang, H. Liu, M. Cai, Q. Tan, A nonlinear two-degree-of-freedom electromagnetic energy harvester for ultra-low frequency vibrations and human body motions, *Renewable energy* 138 (2019) 292–302.
- [58] Igus (consulted in 22-09-2019).
URL <https://www.igus.pt>

- [59] Botnroll (consultado em 20-10-2019).
URL <https://www.botnroll.com>
- [60] Microsonic (consultado em 20-10-2019).
URL <https://www.microsonic.de>
- [61] FESTO (consultado em 20-10-2019).
URL https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/ADN_ENUS.PDF
- [62] FESTO (consultado em 20-10-2019).
URL https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_enus/PDF/US/ADN_ENUS.PDF
- [63] dSPACE (consultado em 20-10-2019).
URL <https://www.dspace.com>
- [64] J. Van Deun, R. Cools, Integrating products of bessel functions with an additional exponential or rational factor, *Computer Physics Communications* 178 (8) (2008) 578–590.
- [65] COMSOL (consultado em 20-01-2019).
URL <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

Apêndices

Apêndice A

Desenhos do projeto do gerador eletromagnético

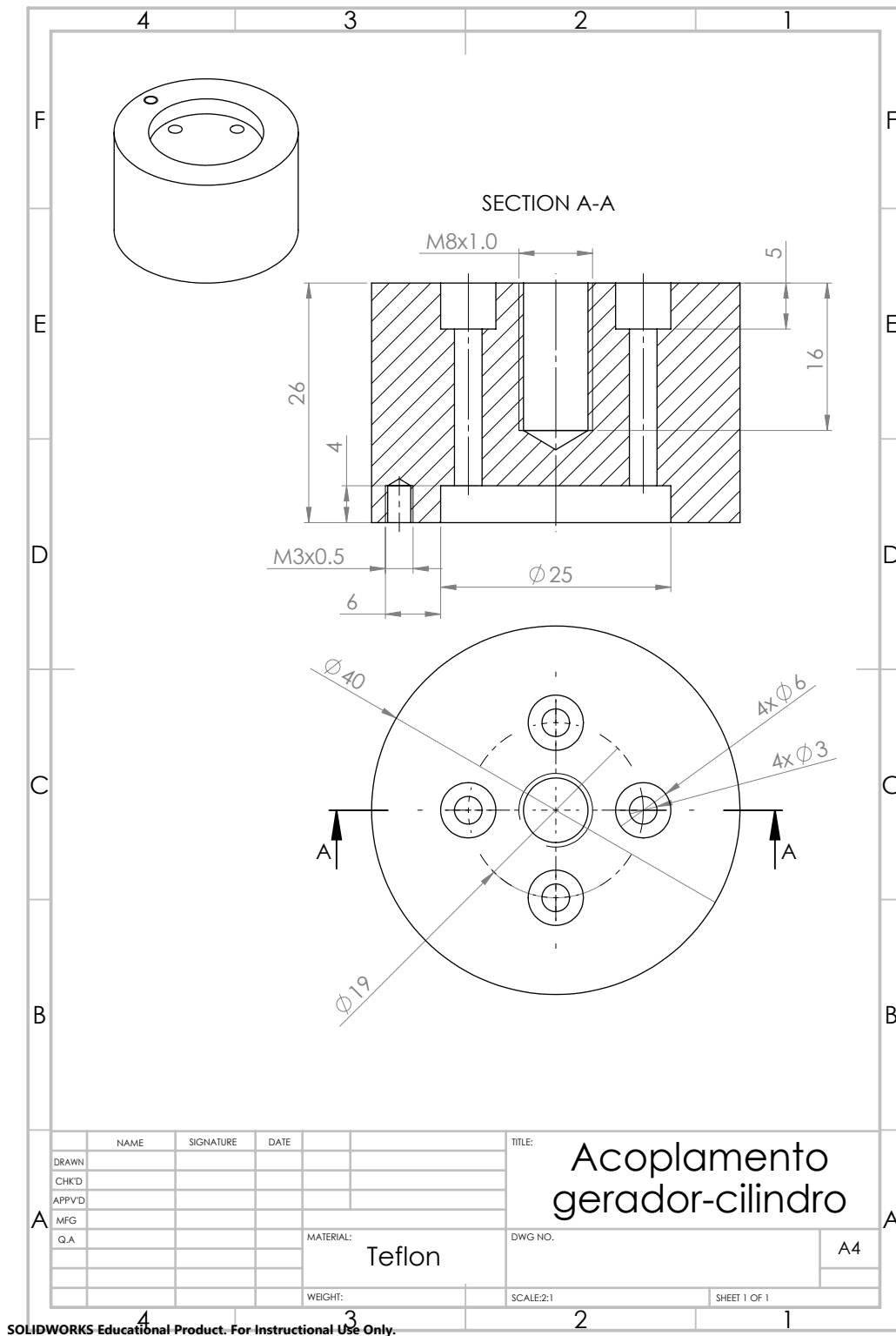


Figura A.1: Acoplamento do gerador ao cilindro pneumático.

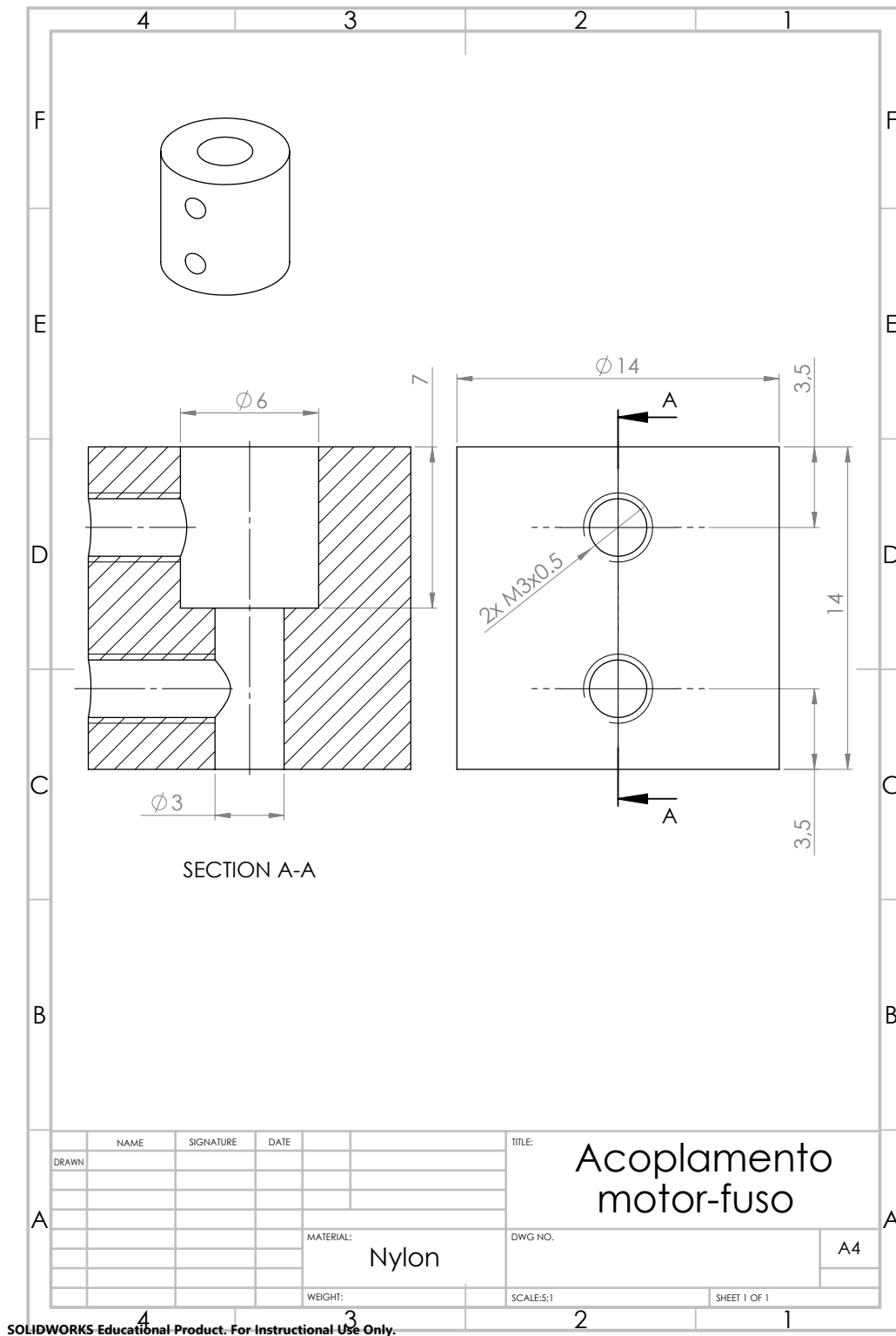


Figura A.2: Acoplamento do motor de passo ao fuso.

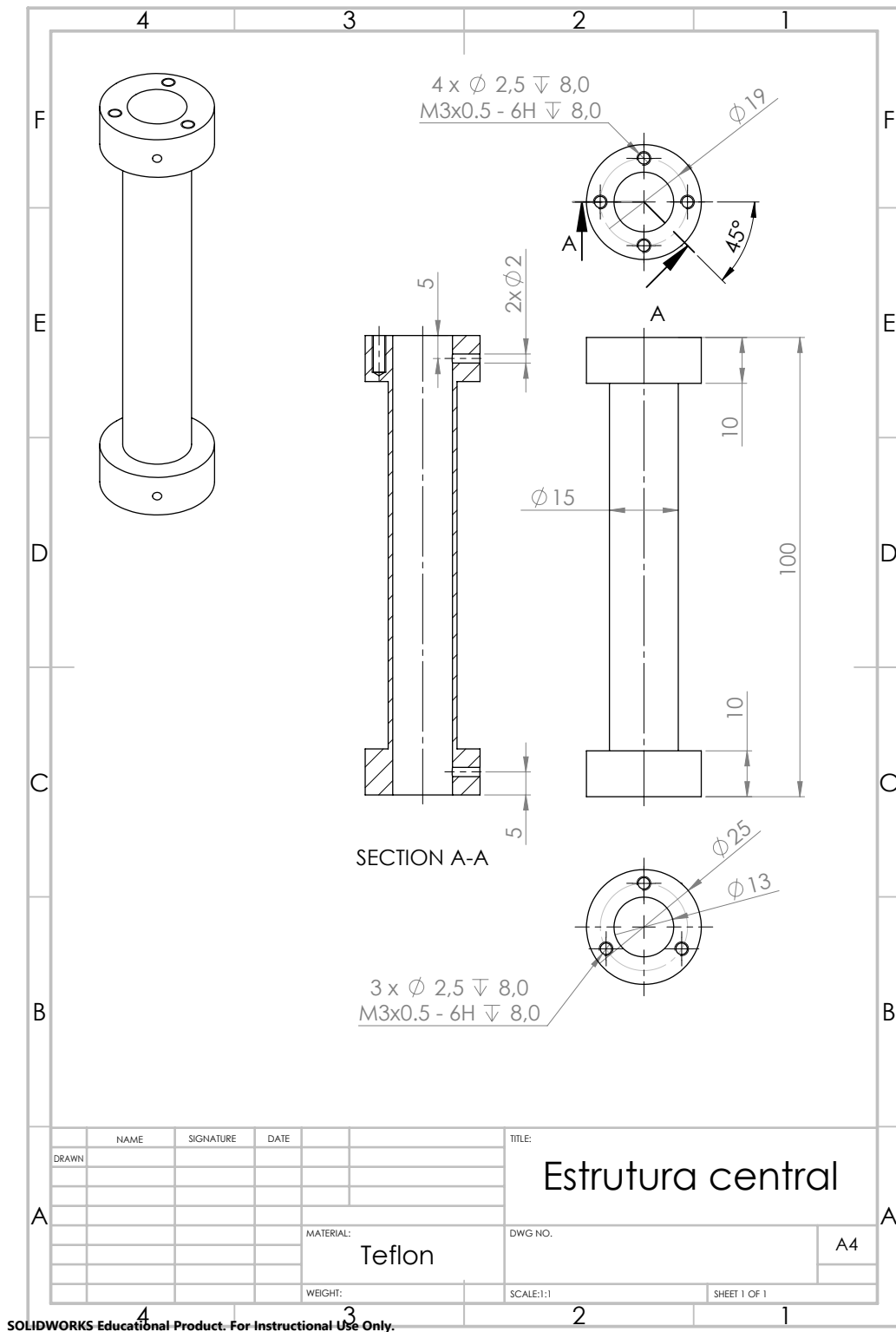


Figura A.3: Estrutura central do gerador.

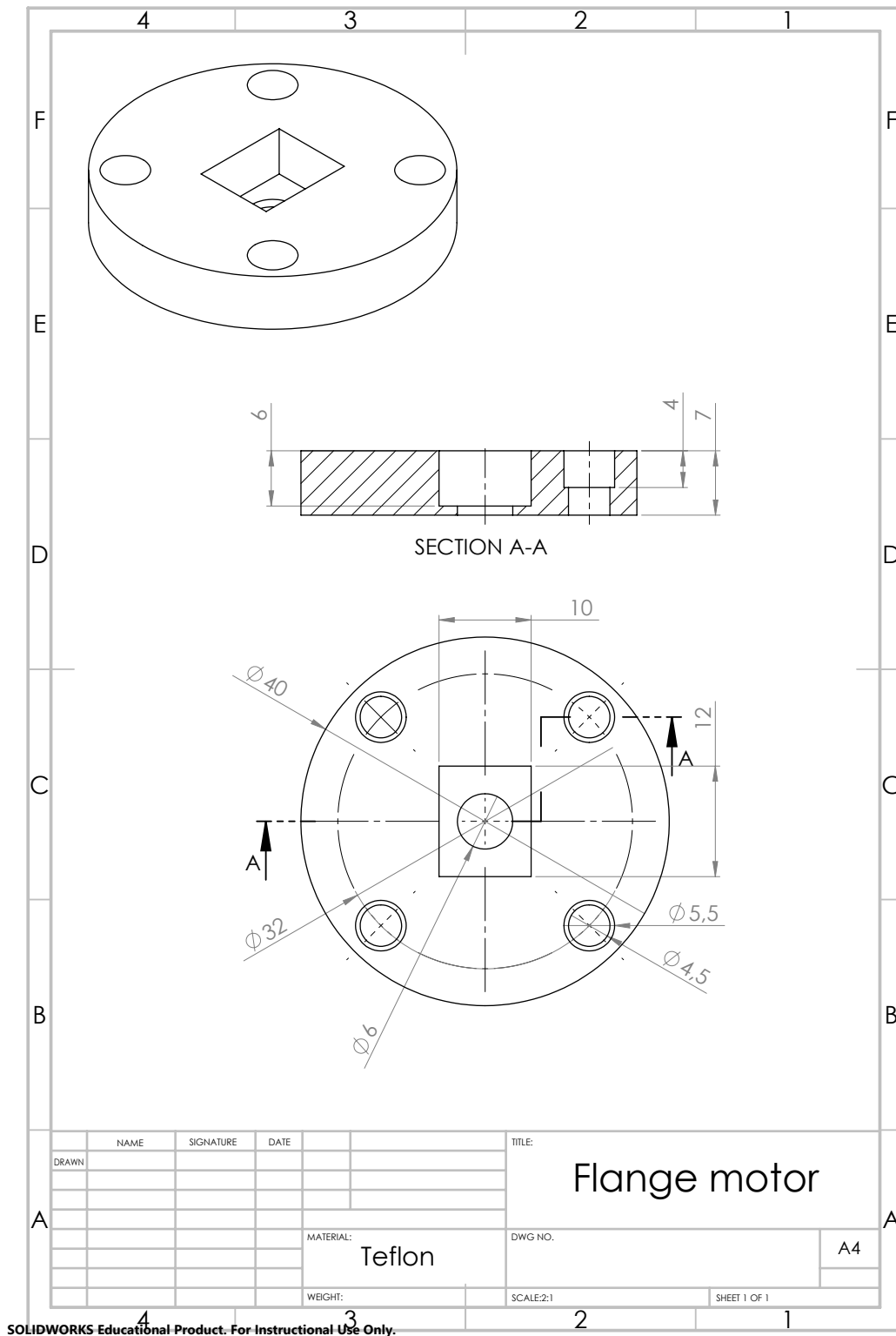


Figura A.4: Flange do motor.

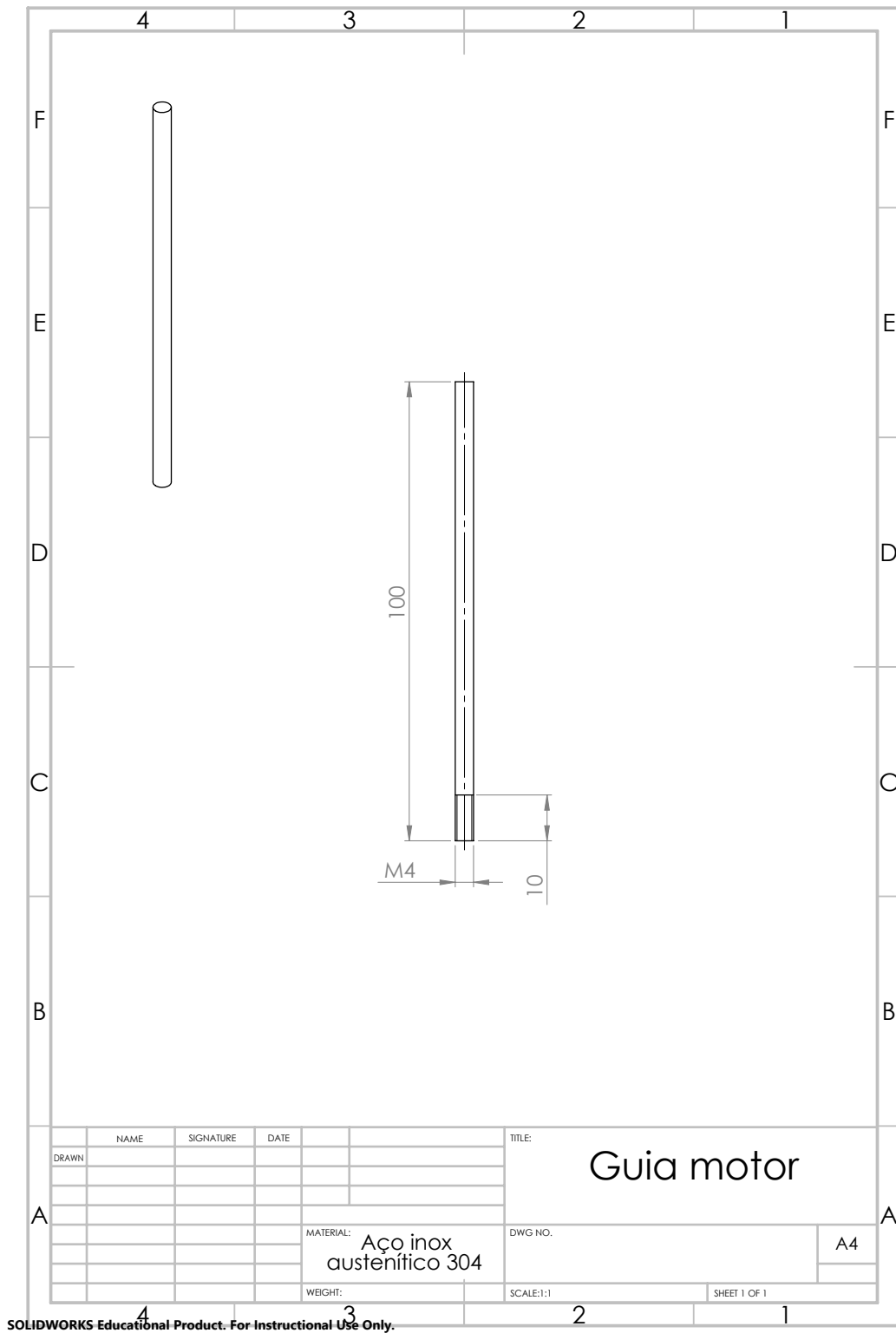


Figura A.5: Guia para guiar a descida do motor com o fuso.

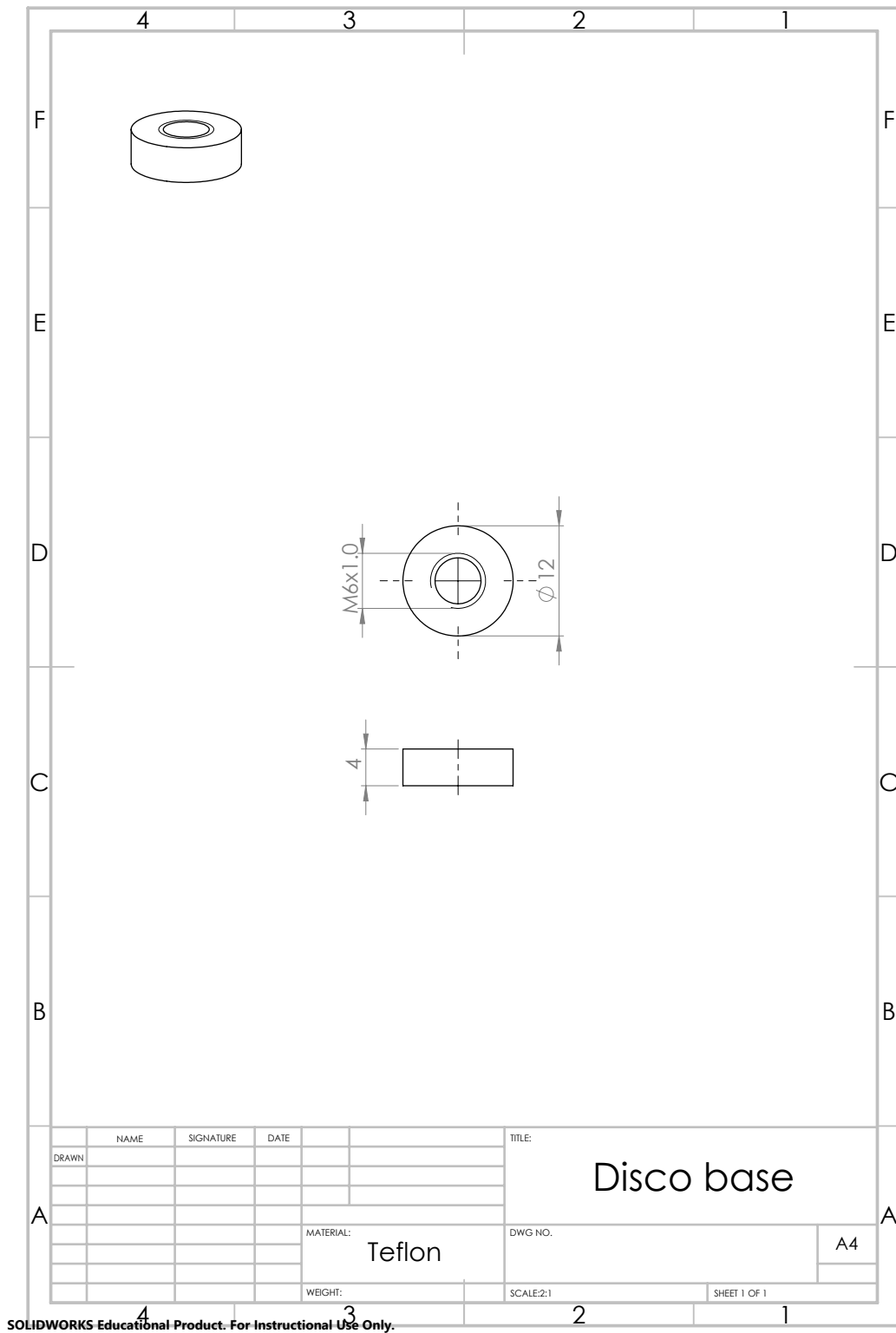


Figura A.6: Disco da base que liga o ímã ao veio do suporte das massas.

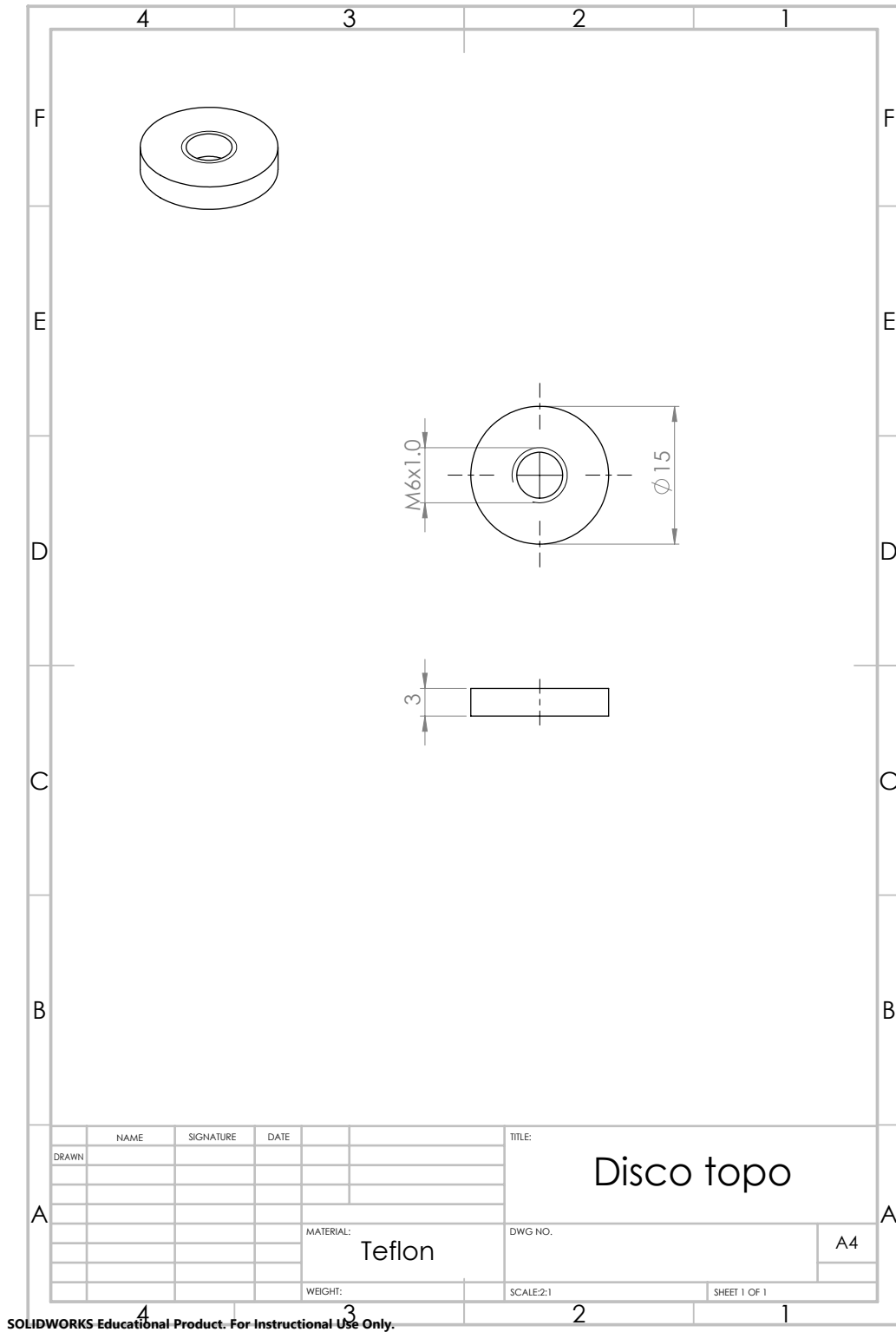


Figura A.7: Disco do topo que vai ligar ao veio para servir de referência ao sensor de distância.

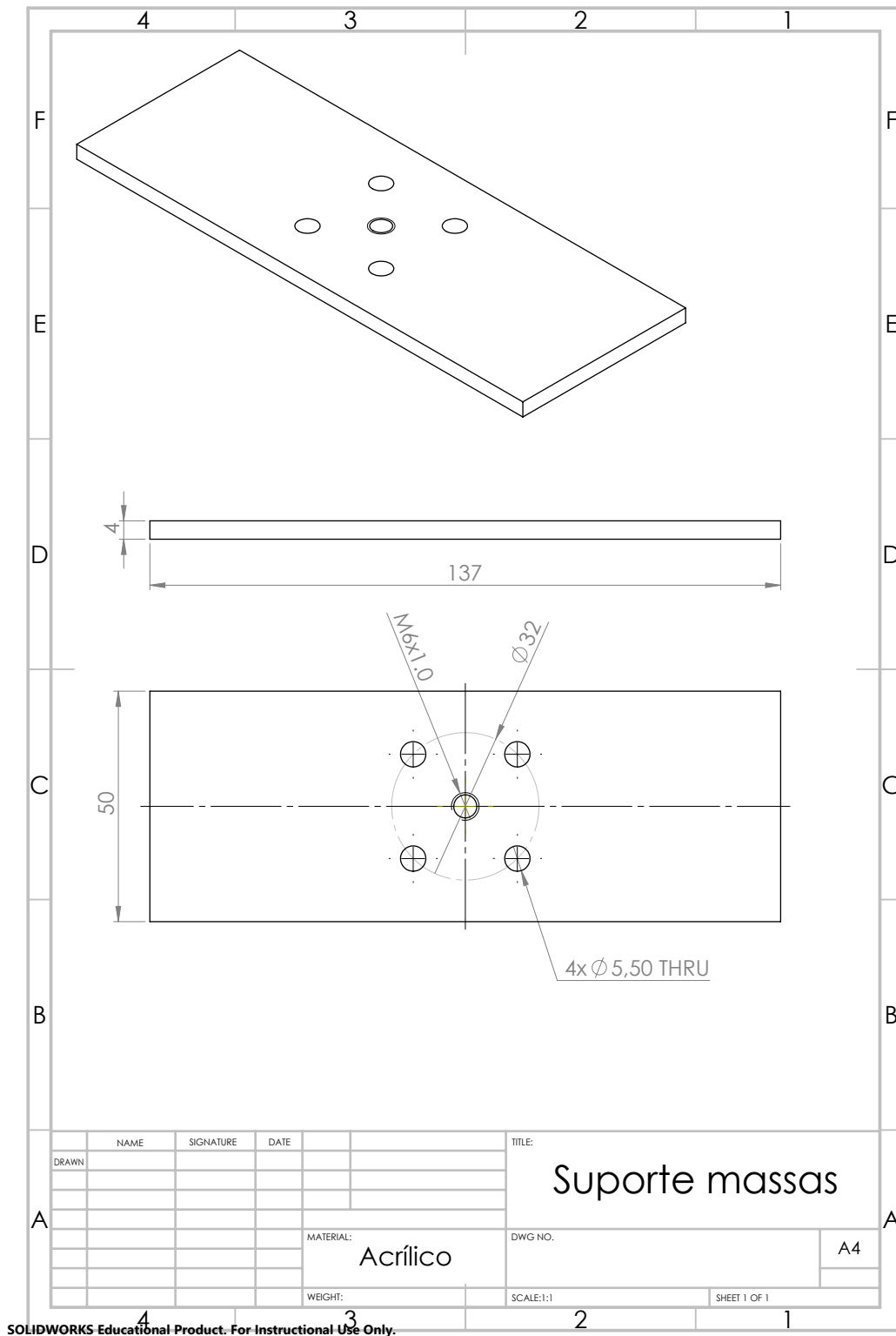


Figura A.8: Suporte que permite colocar duas massas iguais nas extremidades para aplicar uma força no íman a levantar.

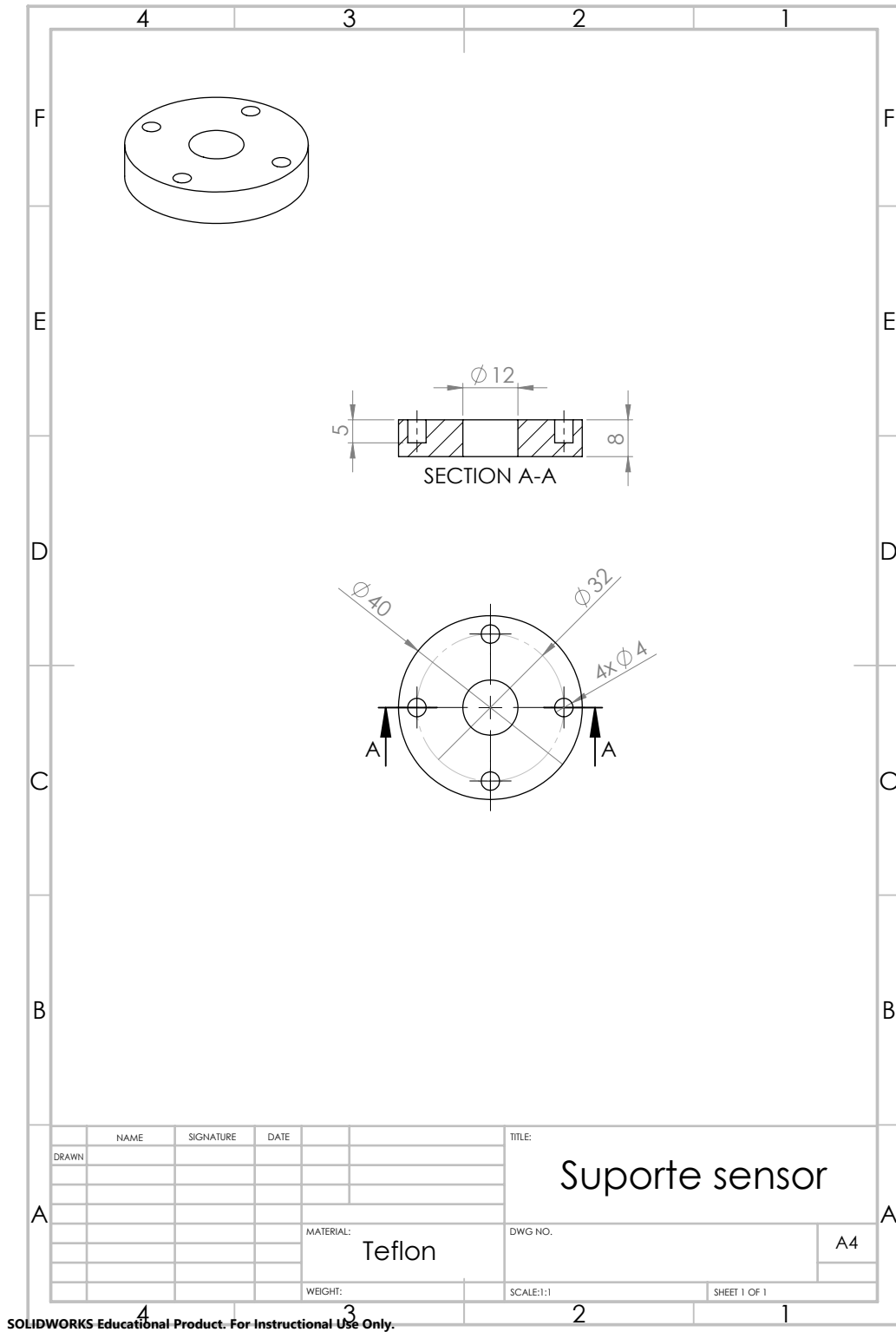


Figura A.9: Suporte do sensor de distância para quando este necessita de estar acoplado à estrutura do gerador eletromagnético.

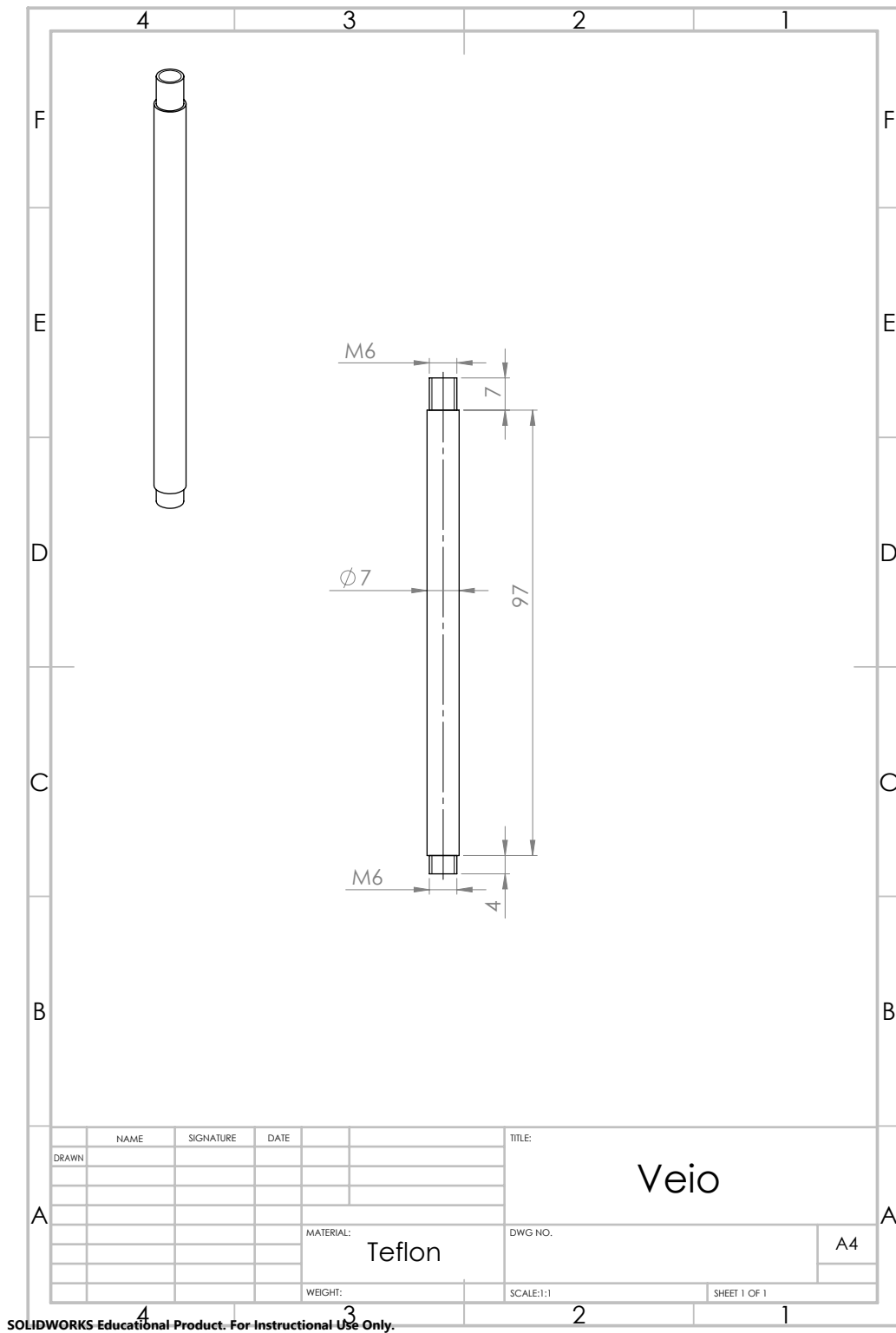


Figura A.10: Veio que liga o ímã em levitação ao suporte para colocar as massas.

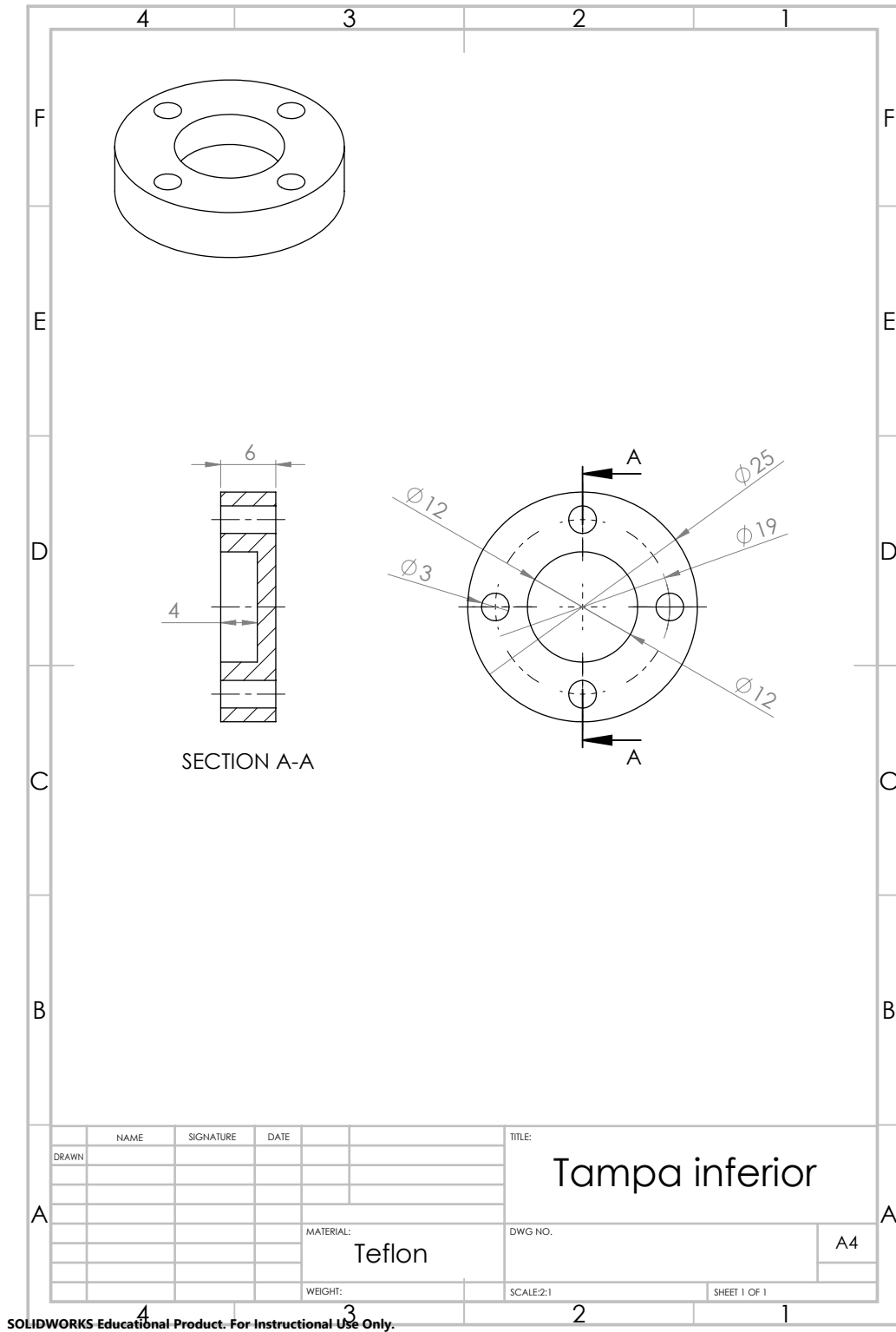


Figura A.11: Disco da base que suporta o íman na extremidade inferior e que une o acoplamento do gerador ao cilindro.

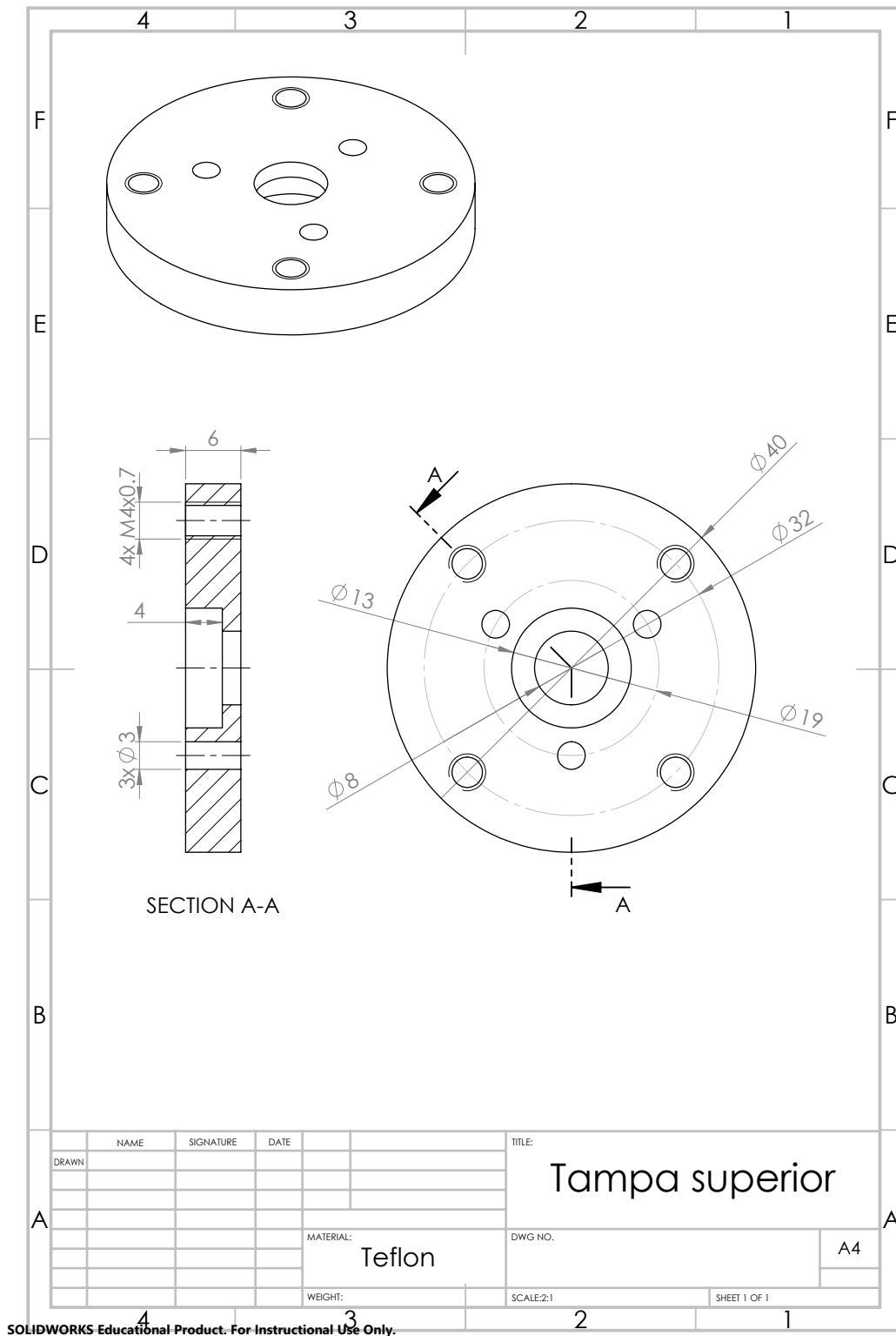


Figura A.12: Tampa superior que une a parte central e a fêmea do fuso, assim como limita a posição máxima do gerador.