

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



WILLIAMAR PRAZERES SOUZA

**GERADORES LINEARES TUBULARES A PISTÃO LIVRE: MODELAGEM
HARMÔNICA E ANÁLISE DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE
UM ARRANJO HALBACH**

UBERLÂNDIA

2024

WILLIAMAR PRAZERES SOUZA

**GERADORES LINEARES TUBULARES A PISTÃO LIVRE: MODELAGEM
HARMÔNICA E ANÁLISE DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE
UM ARRANJO HALBACH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

UBERLÂNDIA

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729
2024

Souza, Williamar Prazeres, 1986-
Geradores Lineares Tubulares a Pistão Livre: Modelagem
Harmônica e Análise da Densidade de Fluxo Magnético de
um Arranjo Halbach [recurso eletrônico] / Williamar
Prazeres Souza. - 2024.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.560>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho,
1977-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

WILLIAMAR PRAZERES SOUZA

**GERADORES LINEARES TUBULARES A PISTÃO LIVRE: MODELAGEM
HARMÔNICA E ANÁLISE DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO DE
UM ARRANJO HALBACH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia, 02 de agosto de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima (UFU)

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes (UFU) - Orientador

Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos (UFU)

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas (IFG)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 796, PPGEELT				
Data:	Dois de agosto de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12212EEL002				
Nome do Discente:	Williamar Prazeres Souza				
Título do Trabalho:	Geradores Lineares Tubulares a Pistão Livre: Modelagem Harmônica e Análise da Densidade de Fluxo Magnético de um Arranjo Halbach				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	<p>Coordenador do Projeto: Prof. Marcelo Braga dos Santos. Título do Projeto: Sistema de transporte público com veículos elétricos - Inteligência Artificial no Gerenciamento e Controle da Energia Elétrica. Agência financiadora: FINEP. Número do processo na agência financiadora: 0751/21. Vigência do projeto: 2021 – atual.</p> <p>Coordenador do subprojeto 2: Luciano Coutinho Gomes. Título do projeto: Desenvolvimento do protótipo do gerador de energia elétrica a partir do SYNGAS baseado na concepção do motor linear a pistão livre e gerador linear ressonante com ímã permanente.</p>				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Professores Doutores: Gustavo Brito de Lima (UFU), Marcelo Braga dos Santos (UFU), Marcos Antônio Arantes de Freitas (IFG) e Luciano Coutinho Gomes, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Luciano Coutinho Gomes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu

ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/08/2024, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Braga dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/08/2024, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antônio Arantes de Freitas, Usuário Externo**, em 02/08/2024, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Brito de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 02/08/2024, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5539904** e o código CRC **75975F4E**.

Agradecimentos

Á Deus pela saúde e infinita misericórdia.

Á minha família (Ester e Larissa – Esposa e filha), por conduzir nosso lar com sabedoria e alegria, respectivamente.

Ao orientador, Profº Luciano Coutinho, por demonstrar por meio de uma orientação presente, o dom da docência, com paciência, e da pesquisa, com conhecimento e competência. Vamos que vamos, chefe!

Aos pesquisadores do Laboratório – LACE, Cassio e Rafael, por tornar a rotina de pesquisador mais leve e produtiva.

Ao professor Marcelo e demais colegas do projeto pelo convite, discussão e aprimoramento da pesquisa.

Ao PPGEELT da UFU por oportunizar a experiência da pesquisa.

Á FINEP pelo financiamento da pesquisa.

Ao IFG - Itumbiara por proporcionar o afastamento de minhas atividades laborais para o desenvolvimento da pesquisa.

Resumo

Geradores lineares a ímã permanente são conhecidos por sua eficiência, construção compacta e capacidade de usar diferentes tipos de acionamentos para geração de energia. Este estudo concentra-se na modelagem e análise de um gerador elétrico linear poligonal a ímã permanente acionado a pistão livre. O modelo de projeto do gerador foi definido, a partir de bases matemáticas analíticas visando a obtenção do comportamento da máquina de acordo com a densidade de fluxo magnético presente no processo de geração, bem como nas simulações em softwares específicos para análise de máquinas elétricas. Neste estudo, os ímãs do gerador foram moldados utilizando uma configuração baseada no arranjo do tipo Halbach. O gerador projetado possui um eixo-linor poligonal com doze fileiras de ímãs de Neodímio dispostos de maneira a formar dois passos polares magnéticos. Para verificar o desempenho, foram realizadas análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos no software ANSYS® Maxwell. Além do mais, o modelo dinâmico completo foi implementado usando o Matlab®, por meio do Simulink®. O sistema foi controlado utilizando uma fonte controlada de corrente - conversor CA/CC. A construção do protótipo do gerador é baseada nos resultados gerados por meio das análises matemáticas da modelagem harmônica e dos métodos numéricos simulados. Os valores dos parâmetros eletromagnéticos, como corrente, tensão, densidade magnética e potência, foram obtidos na frequência mecânica ressonante, com base na força de impulsão do linor prevista na construção futura do motor a pistão livre a ser acoplado ao gerador, que ocorrerá a uma frequência de 33,8978 Hz. Em seguida, os dados foram analisados para avaliar o desempenho do gerador. As conclusões demonstram resultados satisfatórios de acordo com o método dos Elementos Finitos e o modelo dinâmico de simulação escolhidos, haja vista que o protótipo do gerador segue em construção.

Palavras-chave: Geradores Lineares Tubulares; Pistão Livre; Modelagem matemática dos harmônicos; Densidade de Fluxo Magnético; Arranjo Halbach.

Abstract

Permanent magnet linear generators are known for their efficiency, compact construction and ability to use different types of drives for power generation. This study focuses on the modeling and analysis of a free piston driven permanent magnet linear polygonal electric generator. The generator design model was defined based on analytical mathematical bases aiming at obtaining the behavior of the machine according to the magnetic flux density present in the generation process, as well as on simulations in specific software for analysis of electrical machines. In this study, the generator magnets were molded using a configuration based on the Halbach type arrangement. The designed generator has a polygonal linear axis with twelve rows of Neodymium magnets arranged in such a way as to form two magnetic polar steps. In order to verify the performance, numerical analyses were performed using the finite element method in the ANSYS® Maxwell software. Furthermore, the complete dynamic model was implemented using Matlab®, through Simulink®. The system was controlled using a controlled current source - AC/DC converter. The construction of the generator prototype is based on the results generated through mathematical analyses of harmonic modeling and numerical simulation methods. The values of electromagnetic parameters, such as current, voltage, magnetic density and power, were obtained at the resonant mechanical frequency, based on the thrust force of the linor predicted in the future construction of the free piston engine to be coupled to the generator, which will occur at a frequency of 33.8978 Hz. The data were then analyzed to evaluate the generator performance. The conclusions demonstrate satisfactory results according to the Finite Element method and the dynamic simulation model chosen, given that the generator prototype is still under construction.

Keywords: Tubular Linear Generators; Free Piston; Mathematical modeling of harmonics; Magnetic Flux Density; Halbach Arrangement.

Lista de Figuras

Figura 1 - MGLPL (Sandia National Laboratories)	22
Figura 2 – Corte transversal do MGLPL (Linger).....	22
Figura 3 - MPL- Companhia Innas - BV	23
Figura 4 – Protótipo desenvolvido pela Toyota Central R&D	23
Figura 5 – Estruturas básicas de motores a pistão livre.....	24
Figura 6 – Comparação entre a máquina rotativa e translacional linear.....	27
Figura 7 - Perdas nas extremidades do gerador linear a imã permanente	28
Figura 8 – Classificação dos geradores lineares	29
Figura 9 - geometria tubular e planar do gerador	30
Figura 10 – Magnetização dos ímãs	32
Figura 11 - Slotted X Slotless	34
Figura 12 – Topologias do estator (Curto e Longo)	36
Figura 13 - Configuração radial dos ímãs em estator curto e longo	37
Figura 14 - Bobinas monofásicas e trifásicas	37
Figura 15 - Configuração de distribuição das bobinas	38
Figura 16 – Comportamento magnético – FEM 2D	42
Figura 17 - Definição da componente R para o ímã radial.....	43
Figura 18 – Dimensões do gerador em 2D	44
Figura 19 - Gerador malhado em elementos finitos - 3D	45
Figura 20 - Gerador malhado em elementos finitos – 2D	45
Figura 21 - Deslocamento e velocidade do linor - ANSYS®.....	46
Figura 22 - Perfil da Densidade de Fluxo Magnético no entreferro	47
Figura 23 - Intensidade do campo magnético no estator sem bobinas - 3D	48
Figura 24 - Distribuição das bobinas no gerador	48
Figura 25 - Tensões induzidas nas bobinas	49
Figura 26 - Corrente circulando nas bobinas	49
Figura 27 - Força	50
Figura 28 - Potência Elétrica entregue a carga	50
Figura 29 - Disposição do movimento do eixo.....	51
Figura 30 – Densidade magnética B no entreferro	55
Figura 31 – Tensão x Velocidade (com e sem harmônicos).....	56

Figura 32 – Fluxo magnético nas bobinas	58
Figura 33 – Tensão induzida nas bobinas	59
Figura 34 - Correntes nas Bobinas e na Carga	60
Figura 35 - Força gerada.....	61
Figura 36– Potência entregue pelo gerador	61
Figura 37 – Fluxograma do modelo dinâmico.....	63
Figura 38 – Sistema massa/mola/amortecedor - Simulink®	65
Figura 39 - Sistema detector de pico - Simulink®	66
Figura 40 – Curva do sistema detector de pico.....	66
Figura 41 – GLIP	67
Figura 42 – Controlador e portadora	69
Figura 43 – Conversor	71
Figura 44 - Parâmetros elétricos no conversor	72
Figura 45 – Sistema Completo- Simulink®	73
Figura 46 – ANSYS® e Matlab®.....	74
Figura 47 – Variação das cargas resistivas - modelo dinâmico.....	75
Figura 48 – Variação dos perfis de carga - modelo dinâmico: Série.....	76
Figura 49 – Variação dos perfis de carga - modelo dinâmico: Paralelo	77
Figura 50 – Curvas de eficiência do gerador	79
Figura 51 – Parâmetros elétricos na carga resistiva.....	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Configuração do estator (Com ranhuras)	33
Tabela 2 - Configuração de estator curto e longo	36
Tabela 3 - Características das configurações dos enrolamentos das bobinas	40
Tabela 4 - Tipos e aplicações do controlador	69
Tabela 5 – Valores médios a partir de cargas diferentes	75
Tabela 6 - Variação da frequência	78

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANSYS® Maxwell – Análises de Sistemas Eletromagnéticos por meio dos métodos de Elementos Finitos

2D – Duas Dimensões

EDO – Equações Diferenciais Ordinárias

FEM – Método de Elementos Finitos

MPL – Motor de Pistão Livre

MGLPL – Moto-gerador a Pistão Livre

Matlab® – *Matrix Laboratory*

GLIP – Gerador Linear a imã Permanente

PMI – Ponto Morto Inferior

PMS – Ponto Morto Superior

SMD – Sistema Massa/Mola/Amortecedor

Lista de Símbolos

A – Área

a_0, a_1, b_1 – Termos da Serie de Fourier

B – Densidade do Campo magnético

B_h - Amplitude do sinal de campo magnético com harmônicos

$B_h(x)$ – Densidade do campo magnético com harmônicos

c – Coeficiente de viscosidade do sistema SMD

$\frac{dx}{dt}$ – Variação do deslocamento

E_{emf} – Tensão induzida

F_{em} – Força magneto-motriz

F_{estado} – Matriz das forças em espaço de estado

F_{ger} – Força gerada (em Newtons)

$F_{mec}(t)$ – Força mecânica

H – Intensidade do Campo magnético

h_m – Altura do imã

i_L – Corrente na carga

i_a, i_b, i_c – Correntes trifásicas na Carga

k – Coeficiente de elasticidade do sistema SMD

k_p – Variável para determinação da quantidade períodos simulados

L_{comp} – Comprimento do imã

L_S – Indutância das bobinas

M_F – Média do deslocamento

m_t – Massa do sistema de SMD

N_{ciclos} – Número de ciclos

N_{ciclos} – Número de ciclos

R_L – Resistência da carga

R_s – Resistência das bobinas

T – Período da onda

t_{vec} – Variável de tempo

τ – Média da largura do imã

τ_p – Passo polar

vL – Velocidade

x – Variável de deslocamento

Y – Variável da transformação em matriz de estado

Z – Variável para simplificação das equações da matriz de estado do sistema

Φ_h – Fase do sinal de campo magnético com harmônicos

Φ – Fluxo magnético

λ – Fluxo concatenado

ω – Frequência angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	17
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	MOTOR A PISTÃO LIVRE.....	20
2.1.1	<i>Funcionamento do motor de pistão livre</i>	21
2.1.2	<i>Categorização quanto á estrutura</i>	22
2.1.3	<i>Classificação de acionamento do pistão</i>	23
2.2	GERADOR LINEAR A IMÃ PERMANENTE	25
2.2.1	<i>Características construtivas e configurações</i>	25
2.2.2	<i>Magnetização dos ímãs permanentes</i>	30
2.2.3	<i>Configuração do Estator e Linor</i>	33
2.2.4	<i>Slotless x Slotted</i>	33
2.2.5	<i>Estator curto x longo</i>	35
2.2.6	<i>Disposição das bobinas</i>	37
3	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	41
3.1	INTRODUÇÃO	41
3.2	SIMULAÇÃO DO MODELO EM ELEMENTOS FINITOS.....	41
3.2.1	<i>Definição dos materiais utilizados</i>	43
	Ímãs permanentes	43
3.2.2	<i>Dimensões do modelo</i>	44
	Linor e Estator	45
3.2.3	<i>Definição da malha</i>	45
3.2.4	<i>Curvas de posição e velocidade</i>	46
3.2.5	<i>Densidade de campo magnético B</i>	47
	LINOR	47
	ESTATOR	47
3.2.6	<i>Configuração das bobinas e dos enrolamentos</i>	48
3.2.7	<i>Tensões Induzidas nas bobinas</i>	48

3.2.8	<i>Correntes nas bobinas</i>	49
3.2.9	<i>Força</i>	49
3.2.10	<i>Potência elétrica</i>	50
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR LINEAR	50
3.3.1	<i>Densidade do Campo Magnético B no entreferro</i>	52
3.3.2	<i>Modelagem Harmônica</i>	53
3.3.3	<i>Tensão Induzida</i>	59
3.3.4	<i>Correntes</i>	60
3.3.5	<i>Força gerada</i>	61
3.3.6	<i>Potência</i>	62
3.4	MODELAGEM DINÂMICA	62
3.5	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1.1	<i>Validação do modelo em Elementos Finitos</i>	74
4.1.2	<i>Análise baseada nos perfis de carga variados</i>	75
4.1.3	<i>Análise da eficiência energética do gerador</i>	78
4.1.4	<i>Parâmetros finais do gerador</i>	79
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	80
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
7	APÊNDICE	88
7.1	MODELO ANALÍTICO COMPLETO	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A busca por soluções que reduzam a dependência de combustíveis fósseis tem se destacado como uma preocupação fundamental em pesquisa e desenvolvimento científico. Isso se deve à crescente conscientização acerca dos impactos adversos das emissões de gases de efeito estufa sobre o clima global e à percepção da finitude dos recursos energéticos não renováveis (ZASECK, 2013). Neste contexto, projetos de pesquisa direcionados à concepção de máquinas elétricas, cujo propósito é minimizar o consumo de combustíveis fósseis, representam uma contribuição de suma importância para a mitigação das mudanças climáticas e para a transição em direção a uma matriz energética mais sustentável.

Primeiramente, é crucial enfatizar que as máquinas elétricas desempenham um papel central na conversão e utilização de energia em diversos setores da sociedade, incluindo o transporte, a indústria e a geração de eletricidade (BOLDEA, 1997). A substituição de sistemas baseados em combustíveis fósseis por tecnologias elétricas mais eficientes e ecologicamente responsáveis pode resultar em uma redução substancial das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros poluentes atmosféricos, contribuindo, assim, para a redução do impacto ambiental e das perturbações climáticas.

Além disso, os projetos de pesquisa voltados para máquinas elétricas com menor pegada de carbono também apresentam implicações econômicas significativas. A redução da vulnerabilidade a oscilações nos preços do petróleo e a promoção da inovação tecnológica são pontos que têm sido explorados na literatura científica (HANSSON, 2006). A pesquisa e o desenvolvimento de máquinas elétricas eficazes e ambientalmente amigáveis podem impulsionar o crescimento de setores relacionados, como a fabricação de baterias de alta capacidade e sistemas de recarga rápida, com impactos diretos na economia e na geração de empregos.

Ademais, a sinergia entre esses projetos de pesquisa e os objetivos de descarbonização da economia é evidente. Com a crescente adoção de fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, aprimorar a eficiência das máquinas elétricas é fundamental para integrar essas fontes intermitentes de maneira eficaz nos sistemas

elétricos, aumentando a estabilidade e a confiabilidade da rede elétrica (JIA, 2016) e (BOLDEA, 2015).

Por fim, é essencial destacar que os projetos de pesquisa nesta área não se limitam apenas à engenharia. Eles também incorporam aspectos interdisciplinares, como análises econômicas, políticas públicas e a compreensão do comportamento humano em relação à adoção de tecnologias sustentáveis (RATHORE, MISHRA, PASWAN, SANJAY, 2019). A pesquisa acadêmica desempenha, assim, um papel crucial na identificação e na superação de desafios sociais, econômicos e comportamentais associados à transição para tecnologias elétricas mais amigas do meio ambiente, bem como na promoção da conscientização pública sobre os benefícios destas inovações.

1.2 Justificativa

A crescente preocupação quanto à disponibilidade das fontes de combustíveis fósseis, a consequente necessidade de redução dos gases de efeito estufa e a maior preocupação com as questões ambientais, têm provocado à comunidade científica, repercutindo num número expressivo de pesquisas com foco nestas temáticas e envolvendo, sobretudo, o tema da eficiência energética (PARVEEN, NELSON, MURUGAN, 2022).

Segundo (HU, XU, SUN, LIU, 2020) uma escassez global de energia terá consequências devastadoras sobre a estabilidade e a economia do mundo. Além disso, a escassez de energia tem forçado vários países a redirecionar seu sistema energético e temos hoje uma situação única onde podemos influenciar a direção dos futuros sistemas energéticos.

Estes aspectos têm motivado as instituições de pesquisa na propositura e execução de projetos que investiguem a viabilidade das máquinas elétricas para aplicação em veículos elétricos e híbridos (ZHANG, WU, LU, XU, 2021). Neste cenário os Geradores Elétricos Lineares a Imã Permanente – GLIP (*Permanent Magnetic Linear Generator*) têm surgido como uma alternativa viável, principalmente por se mostrarem robustos e possuírem melhor relação custo/benefício, se comparadas às tradicionais máquinas elétricas (BOLDEA, 2017).

A literatura atual (KHATRI, WANG, 2022), (PARVEEN, NELSON, MURUGAN, 2022) e (SMALLBONE *et al*, 2020) mostra que a produção de energia limpa sem carbono é um requisito imediato para proteger a terra da depreciação por

falta de combustíveis. Assim, há cada vez mais destaque ao GLIP, principalmente por oferecerem vantagens significativas como: a simplicidade no projeto e construção; diminuição de ruído; menor vibração; Operação com níveis de conjugado satisfatórios; baixa manutenção e elevada vida útil (CURTO *et al*, 2022). Além disso, tais projetos têm o potencial de impulsionar o crescimento econômico, criando novas oportunidades de emprego e estimulando a competitividade industrial em setores relacionados. A pesquisa em máquinas elétricas abre caminho para a criação de empresas de tecnologia limpa e para a exportação de produtos e serviços sustentáveis, o que pode beneficiar significativamente a economia de um país ou região.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este estudo pretende modelar e projetar um Gerador Linear Poligonal a Imã Permanente projetado para atuar junto ao Motor de Pistão Livre a ser desenvolvido posteriormente. O motor a pistão livre - MPL poderá ser acionado utilizando gás de síntese oriundo da gaseificação de resíduos sólidos urbanos bem como demais combustíveis que se adaptem a característica linear ressonante do gerador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir o modelo matemático do gerador linear a imã permanente considerando a curva de densidade magnética e os demais componentes geométricos do projeto.
- Realizar a simulação dinâmica do Gerador Linear em ambiente computacional utilizando métodos numéricos bem como realizar alterações paramétricas nas simulações visando à análise dos dados.
- Projetar e analisar o perfil eletromagnético de funcionamento da máquina em softwares de elementos finitos (ANSYS® e FEM2D) bem como fazer os desenhos técnicos de todas as etapas de construção do gerador.
- Desenvolver a simulação do controle dinâmico do gerador utilizando elementos de eletrônica de potência e técnicas de controle proporcional integral – PI por meio da plataforma Simulink® inclusa no software Matlab®.

- Analisar o perfil realístico dos dados obtidos através da simulação, com base nos conhecimentos teóricos adquiridos, visando à viabilidade da construção do Gerador Linear a Imã Permanente.

1.4 Estrutura da dissertação

Para alcançar os objetivos delineados, esta dissertação foi organizada em cinco capítulos, conforme mostrado a seguir.

No Capítulo 1 o tema da pesquisa é inicializado, introduzindo sua importância e apresentando os estudos já realizados nesta área. O escopo da dissertação é apresentado e a estruturação dos capítulos é estabelecida.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, demonstrando as informações necessárias para o entendimento do trabalho. A definição dos motores a pistão livre é apresentada bem como as informações sobre os geradores lineares a imã permanente. A máquina geradora é explorada em suas diversas características de construção atuando como perfis de geração diversificados a partir da demanda de acionamento primário. Além disso, há uma exposição da ferramenta utilizada na simulação eletromagnética do projeto para obtenção dos dados em elementos finitos.

No Capítulo 3 o modelo teórico implementado para simular o gerador é descrito com detalhes. Neste capítulo são apresentados todos os equacionamentos que envolvem o projeto do gerador. A curva de densidade magnética, bem como os demais parâmetros eletromagnéticos é obtida de modo analítico (através das séries de Fourier) e numérico (por meio de ambiente computacional, via software de simulação). O projeto da máquina é implementado e simulado através de softwares de simulação de sistemas elétricos e elementos finitos, Matlab®, ANSYS® Maxwell e Fem 2D. O controle da máquina é desenvolvido visando a melhor performance do gerador através de um controlador atuando em conjunto com um conversor. A partir disso, são obtidas as principais grandezas da máquina (tensão induzida, corrente, potência gerada) visando a análise e a validação futura por meio de dados experimentais.

No Capítulo 4 o comportamento do gerador é verificado baseado nos resultados obtidos em diversas simulações. Neste capítulo são apresentados tanto os gráficos dos parâmetros elétricos do gerador – necessários para o futuro dimensionamento do Moto-Gerado a Pistão Livre, como também os resultados obtidos com a variação da

frequência de acionamento, e da alteração da carga, que busca a máxima eficiência do gerador a partir da frequência de ressonância mecânica.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, resumindo os principais resultados alcançados. Por fim, também são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Motor a pistão livre

O Motor de Pistão Livre – MPL têm representado uma inovação significativa no campo da engenharia elétrica e mecânica. Esta tecnologia oferece uma abordagem linear para a geração de energia ou propulsão, destacando-se por sua construção simplificada em comparação com os motores de combustão interna convencionais. Tal simplicidade construtiva acarreta uma série de vantagens fundamentais, incluindo a minimização das perdas por atrito, devido à redução do número de componentes móveis e à mitigação das forças laterais, bem como a redução das perdas por transferência de calor devido à rápida expansão dos gases no ciclo de operação (BOLDEA, 2017).

O Moto-Gerador Linear de Pistão Livre (MGLPL) combina, em uma única estrutura, o Motor de Pistão Livre e o Gerador Elétrico Linear a Imã Permanente eliminando assim a necessidade de dispositivos mecânicos de acoplamento (FENG et al, 2016; GUO et al, 2017). O princípio de operação desse conjunto é que o gás produzido pela combustão no interior do MPL, sob alta temperatura e pressão, move o conjunto formado pelo eixo, pistão e gerador (linor). Em seguida, o gerador linear converte parte da energia cinética do movimento em energia elétrica (MIKALSEN et al, 2007; FENG et al, 2016; GUO et al, 2017). Ter uma máquina elétrica integrada ao motor de combustão permite, por exemplo, utilizar essa máquina para estabilizar o processo de combustão. Além disso, o MPL pode ser utilizado como motor de partida para iniciar o processo de combustão, como dispositivo de frenagem de emergência, ou ainda prover potência extra em caso de perda de poder de combustão (HANSON, 2006).

A dinâmica do pistão no MGLPL é muito diferente da dinâmica do pistão dos motores de combustão internos rotativos tradicionais. Notadamente, no moto-gerador a pistão livre a aceleração do pistão tem um pico no ponto morto superior (PMS) e no ponto morto inferior (PMI), fazendo com que o tempo que o pistão permanece nestas regiões seja pequeno quando comparado com motores de combustão interna tradicionais. Como resultado, a geração de gases poluentes, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), é reduzida. Além disso, a taxa de compressão é variável, devido ao movimento livre do pistão (YUAN, 2016). Logo, o MGLPL pode operar com diferentes

tipos de combustíveis e em diferentes modos de operação sem alterações estruturais no motor (FENG et al, 2016; GUO et al, 2017).

As aplicações comerciais referentes à atuação dessa máquina ainda é reduzido, apesar de se notar um aumento na proposta de patentes que são solicitadas por parte de grandes empresas. Geralmente essas pesquisas são direcionadas às indústrias automobilísticas. (HANIPAH; MIKALSEN; ROSKILLY, 2015).

2.1.1 Funcionamento do motor de pistão livre

Neste momento, é apresentada uma breve descrição do termo que delimita o motor objeto de estudo desta pesquisa, bem como são delineadas as discrepâncias construtivas que o distinguem, culminando na sua categorização como uma classe singular em relação às demais já catalogadas.

A avaliação dos princípios de funcionamento de um motor de combustão interna requer uma compreensão mais geral dos processos dinâmicos, físicos e químicos inerentes a esse sistema. Ao investigar tais processos em um motor de pistão livre, é possível aproveitar os conhecimentos previamente consolidados no campo dos motores de combustão interna, uma vez que os processos físicos e químicos aos quais o fluido ativo é submetido permanecem consistentes, sendo as discrepâncias primariamente relacionadas aos processos dinâmicos associados ao movimento do pistão (MIKALSEN, 2008). Logo, do ponto de vista termodinâmico, as teorias empregadas em motores térmicos convencionais são igualmente aplicáveis aos motores de pistão livre. Assim, é razoável concluir que os mesmos ciclos observados em um motor convencional - admissão, compressão, expansão e escape - também estão presentes em um motor de pistão livre. A viabilidade de operação do motor sob os regimes conhecidos como 2 Tempos ou 4 Tempos também é contemplada nesse contexto acadêmico.

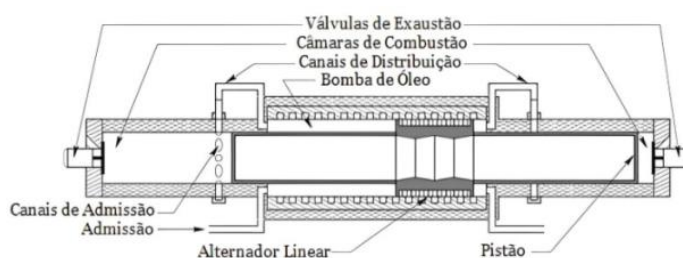
Do ponto de vista dinâmico, é necessário observar a ausência do mecanismo biela-manivela em motores de pistão livre e analisar as implicações decorrentes dessa ausência. Nos motores convencionais, esse mecanismo, em conjunto com o volante, desempenha um papel crucial no controle do movimento dos pistões e no armazenamento de energia (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007; BRUNETTI, 2012). O movimento dos pistões é rigidamente definido pela cadeia cinemática composta pelo pistão, bloco do motor, biela e virabrequim. No entanto, no motor de pistão livre, o

movimento do pistão é determinado pela resultante das forças atuantes sobre ele, desvinculado de qualquer estrutura cinemática predefinida. Portanto, conforme discutido por Mikalsen e Roskilly (2007), na concepção de um motor de pistão livre, a interação dessas forças deve ser cuidadosamente considerada para controlar o movimento do pistão, independentemente do regime operacional.

2.1.2 Categorização quanto á estrutura

A pesquisa e a consolidação dos moto-geradores lineares acionados por pistão livre têm despertado interesse tanto na comunidade acadêmica quanto na indústria.

Figura 1 - MGLPL (Sandia National Laboratories)

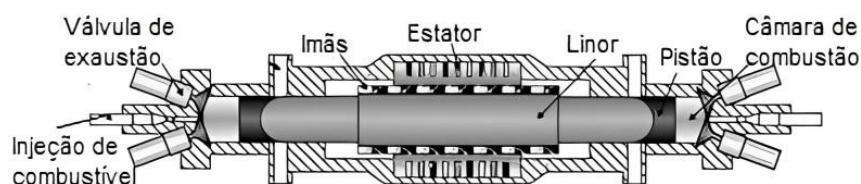


Fonte: Van Blarigan et. al (1998) – Adaptado

Nesta seção, apresenta-se uma revisão dos principais projetos de pesquisa e desenvolvimento relacionados a construção e utilização destas máquinas. Uma aplicação do conjunto MGLPL é o alternador linear com 30 kW de potência desenvolvido no Sandia National Laboratories (VAN BLARIGAN, 1998), ilustrado na Figura 1.

A Swedish Energy Agency, em 2003, financiou projetos com o objetivo de investigar o desempenho e os problemas do conjunto MGLPL como parte de um powertrain de um veículo elétrico híbrido (BERGMAN, 2006; HANSON, 2006). No trabalho desenvolvido em (HANSON, 2016) foi utilizado um MPL com pistão duplo, acoplado a um gerador de ímã permanente, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Corte transversal do MGLPL (Linger)



Fonte: HANSON, 2016

Figura 3 - MPL- Companhia Innas - BV

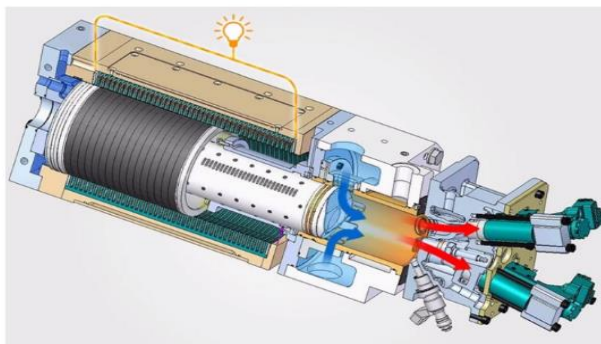


Fonte: MIKALSEN et al, 2007

A companhia holandesa Innas BV produziu motores a pistão livre de 17 kW, com eficiência aproximada de 50% (MIKALSEN et al, 2007). O motor desenvolvido pela empresa utilizava combustível Diesel e um sistema de controle hidráulico capaz de funcionar, simultaneamente, como dispositivo de rebote e carga para o conjunto. Uma fotografia do dispositivo desenvolvido é apresentado na Figura 3.

Os laboratórios da japonesa Toyota Central R&D desenvolveu um protótipo de motor linear a pistão livre, de 10 kW de potência e flexibilidade no uso de combustíveis. Segundo a desenvolvedora, o sistema desenvolvido apresentaria como vantagens a baixa vibração, baixa fricção e uma eficiência acima dos 40%. Um esquemático do protótipo apresentado é mostrado na Figura 4 (HEWITT, 2014).

Figura 4 – Protótipo desenvolvido pela Toyota Central R&D



Fonte: HEWITT, 2014

2.1.3 Classificação de acionamento do pistão

Os motores a pistão livre são formados pela câmara de combustão, pelo dispositivo de rebote (se necessário) e pela carga acoplada (MIKALSEN et al, 2010). Os processos físicos e químicos envolvidos na conversão de energia têm lugar na câmara de combustão. O dispositivo de rebote tem a função de armazenar uma parcela da energia gerada durante a fase de expansão, a qual é posteriormente utilizada para

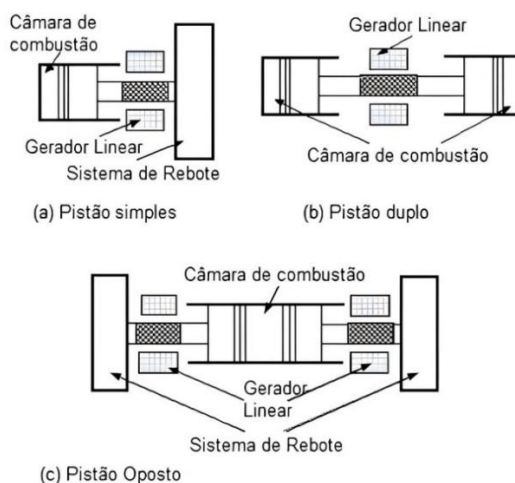
auxiliar na compressão durante a subsequente etapa de combustão. A exceção é representada pelas perdas, que se traduzem em forma de calor, ruído, dissipação e atrito. A energia líquida resultante é então direcionada para a carga. O propósito da carga consiste em converter a energia cinética gerada pelo motor em outras formas de energia relacionadas ao trabalho útil pretendido, como, por exemplo, no caso de bombas hidráulicas ou compressores de ar. No contexto desta pesquisa, como previamente mencionado, a carga escolhida é um gerador elétrico linear, cuja finalidade é converter a energia cinética do motor em energia elétrica, destinada a aplicações no âmbito da mobilidade urbana.

Como ilustrado na Figura 5, existem três estruturas básicas de construção para os motores a pistão livre em função da disposição dos elementos, do número de cilindros e do número de pistões adotados (GUO, 2020).

A estrutura de pistão simples é formada pela associação da câmara de combustão, dispositivo de rebote e pela carga, como mostrado na Figura 5a. O uso do pistão simples garante maior controlabilidade da máquina. Contudo, a existência de uma única câmara de combustão resulta em desbalanceamento das forças exercidas no pistão, causando assim vibrações inerentes a essa configuração (MIKALSEN, 2010).

O motor a pistão duplo, mostrado na Figura 5b, é formado pela associação de dois pistões no mesmo eixo, em que cada pistão é alocado na sua respectiva câmara. Nessa estrutura, o processo de combustão acontece de forma alternada em cada um dos cilindros, eliminando a necessidade de uso do dispositivo de rebote (JIA, 2018).

Figura 5 – Estruturas básicas de motores a pistão livre



Fonte: GUO, 2020 - adaptado.

Portanto, pode-se projetar máquinas com maior densidade de potência, resultando em uma estrutura mais simples e compacta. Como desvantagens dessa estrutura, destacam-se o desafio de controle do pistão e a maior susceptibilidade a variações no processo de compressão.

O motor de pistões opostos consiste em um par de pistões que compartilham a mesma câmara de combustão, sendo necessário, assim, que o mecanismo de rebote e a carga estejam conectados ao referido par de pistões. O diagrama dessa topologia é mostrado na Figura 5c. Essa estrutura garante maior balanceamento dinâmico do motor, reduzindo as vibrações mecânicas. A eficiência do processo é aumentada graças ao fluxo unidirecional na admissão e exaustão simultânea dos gases combustíveis. A necessidade dos elementos de sincronização e rebote é apontada como desvantagem da estrutura.

Todas as configurações citadas podem ser implementadas com ciclos termodinâmicos de dois ou quatro tempos. Essas máquinas podem ainda ser classificadas de acordo com o dispositivo de ignição, tamanho, aplicação e faixa de potência utilizada.

2.2 Gerador Linear a Imã Permanente

2.2.1 Características construtivas e configurações

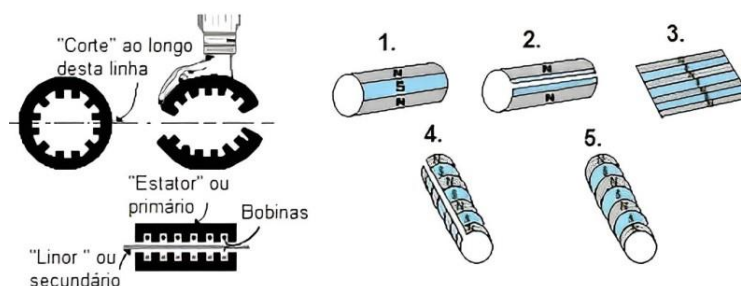
As atribuições previamente elencadas conferem ao gerador linear uma perspectiva atrativa para aplicações que demandam um patamar elevado de eficiência e confiabilidade. Como exemplo, tais aplicações compreendem sistemas de geração de energia e dispositivos extensores de autonomia (*range extenders*) empregados em veículos elétricos. A característica translacional do movimento dos pistões do gerador estudado sugere a utilização de máquinas elétricas lineares. Diferentemente das máquinas rotativas, as máquinas lineares são capazes de produzir energia elétrica a partir de um movimento linear, sem a necessidade de acoplamentos mecânicos como correias ou conjuntos de engrenagens. Com isso, reduz-se o número de partes móveis no sistema, menos peças sofrerão desgaste e, conseqüentemente, menos tempo de manutenção será necessário. Segundo (BOLDEA, 2017), as aplicações típicas que envolvem máquinas elétricas lineares são o controle de pistão de compressores para refrigeradores de pequeno porte, controle de precisão em plataformas com movimentos delimitados em um plano e a geração de energia elétrica. (BOLDEA, 2015) ilustra uma

a associação entre um gerador elétrico linear e um motor Stirling. O motor Stirling é um motor a pistão linear com fonte de calor constante e ciclo termodinâmico similar ao ciclo de Carnot.

Geradores elétricos desempenham a função de transformar energia mecânica em energia elétrica. Sob a suposição de que as perdas são desconsideradas, o processo é teoricamente reversível. Neste cenário idealizado, é possível que todos os geradores operem no modo motor, convertendo energia elétrica de volta em energia mecânica (RIGAMONTE, 2021). Em várias instâncias onde o movimento linear é predominante, a adoção de máquinas lineares é preferível, pois possibilita a redução da complexidade da interface mecânica quando comparada aos sistemas fundamentados em máquinas rotativas. A amplitude de aplicação desses dispositivos é vasta, abrangendo desde a propulsão de composições ferroviárias e sistemas de transporte de grande escala até a geração de energia por meio de extensores de autonomia em veículos elétricos. Além disso, os geradores lineares a ímã permanente são caracterizados pela sua simplicidade de projeto, alta eficiência e baixa manutenção, tornando-os atrativos para uma variedade de aplicações. Sua versatilidade e capacidade de produzir energia elétrica diretamente a partir do movimento linear os tornam uma escolha viável em contextos onde a geração de energia convencional não é prática ou eficiente. Além disso, o desenvolvimento contínuo de tecnologias de ímã permanente e materiais magnéticos tem contribuído para melhorias significativas no desempenho e na eficiência dos geradores lineares a ímã permanente, ampliando ainda mais seu potencial de aplicação em diversas áreas da engenharia (RIGAMONTE, 2021).

Segundo (BOLDEA, 1997) o Gerador Linear a Ímã Permanente atua considerando os mesmos princípios físicos básicos que os convencionais geradores rotativos. Os enrolamentos trifásicos são colocados nos slots do primário (“estator”) e a geometria pode ser obtida baseada na rotina de “cortar” e “desenrolar” das máquinas rotativas lineares. A figura 6 mostra um típico enrolamento trifásico simplificado de camada única com passo completo. Quando o GLIP plano é enrolado novamente ao redor do eixo de movimento, o modelo poligonal é obtido (BOLDEA, 2015). No entanto, ainda que a configuração da estrutura magnética dos geradores lineares a ímã

Figura 6 – Comparação entre a máquina rotativa e translacional linear



Fonte: (BOLDEA, 1997) – adaptado

permanente, em sua maioria, seja oriunda de máquinas rotativas, há uma diferença significativa em relação aos circuitos magnéticos das extremidades, figura 7. Isso por que uma máquina linear terá circuitos magnéticos abertos em ambas as bordas, enquanto o circuito magnético de uma máquina rotativa forma um círculo fechado. Essas extremidades longitudinais de uma máquina linear influenciam o fluxo magnético dentro da máquina e também permitem que a área ativa do entreferro varie à medida que o atuador se move para dentro e para fora do estator (BOLDEA, 2015).

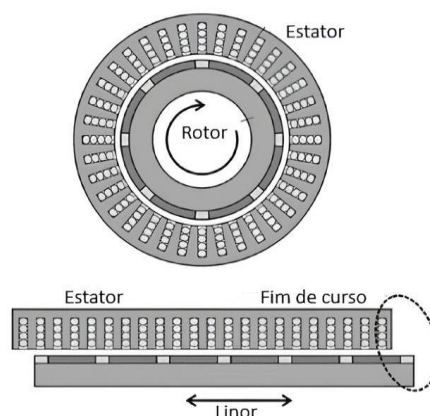
O comprimento limitado do secundário (“linor”) - ao longo da direção do movimento - leva a limitações quanto à construção de estrutura do gerador. Logo, os projetos de geradores lineares precisam considerar essas, e outras, limitações na construção e análise dos dados (BOLDEA, 2015). Assim, diversas configurações e modelos de geradores podem ser projetados, e construídos, de acordo com o objetivo final de implementação da máquina. Algumas dessas limitações incluem:

Força de Atração e Repulsão Magnética: O movimento linear em um gerador linear de ímã permanente é gerado pela interação entre os campos magnéticos dos ímãs permanentes e do condutor. A força de atração e repulsão magnética precisa ser cuidadosamente equilibrada para garantir um movimento suave e eficiente.

Perdas de Energia: As perdas de energia, incluindo perdas por atrito, perdas de corrente parasita e perdas de histerese nos materiais magnéticos, podem reduzir a eficiência do gerador linear. Minimizar essas perdas é essencial para melhorar o desempenho global do sistema.

Desgaste Mecânico: O movimento linear constante pode causar desgaste mecânico nos componentes do gerador, como trilhos, rolamentos e sistemas de vedação.

Figura 7 - Perdas nas extremidades do gerador linear a imã permanente



Fonte: (BOLDEA, 1997) - Adaptado

Esses efeitos de desgaste podem reduzir a vida útil do gerador e exigir manutenção regular.

Controle de Velocidade e Tensão: O controle preciso da velocidade e da tensão gerada é fundamental para atender aos requisitos de aplicação específicos. O projeto do sistema de controle deve levar em consideração a dinâmica do gerador e fornecer meios eficazes para ajustar a saída de energia de acordo com as demandas do sistema.

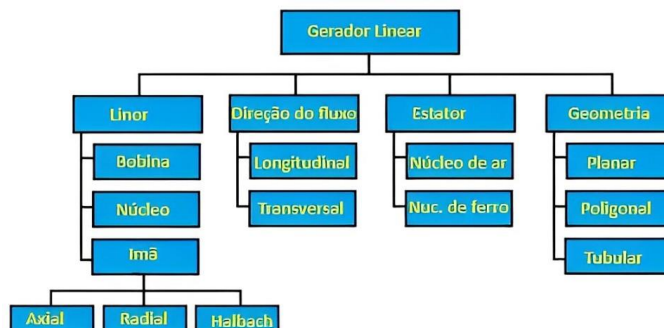
Dimensões e Peso: A densidade de potência e a relação potência-peso do gerador linear podem ser limitadas pelo design dos ímãs permanentes, dos enrolamentos e dos materiais estruturais. O projeto deve equilibrar esses aspectos para obter um gerador compacto e leve, sem comprometer o desempenho.

Em resumo, o projeto de um gerador linear de ímã permanente envolve uma análise detalhada das interações magnéticas, das perdas de energia, do desgaste mecânico e dos requisitos de controle, visando otimizar o desempenho do sistema dentro das limitações tecnológicas e operacionais.

O princípio de funcionamento dos geradores lineares a ímã permanente baseia-se na movimentação relativa entre um conjunto de ímãs permanentes e um condutor elétrico, como uma bobina, resultando na indução de corrente elétrica de acordo com a lei de indução eletromagnética de Faraday. A interação entre o campo magnético estático dos ímãs permanentes e o movimento linear do condutor cria um fluxo de campo magnético variável, gerando assim uma força ao longo do condutor (BOLDEA,

2015). Esse tipo de gerador é composto por uma parte móvel e uma estática. A parte móvel, denominada linor, executa um movimento linear recíproco e é composta

Figura 8 – Classificação dos geradores lineares



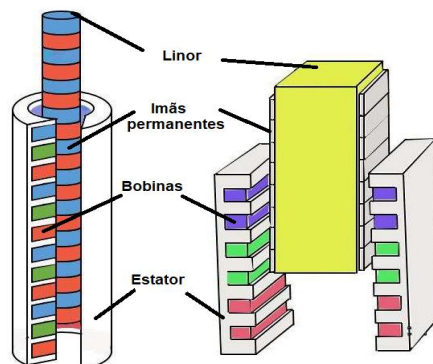
Fonte: (ARSLAN, 2022) – Adaptado

por uma placa de aço ferromagnético com um ímã permanente fixado em sua superfície. Por sua vez, a parte estática, conhecida como estator, é constituída por bobinas trifásicas enroladas em torno de um núcleo laminado de ferro ferromagnético. Entre o linor e o estator, existe uma separação física denominada entreferro, que permite o movimento relativo entre as duas partes (BOLDEA, 2015). A estrutura de operação pode variar consideravelmente entre os diferentes modelos de geradores, porém, a análise teórica será definida com base nos geradores lineares com fluxo magnético excitado permanentemente.

A classificação dos geradores lineares é feita a partir da configuração baseada na necessidade da demanda podendo ser física (tamanho do gerador), econômica (custos para produção) ou ainda de eficiência (maior rendimento elétrico). Sendo assim, os parâmetros internos da máquina podem ser, por exemplo, do tipo tubular contendo um núcleo de aço com fluxo longitudinal e linor com ímãs radiais. Além disso, nos geradores lineares de ímã permanente, é crucial minimizar a massa da parte móvel devido a considerações cinemáticas, visando aumentar a aceleração e o rendimento. Máquinas que empregam comutação de fluxo magnético permanente (ímãs permanentes) tem sido objeto de investigação devido à sua construção simplificada. Embora as máquinas lineares de fluxo transversal e indução apresentem eficiência reduzida e um fator de potência baixo, elas se destacam por sua simplicidade e baixo custo (GYSEN, 2011). Diversos estudos têm explorado diferentes topologias de máquinas lineares para aplicações em motores de pistão livre, e geradores lineares de

ímã permanente são frequentemente preferidos devido à sua capacidade de fornecer potência eficiente.

Figura 9 - geometria tubular e planar do gerador



Fonte: (AZHARI, 2018)

Dentre as várias maneiras de composição da estrutura da máquina, os geradores a ímã permanente podem apresentar uma geometria planar, tubular, poligonal ou também ser categorizados como radiais, axiais ou halbach, dependendo da orientação do fluxo magnético. Em estruturas sem ranhuras, as bobinas são alojadas em cilindros vazios feitos de material ferromagnético, enquanto em estruturas ranhuradas, as bobinas são posicionadas em ranhuras, conforme sugerido pelo nome. Estruturas com ou sem ranhuras podem ser projetadas para operação monofásica, trifásica ou multifásica. Adicionalmente, as máquinas com núcleo de ferro proporcionam maior força e suportam mais estresse em comparação com as máquinas de núcleo de ar, tornando-as mais preferidas em projetos com motores a pistão livre (ARSLAN, 2022).

Em estudos de aplicação de MPL, os ímãs permanentes (50% radiais, 22% axiais e 14% Halbach) foram preferidos como parte móvel em 86% dos casos, enquanto as bobinas e os núcleos foram ambos preferidos em 7% das avaliações. Quanto à direção do fluxo, 93% dos exemplos utilizaram um design longitudinal, enquanto 7% empregaram uma configuração transversal. Isso torna vasto o escopo de possibilidades com relação à propositura de geradores lineares a ímã permanente (SUBRAMANIAN, 2020).

2.2.2 Magnetização dos ímãs permanentes

A magnetização dos ímãs permanentes em geradores lineares é uma etapa crucial que influencia diretamente o desempenho do dispositivo. Diferentes abordagens

de magnetização, incluindo magnetização axial, radial e Hallbach, são empregadas para otimizar a distribuição dos campos magnéticos (PING, AROF, WIJONO, 2006). A disposição dos ímãs visa garantir uma densidade de fluxo magnético adequada, o que impacta na eficiência, na força e na potência gerada pelo gerador (BOLDEA, 2015).

As configurações de magnetização, como ímãs radiais, Figura 10a, e ímãs radiais com espaçadores em materiais magnéticos macios, Figura 10b, demandam caminhos de retorno específicos para aumentar a densidade de fluxo no entreferro (ZHANG, WU, LU, XU, 2021). Na fabricação de eixos magnéticos poligonais, a magnetização radial é comumente utilizada para direcionar o campo magnético predominantemente radial através do entreferro. Essa configuração é empregada em atuadores tubulares de ímã permanente, embora a sua fabricação seja desafiadora devido à complexidade do processo (GYSEN, 2011).

A magnetização axial, por sua vez, resulta em um menor caminho de relutância e um campo magnético mais elevado no entreferro, dispensando a necessidade de um back-iron magnético macio. Em contrapartida, seu uso é rotineiro nas pesquisas em máquinas elétricas por conta da menor dificuldade em encontrar e produzir ímãs com magnetização axial (GYSEN, 2011).

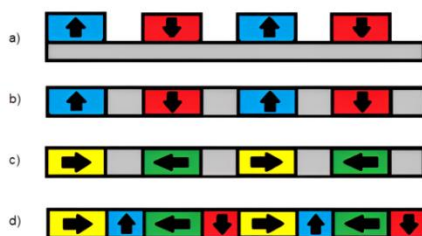
A configuração Hallbach, Figura 10d, que combina magnetização axial e radial, produz um campo magnético quase senoidal, eliminando a necessidade de um caminho de retorno (back-iron). No entanto, os custos de fabricação são mais elevados (WANG, HOWE, 2005; JUN, SHIN, CHO, LEE, KIM, 2016; ELGEBALY, EL-NERM, 2015). Com isso, esta configuração substitui peças polares axiais por ímãs radiais, permite a concentração do campo magnético tanto interna quanto externamente à matriz, resultando em forças mais baixas. No entanto, conforme mencionado, essa solução é mais dispendiosa devido aos custos associados à magnetização e fabricação.

Em suma, as configurações de magnetização dos ímãs em geradores lineares e tradutores magnéticos são selecionados com base nos requisitos específicos do projeto, considerando os compromissos entre desempenho, eficiência e custo.

(SUBRAMANIAN, 2020) realizou uma pesquisa comparativa incluindo as diversas possibilidades de disposição dos ímãs em geradores lineares a ímã permanente. Este estudo compreende a análise de arranjos de ímãs com variações específicas em sua

espessura e na presença ou ausência de ferro traseiro, considerando arranjos axiais, radiais e Halbach. Para os pesquisadores as inferências foram as seguintes:

Figura 10 – Magnetização dos ímãs



Fonte: (GYSEN, 2011) – Adaptado

Potência de saída: No que se refere à potência de saída, o arranjo Halbach demonstrou consistentemente um desempenho superior em comparação com os arranjos axial e radial em todas as condições de teste. Portanto, é evidente que o arranjo Halbach é a opção mais vantajosa em termos de potência de saída. No arranjo axial, a presença do ferro traseiro prejudica seu desempenho, sugerindo que o ferro traseiro abaixo dos ímãs não deve ser utilizado nesse tipo de arranjo. No caso do arranjo Halbach, observou-se que o ferro traseiro não oferece benefícios significativos em comparação com ímãs mais espessos. Já para o arranjo radial, o back iron é considerado essencial para a operação eficaz do sistema. A determinação da quantidade ideal de ferro traseiro em relação à espessura do ímã pode ser realizada por meio de análises de saturação, que podem ser conduzidas utilizando modelos simples de elementos finitos.

Custo dos ímãs: Considerando um custo uniforme por volume para todos os tipos de ímãs, é notável que o arranjo Halbach surge como a escolha ideal para geradores elétricos lineares. No entanto, é importante ressaltar que os ímãs axiais estão prontamente disponíveis, enquanto os arranjos radiais e Halbach requerem pedidos especiais de ímãs. Portanto, a decisão sobre o arranjo magnético ideal deve levar em conta o custo dos ímãs. Além disso, o arranjo radial pode apresentar um desempenho superior em relação ao arranjo axial, especialmente se o custo for um fator determinante, considerando que o uso do ferro pode ser mais econômico em comparação com a utilização exclusiva de ímãs para atender aos requisitos de potência e força.

Facilidade de disposição do ímã: Em termos de facilidade de montagem, o arranjo axial é considerado o mais simples dos três, uma vez que requer apenas um tipo

de ímã para construir o tradutor. Em contrapartida, o arranjo Halbach é o mais complexo, pois exige quatro tipos diferentes de ímãs, enquanto o arranjo radial requer dois tipos diferentes de ímãs para sua implementação.

2.2.3 Configuração do Estator e Linor

O estator é composto, geralmente, por núcleo de aço silício de alta permeabilidade e as bobinas de cobre criadas a partir do enrolamento de fios e/ou fitas de cobre. O núcleo do estator é laminado por uma chapa de aço silício e dividido em várias partes para reduzir as perdas no núcleo e facilitar a fabricação do protótipo (NIU, 2013). Já o linor pode ser feito de alumínio com elevada relutância magnética dependendo topologia em que os ímãs permanentes estão dispostos. Isto por que o retorno do fluxo para o fechamento do circuito magnético por ser, ou não, necessário na metodologia de construção da máquina.

2.2.4 Slotless x Slotted

Os geradores lineares com configuração tipo *slotted* e *slotless* são duas abordagens distintas para a geração de energia elétrica a partir de movimento linear. As principais diferenças e semelhanças, bem como suas vantagens e desvantagens, aplicação e custo/benefício podem ser listadas conforme dados a seguir:

Tabela 1 - Configuração do estator (Com ranhuras)

<i>Slotted</i>		
Diferenças	Estrutura	Os geradores lineares tipo <i>slotted</i> possuem um design que incorpora ranhuras ou fendas no núcleo magnético para acomodar as bobinas condutoras.
Vantagens	Controle de Fluxo magnético	A presença das ranhuras permite um controle mais eficaz do fluxo magnético, o que pode resultar em uma maior eficiência energética.
Desvantagens	Estabilidade e Precisão	O design <i>slotted</i> pode oferecer uma maior estabilidade e precisão na geração de energia devido ao controle aprimorado do campo magnético
	Complexidade de Fabricação	A presença das ranhuras adiciona complexidade ao processo de fabricação, o que pode aumentar os custos de produção.
Aplicação e custo/benefício	Possibilidade de Desgaste	As partes móveis dentro das ranhuras podem estar sujeitas a desgaste ao longo do tempo, exigindo manutenção periódica.
	Os geradores lineares tipo <i>slotted</i> são comumente utilizados em aplicações que requerem uma alta eficiência e controle preciso do fluxo magnético. Seu custo inicial pode ser um pouco mais elevado devido à complexidade de fabricação, porém, em muitos casos, a eficiência energética e a confiabilidade podem justificar o investimento inicial.	

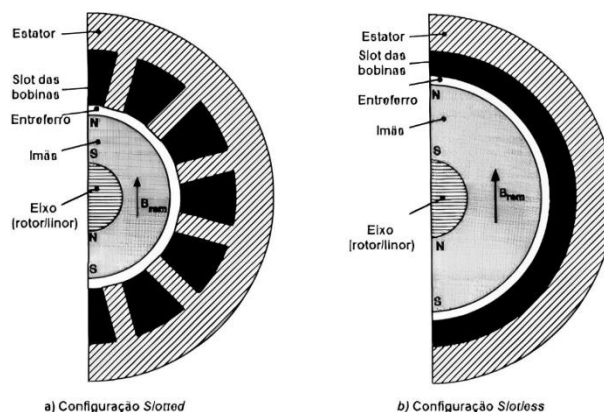
Fonte: (MIN, SARLIOGLO, 2017).

Os geradores lineares *slotless* representam uma abordagem distinta na geração de energia elétrica a partir de movimento linear. Em contraste com os geradores *slotted*, os *slotless* não apresentam ranhuras ou fendas no núcleo magnético, resultando em uma

superfície magnética lisa. Essa configuração oferece vantagens significativas, como uma vida útil potencialmente mais longa e menor risco de desgaste em comparação com os geradores *slotted*. Além disso, a ausência de ranhuras pode simplificar o processo de fabricação, potencialmente reduzindo os custos de produção. No entanto, os geradores *slotless* podem apresentar limitações no controle preciso do fluxo magnético, o que pode impactar sua eficiência energética em determinadas aplicações. Ademais, devido à falta de ranhuras, os geradores *slotless* podem ser mais suscetíveis a ruídos e vibrações indesejadas em certos contextos operacionais. Em termos de aplicação e custo/benefício, os geradores lineares *slotless* são comumente empregados em situações onde a simplicidade de fabricação e a confiabilidade a longo prazo são considerações importantes. A análise cuidadosa das exigências específicas de cada aplicação é essencial para determinar a viabilidade e a adequação dos geradores lineares *slotless* em termos de custo e benefícios associados (MIN, SARLIOGLO, 2017).

Os motores, e geradores que utilizam em seu projeto ímãs permanentes geralmente podem ter as configurações das bobinas no estator dispostas em duas geometrias diferentes, com e sem ranhuras (*Slotted* e *Slotless*, respectivamente). De acordo com (PIRISI, GRUOSSO, RICH, 2009), (GHANI, IBRAHIM, NOR, 2022) e (MIN, SARLIOGLO, 2017) em todas as topologias, o cálculo preciso da força é uma das tarefas essenciais uma vez que tende a ser um dos pré-requisitos para prever o torque eletromagnético, além da velocidade máxima do motor conforme determinada tensão de alimentação. As máquinas do tipo ranhuradas (*slotted*) possuem a característica de proporcionar uma força contrária ao movimento devido ao alinhamento

Figura 11 - Slotted X Slotless



Fonte: (JUFER, RADULESCO, 1991).

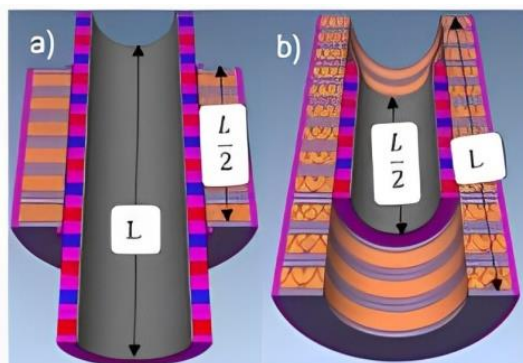
do campo magnético ocasionado pela presença dos dentes no estator. Isso ocorre devido o direcionamento/caminho que os “dentes” presentes na estrutura do estator possibilitam ao fluxo magnético. Já nas máquinas tipo slotless a intensidade do campo precisa ser muito maior para que haja o fechamento do circuito magnético produzindo assim o resultado esperado (JUFER, RADUSLESCO, 1991). Além disso, há uma intensidade elevada do fluxo magnético no caminho de retorno desse campo. Logo, será necessário que haja no projeto do linor um material de alta permeabilidade entre o eixo-linor e o ímã de modo a facilitar o caminho do fluxo. Para (MIN, SARLIOGLO, 2017) em um enrolamento de armadura com ranhura ideal, o pico de torque disponível pode ser obtido integrando o produto da componente fundamental da densidade de fluxo magnético e das distribuições de fluxo no estator ou da densidade atual sobre a área de superfície ativa do estator. Em contrapartida o pico de torque do motor sem ranhura pode ser calculado considerando a interação entre o campo magnético radial no estator considerando o enrolamento e a corrente da armadura.

Vale ressaltar que nas máquinas de ímã permanente tipo slotted, utiliza-se a complexa função de permeância relativa obtida através do mapeamento conforme método de Simulação Computacional (SC) para considerar os efeitos das ranhuras e calcular as componentes normal e transversal da densidade do campo magnético no espaço de ar com fenda. Para abordar os efeitos da abertura de slot, é introduzido o fator de abertura de slot, o qual reflete os componentes de vazamento que não seguem o caminho desejado. Por outro lado, nas máquinas sem slot, emprega-se o princípio dos fatores de enrolamento estendidos juntamente com o valor efetivo das grandezas do campo magnético para avaliar a ligação de fluxo influenciada pela configuração de bobina única.

2.2.5 Estator curto x longo

As configurações do estator e do linor (primário e secundário) podem variar a partir da necessidade do projeto. Para (BOLDEA, 2015) uma máquina com menor peso, maior aceleração e menos dispersão do fluxo magnético em seu interior recomenda-se o estator longo, figura 12b. Já os requisitos que buscam maior potência (ainda que tenha um custo global inicial maior) com boa tolerância a dispersão do campo magnético no espraiamento pode ser usada a topologia estator curto, figura 12a.

Figura 12 – Topologias do estator (Curto e Longo)



Fonte: (BAKER, KORBKANDI, WU, JALAL, 2019)

Conforme mencionado, os requisitos de projetos são as principais diretrizes na escolha da topologia. Enquanto o estator longo pode atuar em velocidades maiores, por outro lado tende a fornecer menos potência devido a menor quantidade de ímãs permanentes (que são as fontes primárias de densidade de campo magnético e, por conseguinte, da energia eletromagnética gerada). Em contrapartida um estator curto produz um elevado campo magnético global, ocasionando um alto custo de produção (BAKER, 2019). Todavia a geração de energia desta configuração é considerada elevada.

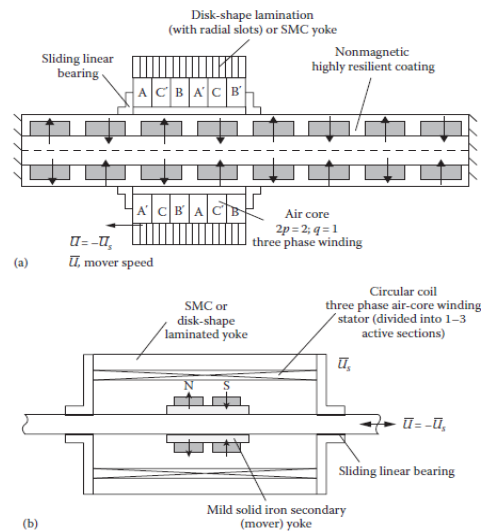
A tabela 2 resume as diferenças entre os geradores lineares de ímã permanente com estator curto e estator longo, destacando suas características distintas e as aplicações mais comuns para cada tipo. Assim, a escolha entre um gerador linear de ímã permanente com estator curto ou estator longo depende das necessidades específicas de cada aplicação, considerando fatores como espaço disponível, requisitos de potência, resposta dinâmica e capacidade de carga. A compreensão das características distintas de cada tipo de gerador é crucial para a seleção adequada e eficiente de acordo com os requisitos do projeto (BOLDEA, 2015).

Tabela 2 - Configuração de estator curto e longo

Características	Estator Curto	Estator Longo
Massa e Tamanho	Menor, adequado para espaços limitados.	Maior, pode ser volumoso.
Resposta Dinâmica	Rápida devido à menor inércia	Mais lenta devido à maior inércia
Força de Sustentação	Menor	Maior
Perdas por Efeito Joule	Potencialmente maiores devido à alta densidade de corrente	Potencialmente menores devido à maior área de enrolamento
Aplicações	Posicionamento de precisão, automação industrial.	Ferrovias, propulsão elétrica, aplicações industriais.

Fonte: (Baker, 2019) (BOLDEA, 2017)

Figura 13 - Configuração radial dos ímãs em estator curto e longo



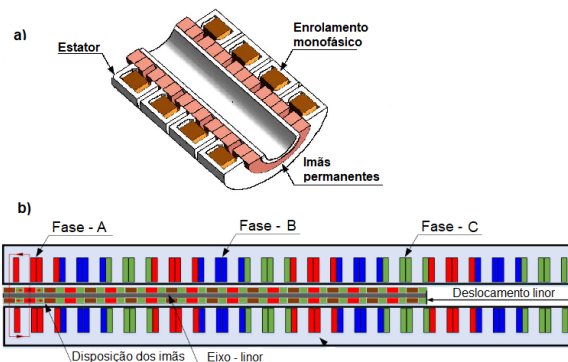
Fonte: (BOLDEA, 2015)

Boldea (2015) ainda reforça que o uso do estator externo longo com eixo de ímã permanente curto interno visa menor peso e maior aceleração do motor, com zero campos magnéticos dispersos. No entanto, a falta de seções no primário do estator pode aumentar o consumo de energia.

2.2.6 Disposição das bobinas

A modalidade de enrolamento adotada no motor linear, seja monofásico ou trifásico, exerce influência direta sobre o princípio subjacente do conversor de potência e o método de controle empregado. No contexto do enrolamento monofásico, o motor linear demonstra notável desempenho dinâmico e controlabilidade, apesar de exibir uma densidade de empuxo relativamente baixa (WANG, HOWE, 2005).

Figura 14 - Bobinas monofásicas e trifásicas

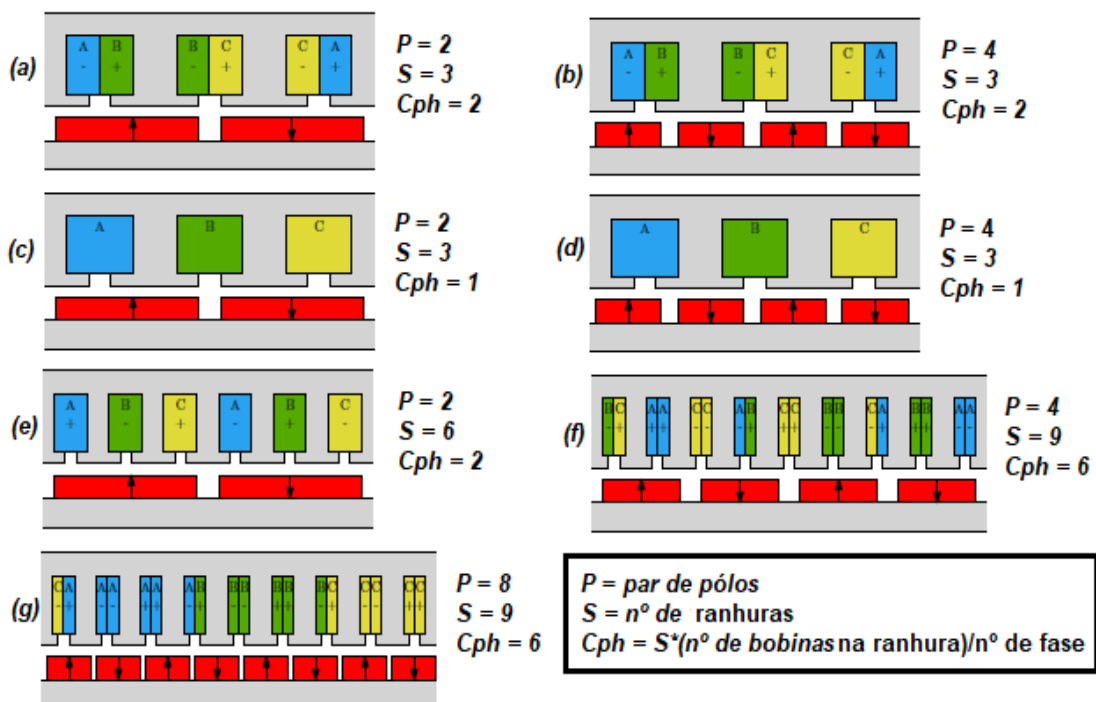


Fonte – (CHEN, ZHAN, WANG, NIE, 2019) – Adaptado

Esta configuração é particularmente apropriada para aplicações de Força de Propulsão de Grande Porte (FPLG) de potência reduzida, em virtude do princípio de controle simplificado e da facilidade de fabricação associada. Entretanto, ao alcançar o final do percurso do motor linear monofásico, as bobinas energizadas experimentarão um enfraquecimento na intensidade do fluxo magnético, resultando em uma diminuição tanto da indutância quanto da constante de impulso. Apesar da maior complexidade na fabricação e no controle, o motor linear trifásico proporciona uma densidade de potência superior com dimensões equivalentes. Este tipo de motor é altamente apropriado para veículos híbridos elétricos (HEV) destinados á automóvel de menor peso. Além disso, é vantajoso para a realização de cursos de movimento mais extensos em comparação com o motor monofásico (GHANI, IBRAHIM, NOR, 2022).

A distribuição do enrolamento de cobre no estator da máquina geradora é configurada de modo que, dado um número viável de polos e ranhuras, o fluxo por fase seja maximizado (GYSEN, 2011). Cada uma dessas configurações de enrolamento é considerada na modelagem e otimização, uma vez que cada uma delas tem vantagens e desvantagens que depende do desempenho e das especificações volumétricas definidas durante o projeto da máquina.

Figura 15 - Configuração de distribuição das bobinas



Fonte: (GYSEN, 2011) – Adaptado

Para máquinas rotativas de ímã permanente, diversas configurações são aplicadas, as quais podem ser classificadas como: concentradas, distribuídas, multicamadas, modulares, etc. Sua classificação geralmente se relaciona com a forma como os enrolamentos estão interconectados ou com a configuração das extremidades dos enrolamentos. No entanto, como, em um gerador tipo poligonal ou tubular, não existem extremidades de enrolamento, a comparação de desempenho é diferente e outras configurações são até possíveis. Com isso, cada volta do enrolamento termina em sua origem e o caminho de retorno é estabelecido novamente. Isso aumenta a liberdade de design para diferentes configurações de enrolamento.

A figura 15 apresenta o número de polos como P , que é sempre um múltiplo de dois, e o número de ranhuras como S , que é um múltiplo de três, já que a maioria das máquinas são trifásica. Além disso, o coeficiente C_{ph} determina a quantidade de enrolamentos em cada ranhura de acordo com o número de fases. Assim, a configuração do enrolamento deve ser tal que as formas de onda das tensões induzidas sejam equilibradas. As configurações de enrolamento mais comuns até nove ranhuras, $S = 9$, por seção periódica são apresentadas. Além do mais, a tabela 3 elenca as principais características de cada tipo de configuração dos enrolamentos das fases bem como a disposição dos ímãs permitindo uma comparação entre eles e servindo de auxílio aos projetos de construção dos geradores lineares a ímã permanente. De acordo com (GYSEN, 2011) os principais aspectos relacionados às combinações de número de ranhuras/polos em máquinas elétricas pode ser analisados conforme os dados listados a seguir.

- Quando o número de ranhuras é divisível por 3, não há combinação viável de ranhuras/polos. Além disso, todas as combinações viáveis têm um número ímpar de ranhuras por fase, o que requer conexão em série das bobinas devido às diferenças de fase nas tensões induzidas.

- Para todas as combinações viáveis, o número de ranhuras por fase é par, permitindo diferentes arranjos de conexão em série/paralelo ou série/antiparalelo das bobinas, dependendo da paridade.

- Máquinas modulares com um número par de polos têm mais combinações viáveis de ranhuras/pólos do que aquelas com um número ímpar.

Tabela 3 - Características das configurações dos enrolamentos das bobinas

Item	Tipo	Característica
a)	Concentrado	Combinação de dois polos e três ranhuras com enrolamento concentrado. Forma de onda de fem trapezoidal para ímãs de passo grande. Enrolamento curto vantajoso em máquinas rotativas, porém não aplicável em atuadores tubulares.
b)	Concentrado	Configuração semelhante à (a) com quatro pólos. Forma de onda de fem mais sinusoidal e menor <i>cogging</i> em excitação CA. Menor carga magnética por ranhura e possibilidade de redução na altura do ferro traseiro.
c)	Singular	Transformação da configuração concentrada em enrolamento singular. Alta corrente e menor perda de cobre. Facilidade de fabricação e alto fator de preenchimento
d)	Singular	Configuração de enrolamento singular com desempenho semelhante à (b). Menor perda de cobre e maior fator de preenchimento
e)	Distribuído	Enrolamento distribuído de slot integral. Forma de onda sinusoidal, mas gera grande força de <i>cogging</i> devido ao número inteiro de ranhuras-pólo
f)	Distribuído	Enrolamento distribuído com número fracionário de ranhuras por pólo. Alto fator de enrolamento e baixa força de <i>cogging</i> e ondulação de força
g)	Modular	Configuração modular com alto fator de enrolamento e baixa força de <i>cogging</i> . Vantajosa em termos de construção

- Para máquinas lineares de ímã permanente, o número de polos não precisa ser par, permitindo combinações adicionais com números ímpares de pólos e pares de ranhuras.

Para (GYSEN, 2011) a seleção cuidadosa da combinação de ranhuras/pólos tem um impacto significativo no desempenho, capacidade de suportar desmagnetização e características de ruído/vibração de uma máquina elétrica.

3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

3.1 Introdução

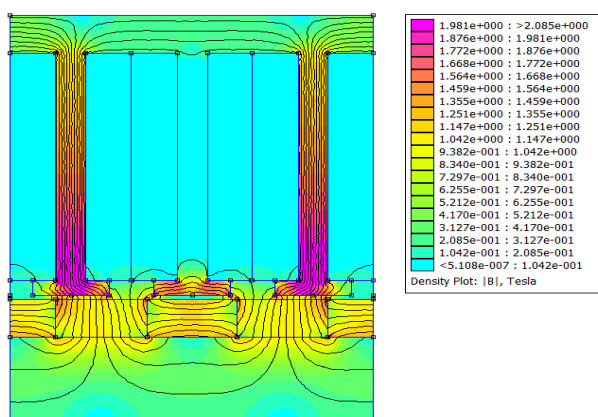
A modelagem matemática e a simulação computacional exercem papel fundamental quando se trata de projeto de máquinas elétricas. Para (BOLDEA, 1997) isso proporciona uma representação detalhada e mais próxima possível do real comportamento do sistema. Assim, a aplicação dessas técnicas permite uma análise aprofundada de fenômenos complexos, como distribuição de campos magnéticos, correntes induzidas e força aplicada, contribuindo para a compreensão abrangente das interações entre os diversos componentes do gerador. Além disso, oferecem uma base sólida para a tomada de decisões durante o desenvolvimento.

Com o intuito de minimizar os riscos associados à construção de protótipos sem um entendimento profundo de seu comportamento, esta pesquisa busca otimizar a eficiência e a confiabilidade do desenvolvimento do gerador linear a ser projetado. Assim, aliando uma abordagem matemática com uma simulação precisa é possível analisar diferentes cenários operacionais avaliando ainda os impactos das variáveis críticas no desempenho do sistema.

3.2 Simulação do modelo em Elementos Finitos

O método de simulação de máquinas elétricas em elementos finitos geralmente é desenvolvido utilizando ferramentas computacionais que visam aperfeiçoar a análise das características e avaliar o desempenho do gerador linear projetado por meio dos parâmetros eletromagnéticos (PARTHASARATHY, 2012). De acordo com manual de funcionamento desse programa, o software ANSYS® Maxwell 2D/3D representa uma solução de alta eficiência que se vale do método dos elementos finitos para conduzir simulações e análises eletromagnéticas. O software, desenvolvido pela ANSYS®, Inc., destaca-se como uma ferramenta aplicada na abordagem de uma variedade de problemas em distintas áreas, incluindo máquinas elétricas, transformadores, ímãs permanentes, atuadores e diversos outros dispositivos eletromecânicos. Adicionalmente, o ANSYS® Maxwell disponibiliza interfaces personalizadas para a análise de máquinas elétricas e conversores de potência. Ademais, este software permite a realização de simulações tanto no domínio bidimensional quanto tridimensional, contemplando ambientes 2D e 3D, respectivamente (ANSYS®, 2022).

Figura 16 – Comportamento magnético – FEM 2D



Fonte: Próprio autor

Este estudo emprega o software ANSYS® Maxwell como uma das plataformas fundamentais para a caracterização do comportamento do fluxo magnético na geometria dinâmica da máquina em questão. Além disso, também é utilizado o software FEM 2D para a análise do comportamento eletromagnético do gerador, conforme figura 16. No âmbito deste trabalho, foram conduzidas simulações do gerador linear com ímã permanente em ambientes 2D e 3D, permitindo a comparação dos resultados obtidos por cada ferramenta. O modelo é implementado por elementos finitos triangulares e as perdas parasitas no ímã permanente, e no eixo, também são consideradas pelo modelo (PARVEEN, NELSON, MURUGAN, 2022) e (LI, HUANG, CHEN, TAN, HU, 2021).

O primeiro passo para realizar as simulações almeçadas é a construção do modelo no *software*. Assim, é necessário inserir manualmente, a partir das ferramentas de desenho disponíveis, cada peça do modelo. Nesta etapa, faz-se necessário informar as medidas do modelo, além de definir qual o material utilizado. Neste processo é necessário alterar manualmente as dimensões de cada elemento, caso seja necessário simulações com diferentes dimensões. Em contrapartida, o ANSYS® oferece a ferramenta de *scripting*, que guarda em um arquivo texto os passos e comandos realizados durante a construção do modelo. Sendo assim, é possível utilizar uma das linguagens de programação disponibilizadas (ANSYS®, 2022).

Após a primeira montagem do modelo fazendo uso desta ferramenta, pode-se editar o arquivo obtido da gravação em um editor de texto e realizar a parametrização das medidas inseridas de forma a criar variáveis que possam ser alteradas dentro do código. Em seguida, o modelo pode ser reconstruído dentro do software ANSYS® a partir da execução do código, com os valores definidos para as variáveis.

O uso deste método é de grande utilidade e foi implementado neste estudo para facilitar os diferentes testes com dimensões e topologias distintas para os elementos do gerador (como os ímãs, as bobinas, o eixo-linor e o estator).

3.2.1 Definição dos materiais utilizados

Ímãs permanentes

A biblioteca de materiais do ANSYS® disponibiliza diversos materiais para simulação dos projetos podendo, inclusive, criar e alterar as configurações e propriedades.

Dentre os diversos modelos dos ímãs de Neodímio Ferro Boro - NdFeB, disponíveis na biblioteca de materiais do programa, foi definido o Magfine - NdFeB 42H para os ímãs, que possui as seguintes características físicas:

- Magnetização remanescente $B_r = 1.326$ T;
- Coercividade $H_c = -1013400$ A/m;
- Produto energético máximo $BH_{max} = 335942.1$ J/m³.

Figura 17 - Definição da componente R para o ímã radial.

View / Edit Material

Material Name: Magfine - NdFeB 42H 90

Material Coordinate System Type: Cylindrical

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	-1013400	A_per_meter
- R Component	Unit Vector	1	
- Phi Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model		None	w/m^3
Mass Density	Simple	0	kg/m^3
Composition		Solid	
Young's Modulus	Simple	0	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostriction	Custom	Edit...	

Fonte: Próprio autor

A direção de magnetização dos ímãs (radial e axial) foi definida nas propriedades do material, conforme mostra a Figura 17. É necessário alterar as componentes de R e Z de acordo com a direção desejada.

3.2.2 Dimensões do modelo

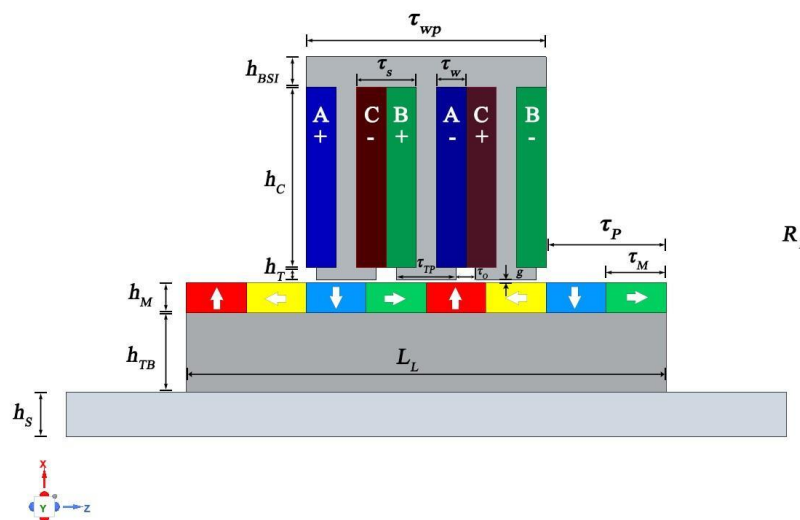
Tabela 4 – Dimensões do gerador do gerador

Nome	Valor	Descrição
f	33.8978 Hz	Frequência do sistema
g	1 mm	Entreferro
h_{BSI}	10 mm	Altura da camada de aço externo
h_C	60 mm	Altura das bobinas
h_M	10 mm	Altura dos ímãs
h_S	20 mm	Raio do eixo de alumínio
h_T	4 mm	Altura das extremidades do estator
h_{TB}	21.32 mm	Altura da camada de aço interno
L_L	160 mm	Comprimento da camada de aço interna
N_{coil}	60	Número de voltas das bobinas
N_{ph}	3	Número de fases
R_1	126.32 mm	Raio do gerador
τ_o	6.57 mm	Abertura dos dentes do estator
τ_S	20 mm	Largura de duas bobinas
τ_M	20 mm	Passo magnético
τ_P	40 mm	Passo polar
τ_{tp}	20.1 mm	Largura entre os dentes do estator
τ_w	10 mm	Largura de uma bobina
τ_{wp}	80 mm	Comprimento do trecho ativo

Fonte: Próprio autor

A tabela 4 mostra os parâmetros de entrada utilizados para projetar e simular o comportamento dinâmico do gerador. Além disso, serve de base para a construção do protótipo analisado neste estudo. Além disso, a figura 18 elenca as especificações das medidas do gerador a partir de uma visão 2D da máquina.

Figura 18 – Dimensões do gerador em 2D



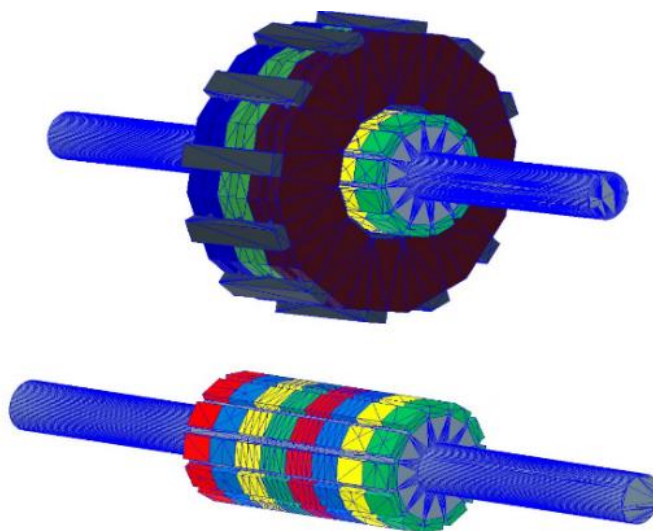
Fonte: Próprio autor

Linor e Estator

O material escolhido para o Linor e para o estator foi o aço silício Cogent M470-50A, em ambos os elementos. Com o intuito de reduzir as perdas decorrentes das correntes de Foucault nas lâminas do aço, foi necessário definir uma laminação paralela ao plano XY e XZ, para o linor e estator, respectivamente. Nas bobinas, o material escolhido foi o cobre, configurando 60 voltas para cada bobina. Já para o eixo do Linor, o material escolhido foi o alumínio.

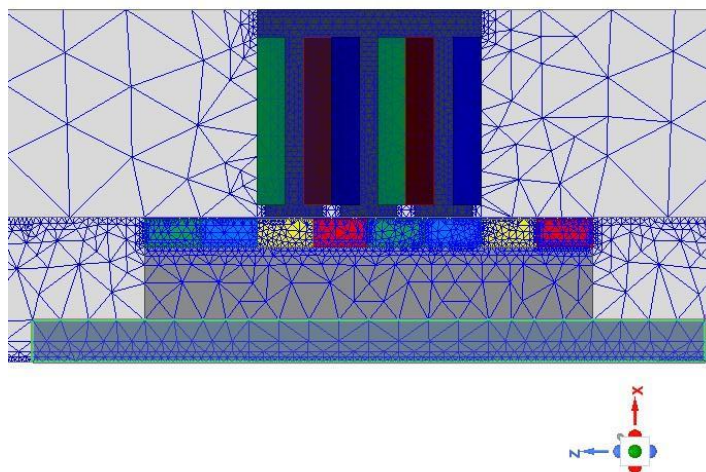
3.2.3 Definição da malha

Figura 19 - Gerador malhado em elementos finitos - 3D



Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Gerador malhado em elementos finitos – 2D



Fonte: Próprio autor

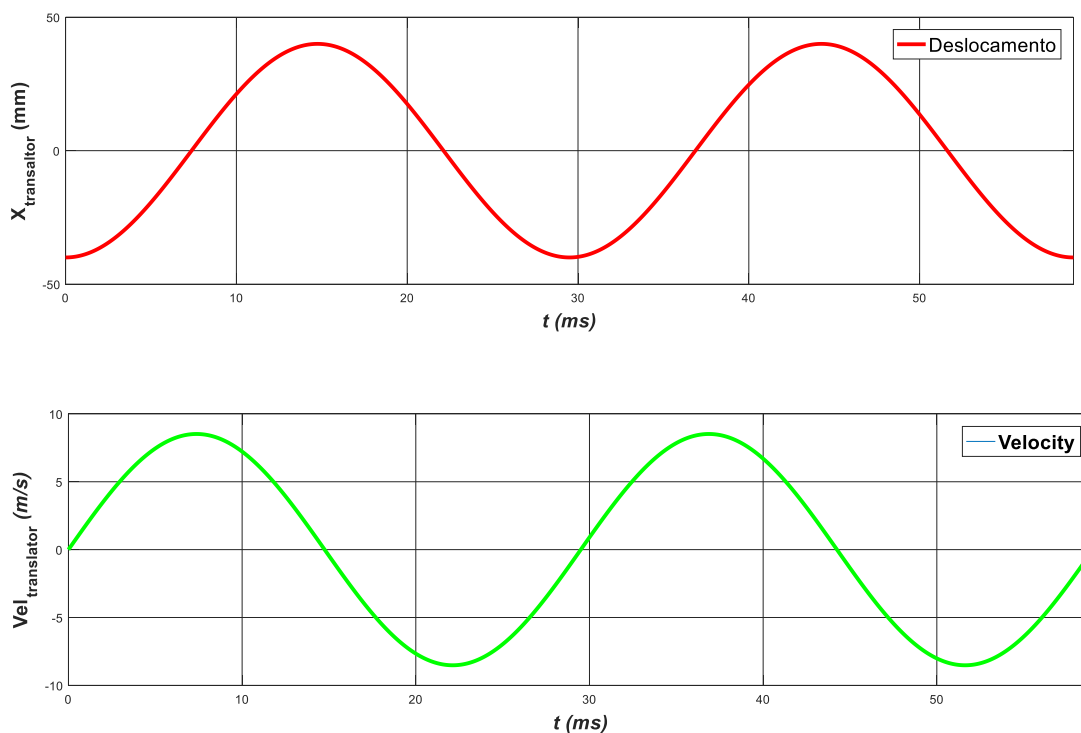
A qualidade dos dados simulados está relacionada diretamente às dimensões do projeto bem como ao esforço computacional resultante da quantidade de elementos e nós da malha (SASÍC, LLOYD, ELEZ, 2012). A distribuição da malha do gerador é mostrada nas figuras 19 e 20. O modelo 2D demonstra concentração dos campos magnéticos mais intensos, principalmente no entreferro. Entretanto, o modelo 3D apresenta uma malha com distribuição uniforme. Essas diferenças fazem muita diferença no tempo de simulação do modelo. Dessa maneira, foram usados, em média, 25.534 elementos. Isso resultou em um tempo de simulação de 1h e 23 min.

3.2.4 Curvas de posição e velocidade

O deslocamento e a velocidade do gerador são parâmetros essenciais na modelagem por serem elemento de influência direta na geração dos campos magnéticos e, conseqüentemente, no comportamento eletromagnético da máquina. (BOLDEA, 2017).

O projeto propôs um deslocamento máximo de 80 mm. Apesar de haver perdas por dispersão quando há o deslocamento bidirecional máximo do linor, essa configuração mantém durante todo o processo de geração os enrolamentos do estator expostos às linhas de campo o que garante a otimização do trecho ativo de geração (RIGOMONTE, 2021).

Figura 21 - Deslocamento e velocidade do linor - ANSYS®



Fonte: Autoria Própria.

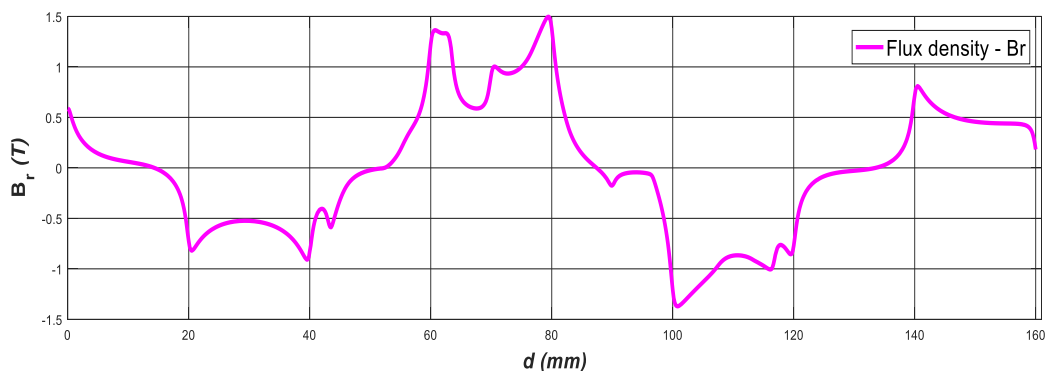
3.2.5 Densidade de campo magnético B

Linor

Os dados apresentados refletem as análises dos parâmetros a partir da simulação do modelo do gerador com base nas dimensões propostas na tabela 6. Com isso, o perfil magnético (densidade de campo, linhas de fluxo e força) e elétrico (corrente, tensão induzida e potência) é analisado.

A curva de densidade do campo magnético B pode ser vista como o principal parâmetro de análise do comportamento eletromagnético da máquina. Logo, a figura 22 ilustra o campo remanescente B_r no entreferro com valores maiores onde a disposição do imã é radial (entre 60 e 80 mm).

Figura 22 - Perfil da Densidade de Fluxo Magnético no entreferro



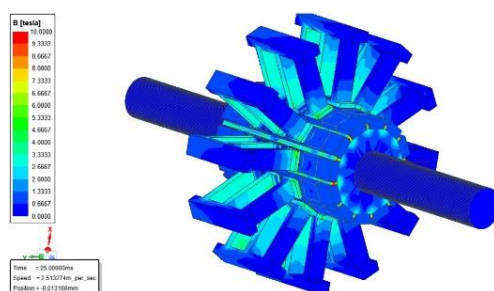
Fonte: Autoria Própria.

Conforme figura 22, a densidade de campo magnético no entreferro não apresenta um perfil uniforme ao longo de sua extensão, principalmente, devido à influência do direcionamento dos campos magnéticos gerados pelos ímãs permanentes (RIGOMONTE, 2021), (BOLDEA, 2015), (PARTHASARATHY, 2012).

Estató

A figura 23 ilustra a intensidade dos campos magnéticos gerados no estator. Nota-se que, devido a existência dos dentes na estrutura de fixação das bobinas, o campo magnético é mais concentrado (BOLDEA, 2015). Além disso, a presença dos chanfros otimiza, e direciona, as linhas de fluxo fechando o circuito magnético que envolve as bobinas e, por conseguinte, gerando as tensões induzidas.

Figura 23 - Intensidade do campo magnético no estator sem bobinas - 3D

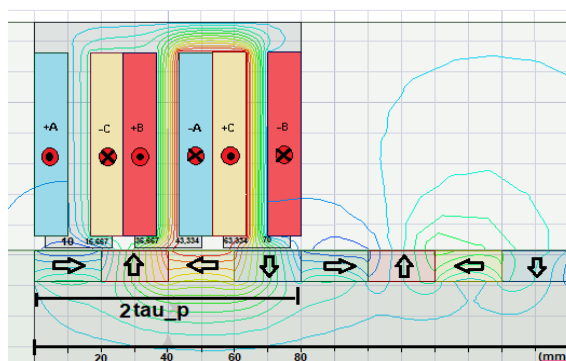


Fonte: Próprio autor

3.2.6 Configuração das bobinas e dos enrolamentos

As bobinas de cobre com 60 voltas por fase estão dispostas em 6 slots do estator. Assim, a variação do fluxo magnético dentro das bobinas durante o movimento do linor é significativo. Por isso, a ordem de distribuição das fases deve ser modelada de forma a garantir que não haja o cancelamento dos vetores de campo magnético (BOLDEA, 1997), (BOLDEA, 2017).

Figura 24 - Distribuição das bobinas no gerador

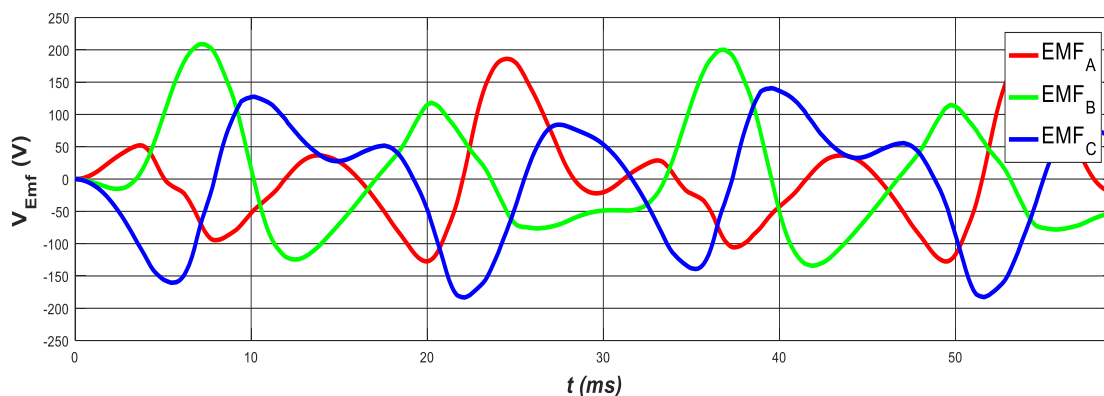


Fonte: Próprio autor

3.2.7 Tensões Induzidas nas bobinas

Com base na lei de Lenz-Faraday, a variação do fluxo magnético no tempo aplicada a uma bobina gera uma força eletromotriz que se opõe ao movimento da fonte que o gerou (RIGOMONTE, 2021), (BOLDEA, 2015), (GYSEN, 2011). Com isso a figura 25 demonstra as tensões induzidas nos terminais das bobinas, que dependem da velocidade de translação do linor, bem como do comportamento da curva de densidade de campo magnético.

Figura 25 - Tensões induzidas nas bobinas

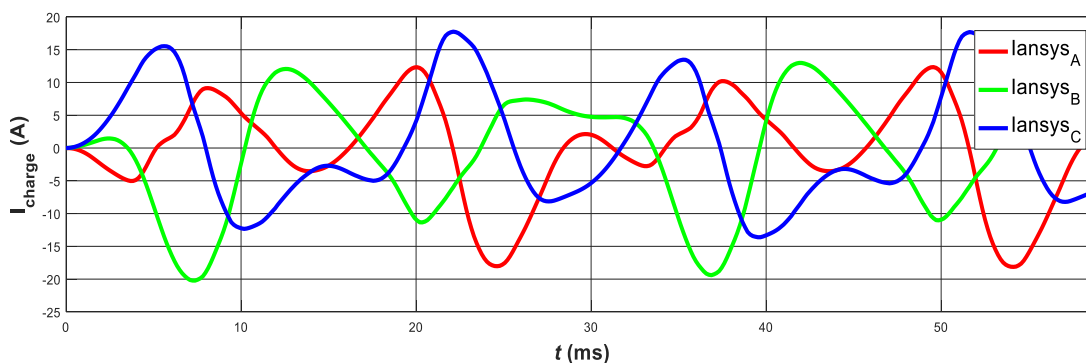


Fonte: Autoria Própria.

3.2.8 Correntes nas bobinas

A partir da simulação quanto a distribuição do campo eletromagnético no interior da máquina, bem como a tensão induzida, faz-se necessário que a carga elétrica associada aos terminais do gerador seja conhecida, para que a corrente seja completamente definida. Logo, uma carga resistiva de 10 Ohms foi adicionada ao projeto resultando uma corrente média (RMS) de 8.45 A.

Figura 26 - Corrente circulando nas bobinas

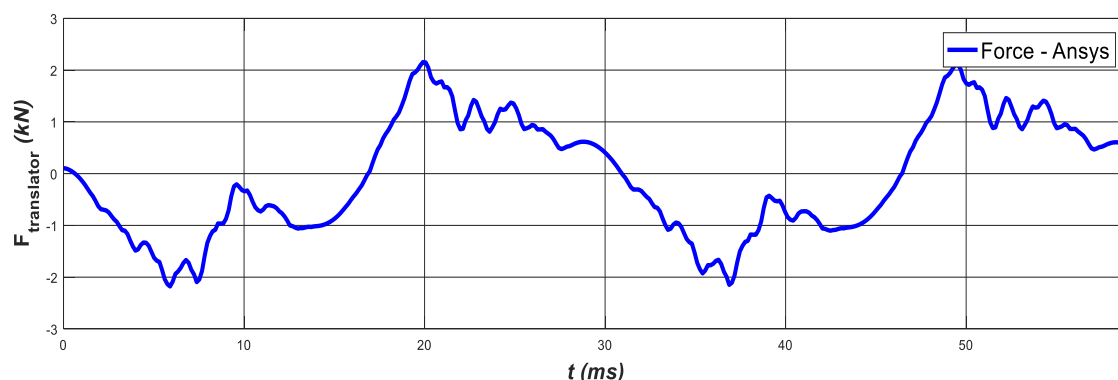


Fonte: Autoria Própria.

3.2.9 Força

A Lei de Lorentz explica que a força sobre a carga é a soma vetorial da força elétrica e da força magnética. A componente elétrica age na mesma direção do campo elétrico, enquanto a componente magnética é perpendicular tanto à velocidade da carga quanto ao campo magnético, direcionando-se conforme a regra da mão direita. (BOLDEA, 2017). A figura 27 apresenta o perfil oscilatório da força gerada.

Figura 27 - Força

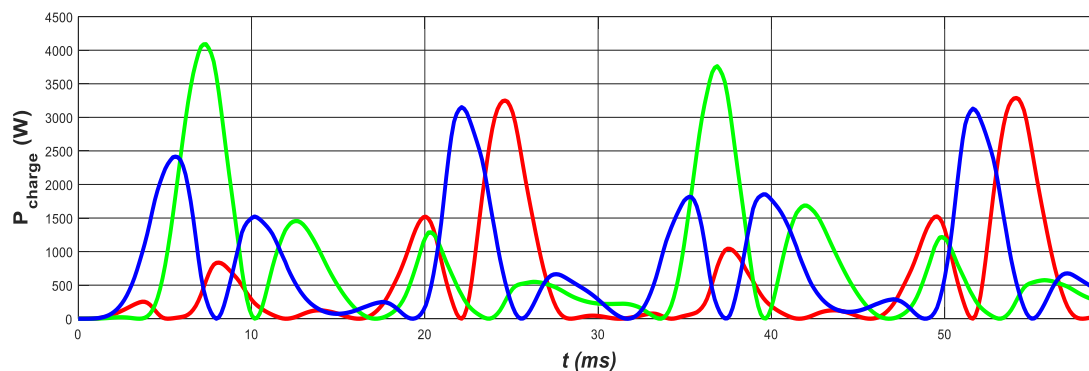


Fonte: Autorial Própria.

3.2.10 Potência elétrica

A potência elétrica trifásica na saída do gerador alcançou valores médios previstos para o projeto tendo em vista a simulação e considerando a escolha da carga resistiva sem atuação direta de qualquer sistema de controle do processo.

Figura 28 - Potência Elétrica entregue a carga



Fonte: Autorial Própria.

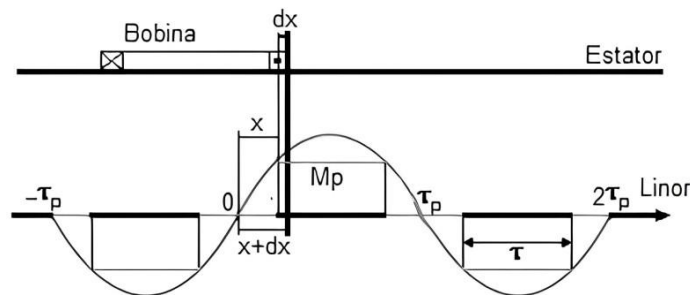
3.3 Modelagem matemática do gerador linear

A modelagem de máquinas elétricas pode ser realizada utilizando métodos analíticos, através de expressões matemáticas, e métodos numéricos, por meio de simulação computacional (RIGOMONTE, 2021). Assim, o GLIP opera nos mesmos princípios físicos básicos que os convencionais geradores rotativos. Logo, o princípio que governa a tensão de operação geradora do alternador é a lei de Faraday.

O deslocamento do eixo na posição horizontal varia conforme o passo polar. Logo o intervalo de x no passo polar pode ser obtido a partir da equação abaixo.

$$x = -(k_p * \tau_p) * \cos(\omega * t_{vec}) \quad (1)$$

Figura 29 - Disposição do movimento do eixo



Fonte: (BOLDEA, 2017 – Adaptado)

A velocidade angular é dada por $\omega = 2\pi f$, em que f é a frequência adotada para oscilação do eixo da máquina. A variável k_p define a quantidade de passos polares a ser executada no deslocamento. A figura 29, por exemplo, tem um $k_p = 3$, ou seja, $-\tau_p$ até $2\tau_p$. O vetor de tempo t_{vec} foi obtido adequando o movimento ao deslocamento a partir do período, $T = 1/f$, e considerando uma quantidade de pontos, Np_{ciclos} , suficientes para garantir uma boa resolução da curva. Vale lembrar que quanto maior o número de pontos melhor a representação da curva, no entanto há maior esforço computacional para execução das simulações. Além disso, o número de ciclos, N_{ciclos} , também pode ser alterado, de acordo com a necessidade das análises.

A velocidade, vL , necessária para cumprir o percurso proposto, em que o eixo linor realiza o movimento translacional pode ser obtida derivando a equação de posição x , conforme equação (2).

$$\frac{dx}{dt} = vL = (k_p * \tau_p) * \omega * \sin(\omega * t_{vec}) \quad (2)$$

O eixo linor tem uma velocidade nula na posição em que há o máximo deslocamento do linor, $4\tau_p$ ou 100 ms , e uma velocidade máxima, em ambas as direções, quando o eixo passa pela posição $\tau_p = 0$. Vale ressaltar que o movimento exercido pelo gerador, aceleração e desaceleração, é dado a partir a impulsão imposta devido à máquina primária que neste estudo trata-se de um motor a pistão livre a ser, futuramente, implementado.

3.3.1 Densidade do Campo Magnético B no entreferro

A obtenção da curva de densidade de campo magnético B proposta por (BOLDEA 2017) baseia-se no valor médio obtido a partir do equacionamento derivado da análise da figura 29, reescrita com base na Série de Fourier. Esta metodologia teórica de obtenção do comportamento eletromagnético no entreferro da máquina é frequentemente usada nas pesquisas científicas, principalmente, devido à base teórica para a análise dos dados (HASSON, 2006, MIKALSEN, 2007, JIA 2016).

$$\overline{M}_F(x) = \frac{1}{2} a_0 + \overbrace{a_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)} + \overbrace{b_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)} \quad (3)$$

A partir dos termos a_0 , a_1 e b_1 é possível compor o perfil do sinal de acordo com os limites de integração. O termo a_0 será nulo, uma vez que o sinal tem características simétricas. Logo, o valor médio será zero.

$$a_0 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) dx \quad (4)$$

$$M_p = H \cdot h_m$$

H – Intensidade do Campo

h_m – Altura do imã

$$a_0 = -M_p \frac{\tau}{\tau_p} + M_p \frac{\tau}{\tau_p}$$

$$\boxed{a_0 = 0}$$

O termo a_1 , também, será nulo. Isto por que a função *coseno* obtida no equacionamento é uma função par. Assim:

$$a_1 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx \quad \alpha = \frac{\pi}{2\tau_p} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{M_p}{\pi} [-2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)] + \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)] \quad (6)$$

$$\boxed{a_1 = 0}$$

Por conseguinte, o termo resultante da equação será o b_1 .

$$b_1 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \sin(\alpha\tau_p)] + \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)] \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{4M_p}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi\tau}{2\tau_p}\right) \right] \quad (9)$$

A média obtida a partir da equação (10) é fruto da resolução do equacionamento proposto em (3).

$$\overline{M_F}(x) = \frac{4M_p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{2\tau_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x\right) \quad (10)$$

O equacionamento (03) propunha a magnetização a partir da função $\overline{M_F}(x)$. No entanto, para que a característica do sinal do campo magnético B esteja de acordo com os parâmetros reais da máquina é necessário que a curva B seja obtida com base em análises utilizando o método analítico em conjunto com os softwares de Elementos Finitos como FEM, ANSYS® e outros.

3.3.2 Modelagem Harmônica

A modelagem harmônica em geradores lineares a ímã permanente é um tópico crucial dentro do campo da engenharia elétrica, especialmente no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia renovável, como a energia das ondas e marés. Este tipo de gerador é caracterizado pela utilização de ímãs permanentes para induzir uma força eletromotriz (FEM) em um conjunto de bobinas, quando há movimento relativo entre os ímãs e as bobinas.

Conforme já mencionado os geradores lineares a ímã permanente operam com base na lei de Faraday da indução eletromagnética, onde uma variação no fluxo magnético ao longo do tempo induz uma tensão elétrica. Diferente dos geradores rotativos tradicionais, os geradores lineares apresentam um movimento translacional que é diretamente convertido em energia elétrica, tornando-os ideais para aplicações onde há um movimento linear natural, como em sistemas de energia das ondas.

A análise harmônica em geradores lineares é essencial para entender e mitigar os efeitos das distorções harmônicas que podem ocorrer no sinal de saída. Essas distorções são causadas por várias razões, incluindo a não-linearidade dos materiais magnéticos, a geometria do gerador, e a forma das ondas de entrada (movimento).

A modelagem precisa da distribuição do campo magnético é fundamental para prever a performance do gerador. Métodos numéricos, como o método dos elementos finitos (FEM), são frequentemente utilizados para simular o comportamento do campo magnético e suas interações com as bobinas.

A presença de harmônicos pode resultar em perdas adicionais, aquecimento excessivo e interferências eletromagnéticas. A transformada de Fourier (FFT) é uma ferramenta comumente utilizada para decompor os sinais de tensão e corrente em seus componentes harmônicos.

Existem várias técnicas para a mitigação de harmônicos, incluindo o design otimizado da estrutura do gerador, o uso de materiais magnéticos com menor histerese e perdas, e a implementação de filtros harmônicos no sistema de eletrônica de potência associado ao gerador.

Os geradores lineares a ímã permanente são particularmente adequados para conversores de energia das ondas, onde o movimento oscilatório das ondas pode ser diretamente convertido em energia elétrica sem a necessidade de mecanismos intermediários de conversão de movimento. A análise harmônica nesse contexto é crucial para garantir uma operação eficiente e a longevidade do sistema.

A modelagem e simulação de protótipos de geradores lineares envolvem a integração de várias disciplinas, incluindo a eletromagnética, mecânica dos materiais e eletrônica de potência. O desenvolvimento de modelos precisos permite prever o desempenho do gerador sob diferentes condições operacionais e otimizar o design antes da construção de protótipos físicos.

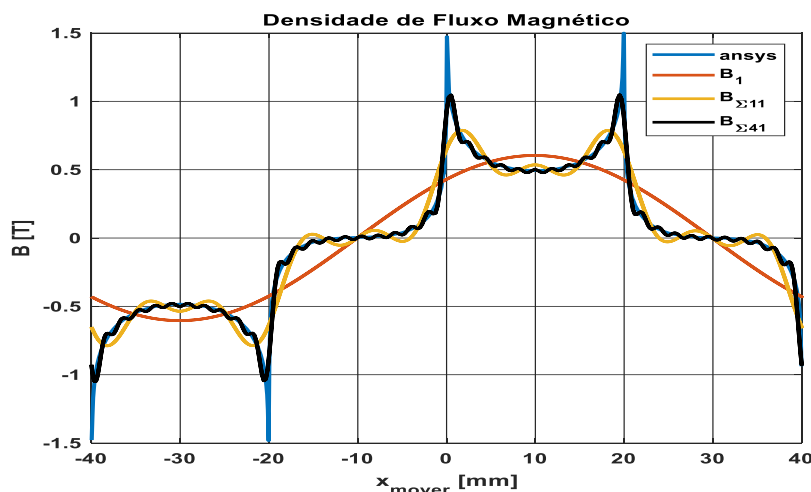
A modelagem harmônica em geradores lineares a ímã permanente é uma área complexa e interdisciplinar que requer uma compreensão profunda dos princípios eletromagnéticos e das técnicas de análise numérica. O avanço nessa área promete melhorias significativas na eficiência e viabilidade de sistemas de energia renovável, contribuindo para um futuro mais sustentável.

De posse dos dados da curva de magnetização é possível fazer a reescrita da equação através de Séries de Fourier utilizando o somatório de cossenos e adicionando as fases para cada componente harmônio. Logo, o campo magnético recomposto é dado por:

$$\overline{B_h(x)} = B_h \cos\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) \quad (11)$$

A composição do sinal de harmônicos com amplitude e fase, B_h e ϕ_h , foi obtida com base no método semianalítico. Neste, a curva B, obtida por métodos numéricos, fornece os dados que são decompostos analiticamente gerando um novo sinal com as componentes harmônicas definidas.

Figura 30 – Densidade magnética B no entreferro



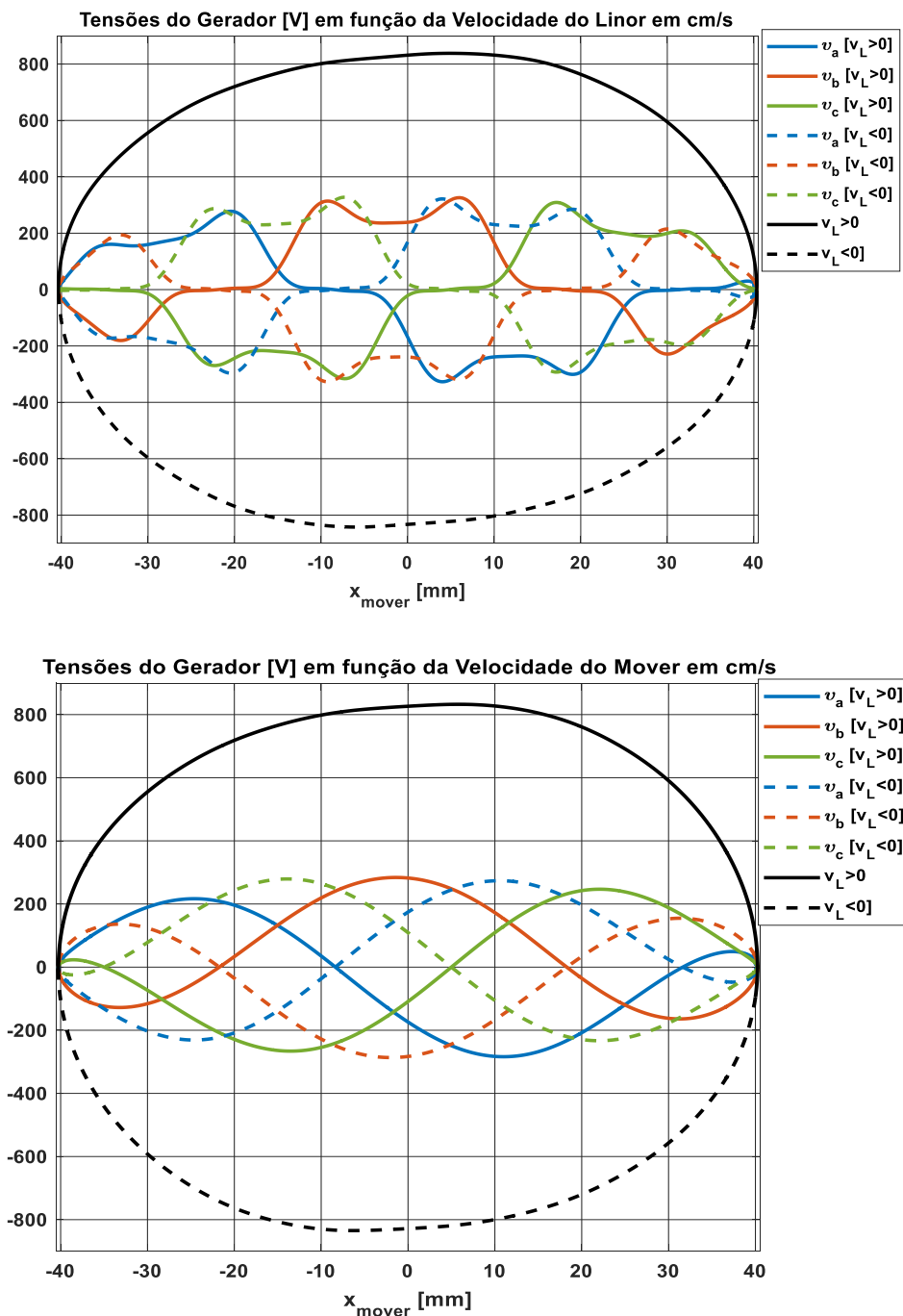
Fonte: próprio autor

De maneira geral, a densidade de fluxo $B(x)$ causada pela excitação do imã no entreferro pode ser obtida através do método analítico combinado com a análise numérica. A Figura 30 ilustra a implementação do método analítico, considerando a curva de densidade magnética derivada das simulações por elementos finitos realizadas no software ANSYS®. Além disso, a componente de 1º harmônico, integrante do sinal, é apresentada, bem como os sinais com 11 e 41 harmônicos. A evolução do comportamento magnético no entreferro é evidenciada ao longo do deslocamento do linor durante dois períodos (de - 40 mm a 40 mm).

A disposição do comportamento da densidade magnética no entreferro irá sofrer alteração devido à relação de direta com a velocidade de trabalho do gerador. Assim a figura 31 apresenta o perfil de tensão baseado na presença, ou não, dos harmônicos existentes no sinal. Vale destacar, que linor se desloca em sentidos horizontais opostos de modo que a velocidade máxima ocorre na posição de referência (0 mm). Apesar de as simulações serem realizadas usando uma carga resistiva, o comportamento não linear da curva de densidade magnética influencia no pico de tensão de cada uma das fases.

Logo a amplitude máxima da fase **b** (v_b), por exemplo, ocorre na velocidade máxima do linor, enquanto que as fases **a** e **c** (v_a e v_c) manifesta a amplitude de tensão em 25 mm (sentido “negativo”) e 22 mm (sentido “positivo”), respectivamente.

Figura 31 – Tensão x Velocidade (com e sem harmônicos)



Fonte: próprio autor

A distorção harmônica causada no sinal de tensão com a presença de harmônicos de ordem mais elevada (41°) disposta na figura 31 ressalta a importância de considerar a existência desses parâmetros na modelagem da máquina. Assim, a modelagem

harmônica destaca-se pela fidelidade dos dados em relação às características do comportamento do gerador a ser comprovado a partir das informações experimentais futuras.

A análise da tensão de saída de um gerador linear a ímã permanente em função da velocidade da máquina é crucial para entender o comportamento dinâmico do sistema e identificar a presença de distorções harmônicas (GYSEN, 2011). Em condições ideais, a tensão de saída de um gerador linear a ímã permanente possui uma forma senoidal quando composta apenas pela harmônica fundamental (primeira ordem). A magnitude desta tensão fundamental é diretamente proporcional à velocidade da máquina, conforme a Lei de Faraday da Indução Eletromagnética (BOLDEA, 2015). Já a introdução de harmônicas de ordem superior ($n > 1$) no sinal de tensão provoca distorções na forma de onda. Essas harmônicas podem surgir devido a: Imperfeições na construção do gerador (ex. desbalanceamento dos ímãs, falhas de alinhamento); Não linearidades dos materiais magnéticos; e também efeitos de borda e saturação magnética. As harmônicas de ordem superior (3ª, 5ª, 7ª, etc.) introduzem componentes adicionais na forma de onda, resultando em uma tensão de saída que se afasta da forma senoidal pura. A análise espectral, usando a transformada de Fourier (FFT), pode ser utilizada para identificar a presença e a magnitude dessas harmônicas.

Ao analisar o gráfico da tensão em função da velocidade, figura 31, diversas observações podem ser feitas:

- A tensão fundamental tende a aumentar linearmente com a velocidade. Qualquer desvio significativo da linearidade pode indicar a presença de não-linearidades ou saturação no sistema magnético.
- A amplitude das harmônicas de ordem superior também pode variar com a velocidade. Em alguns casos, certas harmônicas podem se tornar mais proeminentes a determinadas velocidades, indicando ressonâncias ou pontos de operação menos eficientes do gerador.

A presença de harmônicas de ordem superior geralmente resulta em perdas adicionais devido ao aquecimento dos componentes e ao aumento das perdas por histerese e correntes parasitas. Portanto, minimizar essas harmônicas é crucial para a eficiência do gerador. Além disso, a qualidade da energia gerada é afetada pela distorção harmônica. Em aplicações práticas, um sinal de tensão com alta distorção

pode causar problemas em dispositivos conectados e requerer o uso de filtros adicionais para limpeza do sinal. Entender esses aspectos é essencial para otimizar o design do gerador e garantir uma operação eficiente e confiável.

Considerando que o fluxo magnético é variável de acordo com a posição do linor, este fluxo é calculado em cada posição dx . Por conseguinte, o fluxo devido ao campo magnético em uma área pode ser obtido decompondo a variação da área dA em um elemento diferencial dx (NIU, 2013).

$$\Phi = B(x).A \quad (12)$$

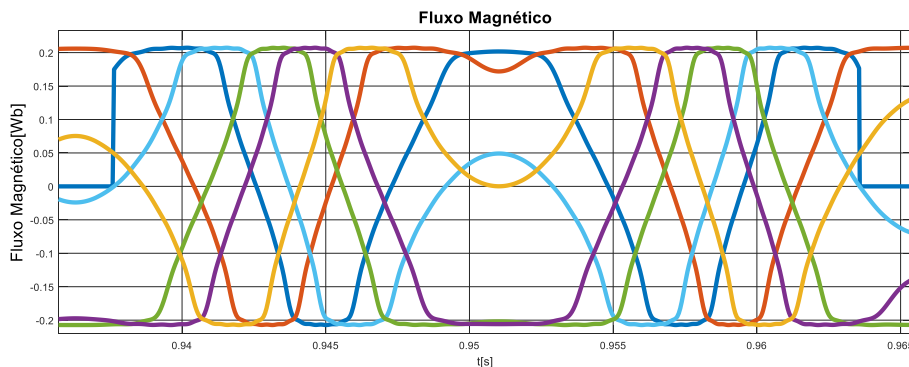
$$d\Phi = B(x).dA \quad (13)$$

$$d\Phi = B(x).L_{Comp}dx \quad (14)$$

A variável L_{Comp} representa o comprimento da área em que há fluxo magnético na bobina. A partir do somatório do elemento infinitesimal dx é possível obter o fluxo total na bobina em qualquer posição x no caminho de deslocamento do eixo-linor com base na lei de Lenz (BOLDEA, 1997).

$$\lambda(x) = \int_{x-\tau_p}^x N_{Coil}L_{Comp} \sum_{h=1}^H B_h \cos(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h) dx \quad (15)$$

Figura 32 – Fluxo magnético nas bobinas



Fonte: próprio autor

A distribuição do campo ao longo do deslocamento possui somente harmônicos de ordem ímpar, uma vez que os harmônicos pares não influenciam diretamente no sistema, conforme visto em (16).

$$[1 - \cos(h\pi)] \begin{cases} 2 - Se h \text{ ímpar} \\ 0 - Se h \text{ par} \end{cases} \quad (16)$$

O fluxo magnético na bobina pode ser mensurado a partir da equação (17).

$$\lambda(x) = \sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \frac{\tau_p}{h\pi} \sin\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) \quad (17)$$

A quantidade de linhas de fluxo magnético que atravessa as bobinas irá determinar a intensidade da tensão induzida nos terminais do enrolamento. Assim, o fluxo concatenado em cada fase, pode ser visto na figura 32 que representa uma parcela das curvas no intervalo de 2 passos polares.

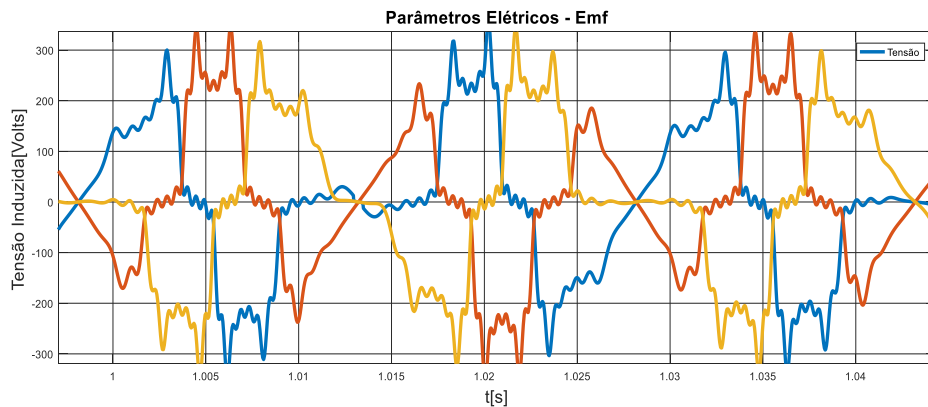
3.3.3 Tensão Induzida

Com base na lei de Lenz-Faraday, a variação do fluxo magnético no tempo aplicada a uma bobina gera uma força eletromotriz que se opõe ao movimento da fonte que o gerou (BOLDEA, 2017). Com isso, pode ser visto, nos terminais da bobina, uma tensão induzida E_{emf} “negativa” que depende da velocidade de translação do linor, bem como do comportamento da curva de densidade de campo magnético. Vale lembrar que $\frac{dx}{dt} = v_{vel}$ representa a velocidade em que o linor se desloca horizontalmente.

$$E_{emf} = -\frac{d\lambda(x)}{dt} \quad (18)$$

$$\frac{d\lambda(x)}{dt} = -\sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \frac{\tau_p}{h\pi} \cos\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) h \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \quad (19)$$

Figura 33 – Tensão induzida nas bobinas



Fonte: próprio autor

$$E_{emf}(x, t) = -\sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \cos\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) v_{vel}(t) \quad (20)$$

Estimada a distribuição do campo eletromagnético no interior da máquina, bem como a tensão induzida, é necessário que o circuito elétrico associado aos terminais do

gerador seja conhecido, para que a corrente seja completamente definida. O diagrama esquemático do modelo monofásico da máquina pode ser representado a partir dos parâmetros do circuito elétrico ($E_{emf}(x, t)$, L_s , R_s e R_L).

$$E_{emf}(x, t) = (R_s + R_L)i_L + L_s \frac{di_L(t)}{dt} \quad (21)$$

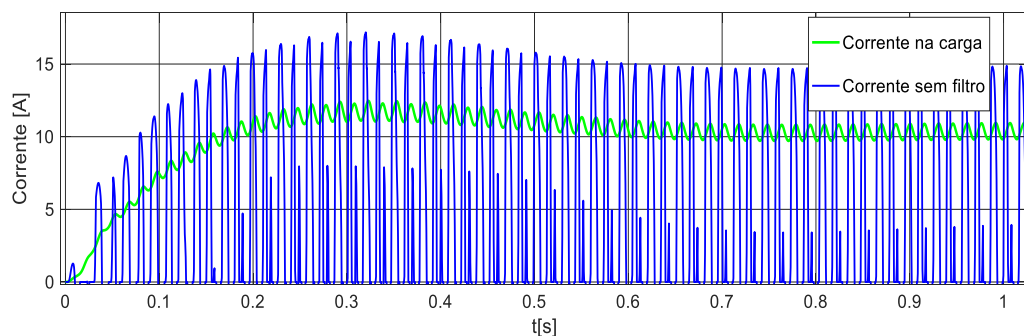
Os enrolamentos das bobinas são representados por R_s (resistência) e L_s (indutância) e a resistência da carga por R_L .

3.3.4 Correntes

A resolução do equacionamento da corrente por meio da modelagem matemática não é trivial, já que este parâmetro depende do deslocamento dos imãs, velocidade do sistema e força aplicada.

As correntes foram calculadas utilizando o método numérico (função ode45 – esta função resolve equações diferenciais não rígidas de ordem média – Range Kutta) – APENDICE. Logo, o equacionamento representativo das correntes a partir de um circuito puramente DC não corresponde às características reais das correntes geradas. Isso ocorre devido o movimento translacional de comportamento pendular do gerador

Figura 34 - Correntes nas Bobinas e na Carga



Fonte: próprio autor

projetado. Além disso, a corrente gerada passara por um processo de filtragem para adequação ao perfil da carga.

A figura 34 elenca a comparação do perfil de corrente manifestado nas bobinas, oriundo das tensão induzidas propriamente ditas, em contrapartida às correntes na carga que possuem um comportamento mais suavizado devido a atuação dos filtros.

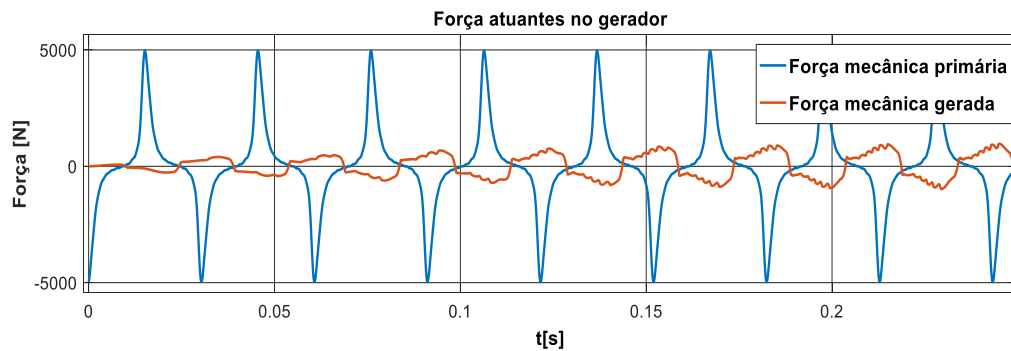
3.3.5 Força gerada

A partir da lei de Lorentz pode ser expressa a força que tem o sentido oposto em relação à direção do movimento do linor.

$$F_{em}(x, t) = 2HN_{coil}B(x)i_L(t) \quad (22)$$

Conforme a lei de Lenz a força máxima produzida pelo campo magnético ocorre quando o vetor B está defasado de 90° da corrente no enrolamento (BOLDEA, 2017). Logo, surgirá uma força, atuando perpendicularmente ao condutor de corrente, em sentido contrário ao movimento do linor. A figura 35 demonstra o perfil das forças de entrada, F_{mec} , em comparação com a força gerada, F_{ger} .

Figura 35 - Força gerada

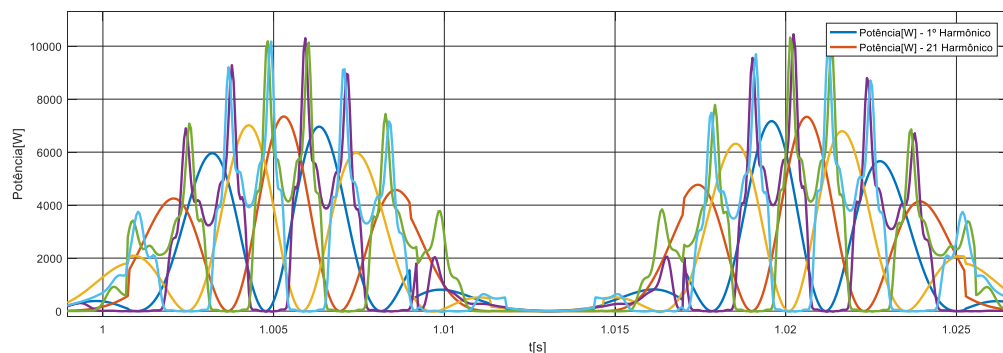


Fonte: próprio autor

Vale notar que, em ambos os sentidos de atuação da força aplicada tem-se uma tentativa de anulação desta por meio da força gerada.

A aplicação da força em Newtons necessária para ativação do movimento deve ser objeto de implementação da máquina primária que neste caso será o motor de pistão livre em que o gerador será acoplado.

Figura 36– Potência entregue pelo gerador



Fonte: próprio autor

3.3.6 Potência

A potência elétrica gerada pode ser obtida diretamente através da equação geral de potência

$$P = Ri_L^2 \quad (23)$$

Considerando a potência total nas três fases tem-se que:

$$P = R(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \quad (24)$$

A presença de harmônicos (condição mais próxima da realidade) aumenta o fornecimento de potência média do gerador. No entanto, há uma perda na qualidade do sinal conforme figura 36.

A estimativa de geração de potência entregue a carga gira em torno de 3kW, de acordo com as dimensões da máquina projetada. Para tanto, a simulação analítica apresentada considerou o produto da tensão induzida gerada nos terminais das bobinas, bem como as correntes impostas às cargas resistivas do circuito. Isto atendeu as expectativas iniciais obtendo uma potência média gerada, sem a presença do controle, em torno de 2.94 kW.

3.4 **Modelagem dinâmica**

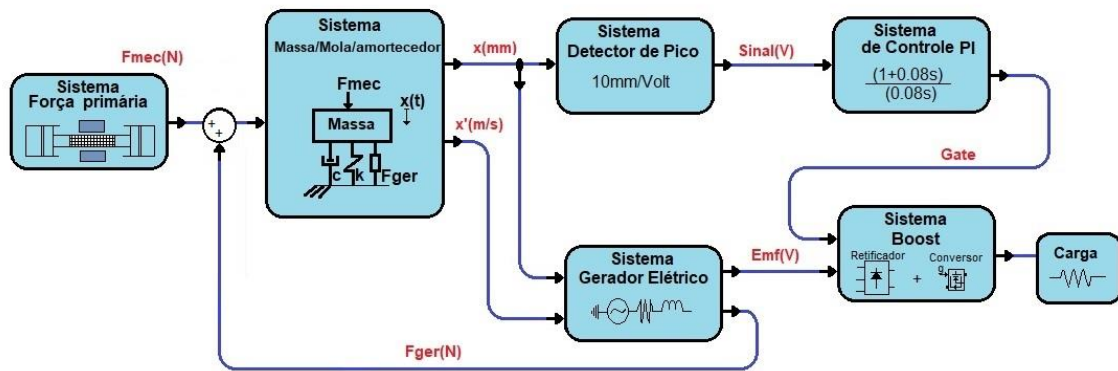
A força gerada na máquina é intrinsecamente dependente de diversos fatores, tais como a intensidade do campo magnético, a configuração das bobinas (quantidade de espiras), o número de polos, a corrente circulante no circuito e a velocidade de deslocamento do núcleo do gerador. Esta formulação reflete a contribuição da força, sendo proporcional à velocidade de deslocamento do referido núcleo (GYSEN, 2011). É pertinente ressaltar que, se a força proveniente da máquina primária for devidamente simplificada, a equação dinâmica do gerador de motor a pistão livre (MGLPL) pode ser submetida a uma linearização adequada. Nesse contexto, o sistema resultante pode ser concebido como uma vibração forçada, proporcionando uma abordagem analítica mais acessível para o estudo do comportamento dinâmico do gerador (BENTO, 2019).

Vale destacar que a força gerada F_{ger} depende da topologia do gerador, da frequência da atuação, da posição e da velocidade do linor, e ainda da carga elétrica conectada aos terminais do gerador. Para (BENTO, 2019) a magnitude da força manifestada em um sistema é influenciada por diversos parâmetros, entre os quais se incluem a intensidade do campo magnético, a configuração das bobinas (isto é, o

número de espiras), a quantidade de polos magnéticos presentes, a corrente elétrica percorrendo o circuito, bem como a velocidade de deslocamento do núcleo do gerador.

O acionamento do linor por meio de uma força externa é representado através do sistema mecânico (“massa/mola/amortecedor”) em que há o equilíbrio de forças contendo um grau de liberdade (1 GDL). Logo, a relação entre o equacionamento mecânico e elétrico pode ser obtido por meio do desdobramento das equações (28) e (29).

Figura 37 – Fluxograma do modelo dinâmico



Fonte: Próprio autor

$$m_t \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F_{mec}(t) - F_{ger}(t) \quad (28)$$

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i(t) + \frac{1}{c} \int i(t) dt = E_{emf}(t) \quad (29)$$

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1 + \frac{1}{c} \int i_1 dt = E_{emf_1} \quad (30)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 \cdot i_2 + \frac{1}{c} \int i_2 dt = E_{emf_2} \quad (31)$$

$$L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 \cdot i_3 + \frac{1}{c} \int i_3 dt = E_{emf_3} \quad (32)$$

Relacionando a Equação Diferencial Ordinária (EDO) mecânica com o equacionamento elétrico é possível reescrever os dados em forma matricial.

$$\begin{bmatrix} m_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \frac{di_3}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \int i_1 \\ \int i_2 \\ \int i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{mec} - F_{ger} \\ E_{emf_1} \\ E_{emf_2} \\ E_{emf_3} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Para facilitar a análise foi considerado um sistema RL (sem capacitância). Logo, reorganizando as matrizes temos que:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix}, [c] = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix}, [k] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$[F_r] = \begin{bmatrix} F_{mec} - F_{ger} \\ E_{emf_1} \\ E_{emf_2} \\ E_{emf_3} \end{bmatrix}, [Y] = \begin{bmatrix} x \\ \int i_1 \\ \int i_2 \\ \int i_3 \end{bmatrix} \quad (35)$$

A partir de uma notação simplificada é possível obter a equação abaixo:

$$[m][\ddot{Y}] + [c][\dot{Y}] + [k][Y] = [F_r] \quad (36)$$

Para realizar a mudança de variável utiliza-se o artifício matemático descrito abaixo:

$$[m][\ddot{Y}] + [c][\dot{Y}] + [k][Y] = [F_r] \quad (37)$$

$$[m][\dot{Y}] - [m][\dot{Y}] = 0 \quad (38)$$

Fazendo então a transformação de variável

$$[Z] = \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ Y \end{bmatrix} \text{ e } [\dot{Z}] = \begin{bmatrix} \ddot{Y} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} [m] & [0] \\ [0] & [m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [c] & [k] \\ -[m] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [F_r] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$[A][\dot{Z}] + [B][Z] = [F_{estado}] \quad (41)$$

Isolando a variável \dot{Z} temos que:

$$[\dot{Z}] = [A]^{-1}([F_{estado}] - [B][Z]) \quad (42)$$

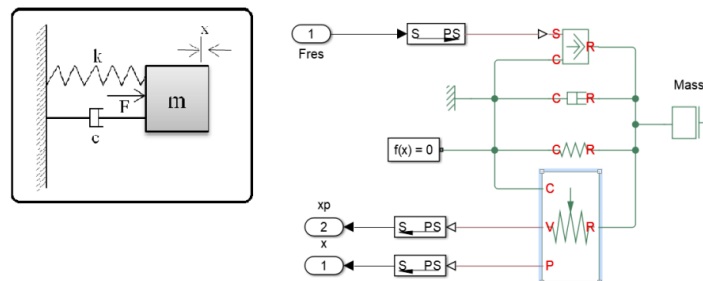
$$\text{Com, } [A]^{-1} = \begin{bmatrix} [m]^{-1} & [0] \\ [0] & [m]^{-1} \end{bmatrix} \text{ e } [m]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/m_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_3 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$[F_{estado}] = \begin{bmatrix} F_{mec} - F_{ger} \\ E_{emf_1} \\ E_{emf_2} \\ E_{emf_3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

A partir da obtenção dos dados em espaço de estado foi possível relacionar o sistema mecânico com o elétrico visando simular o sistema em ambiente computacional com auxílio do Matlab®/Simulink®. Desse modo, é possível visualizar que as forças inerentes ao sistema em questão demonstram uma relação de proporcionalidade com a velocidade de deslocamento do referido gerador bem como com representatividade das tensões induzidas.

O sistema SMD pode ser visto como a representação do sistema mecânico e eletromagnético atuando em conjunto. Cada elemento reflete o comportamento de um parâmetro. O “k da mola” defini as perdas mecânicas contrárias ao movimento do linor. Além disso, este coeficiente tem sido objeto de estudos constantes no escopo

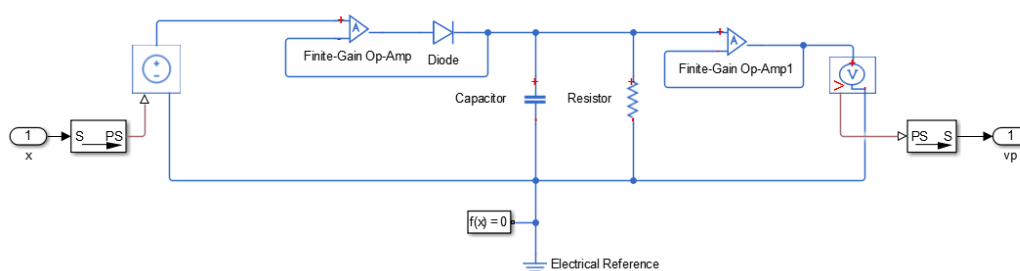
Figura 38 – Sistema massa/mola/amortecedor - Simulink®



Fonte: próprio autor

de projetos mecânicos de máquinas, haja vista que a influência considerável do perfil elástico da mola tem relação direta com comportamento do sistema como um todo (RODRIGUES, 2019), (BENTO, 2019), (RIGOBELLO, 2020) e (MELO, 2020). Já o coeficiente “c” representa as perdas por atrito incluídas no sistema. A figura 38 mostra estes parâmetros inseridos na plataforma Simulink® do Matlab®, onde foram realizadas as simulações do sistema dinâmico. Vale destacar, que os valores das variáveis foram definidas a partir de estudos anteriores iniciados por (RODRIGUES, 2019), (BENTO, 2019), (RIGOBELLO, 2020) e (MELO, 2020).

Figura 39 - Sistema detector de pico - Simulink®

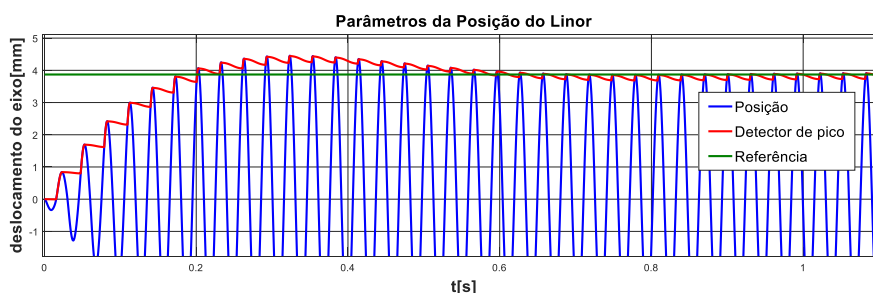


Fonte: próprio autor

O sistema detector de pico, figura 39, faz a transformação do sinal de distância em dados com características de parâmetro elétrico. Neste caso a conversão foi de 10mm/volt. Logo, foi possível observar o comportamento do linor sem que haja saturação dos elementos eletrônicos. O amplificador operacional atua em conjunto com o diodo anulando a parte negativa da onda e supervisionando as ações do sinal de entrada que excedem o valor de referência estipulado. Já os elementos resistivos e capacitivos do circuito eletrônico ($R = 2.2 \text{ k}\Omega$ e $C = 1 \mu F$) funcionam como um filtro capacitivo permitindo que o tempo de descarga do capacitor seja muito maior que o período do sinal de entrada o que faz com que o detector atue somente nos valores máximos.

O “erro” concebido pela variação do sinal de saída servirá de base para implementação do controlador que por sua vez irá prever a utilização deste erro existente como parâmetro de controle.

Figura 40 – Curva do sistema detector de pico



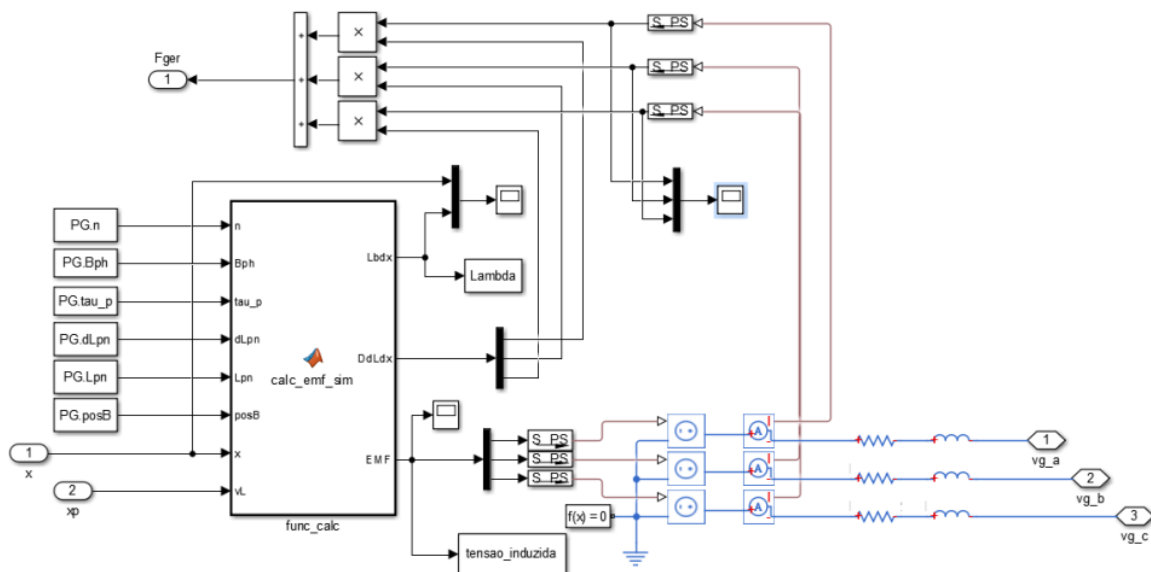
Fonte: próprio autor

O Gerador Linear a Imã Permanente é o principal objeto de estudo desenvolvido nesta pesquisa. Assim, a figura 41 elucida a demonstração sucinta do gerador implementado no ambiente *Simulink®/Matlab®*. A partir dela é possível notar o comportamento das variáveis estudadas, bem como a interpretação dos dados analisados

com base na atuação do sistema de controle, ou ainda, a partir do estudo das informações sem o controle atuando.

A partir das informações fornecidas pelo equacionamento matemático foi possível condensar os dados necessários para esta análise dinâmica do sistema. Além disso, outras funções foram utilizadas nos cálculos das variáveis mais significativas do sistema.

Figura 41 – GLIP



Fonte: próprio autor

3.5 Estratégia de controle

O sistema de controle de máquinas elétricas lineares pode ser vista como uma área bastante abrangente. Sua importância decorre do fato de que boa parte dos aprimoramentos das máquinas está vinculada às estratégias de controle escolhida (NISE, 2012). Sendo assim, o estudo realizado nesta pesquisa apresenta um modelo relativamente otimizado para a solução do problema de controle do gerador. Este estudo busca direcionar o controle do eixo linar baseado no deslocamento de 1 passo polar, ou seja, 40 mm em sentido bidirecional. Vale lembrar que a frequência constante de atuação no deslocamento, e velocidade, do linar apresenta uma possível estabilidade do sistema. Isso diminui, em partes, a necessidade de um controle mais fino além de reduzir os gastos com recursos para implementação física do controlador. No entanto, o controle de posição do linar, dado pelo condicionamento da corrente é primordial para o melhoramento do movimento harmônico do linar, bem como da eficiência de gerador.

Uma parte considerável das pesquisas direcionadas aos geradores e motores a pistão livre direcionam seus esforços no sentido de controlar o movimento do linor a partir da taxa de compressão resultante da câmara de combustão existente na máquina primária de acionamento do gerador (MPL).

De modo geral, o sistema de controle completo (com controlador, conversor etc) pode ser considerado como uma fonte controlada de corrente. Para tanto, em um primeiro momento o emprego do controlador proporcional-integral (PI) no domínio contínuo apresenta-se como uma das alternativas para implementação, designando a massa de combustível como variável de controle para regular o ponto morto superior e a massa de ar para regular o ponto morto inferior (MIKALSEN, ROSKILLY, 2010). No entanto, a fase de construção do sistema físico do controlador pode exigir que haja modificação no modelo do controlador. Assim, dentre os vários modelos de controlador é possível citar o PI, PID e “P Ressonante”.

O controlador PI, uma configuração amplamente utilizada em sistemas de controle, combina as ações proporcional (P) e integral (I). A ação proporcional é diretamente proporcional ao erro atual, enquanto a ação integral é responsável pela correção do erro acumulado ao longo do tempo. Essa combinação permite que o controlador PI elimine o erro em regime permanente, sem aumentar significativamente a complexidade do sistema. Além disso, o controlador PI é frequentemente utilizado em processos onde a eliminação do erro de estado estacionário é crucial, como em sistemas de controle de temperatura, pressão e nível. Já o controlador PID é uma extensão do modelo PI com a adição da ação derivativa (D). Esta componente derivativa atua com base na taxa de variação do erro, proporcionando uma previsão de sua evolução futura, o que melhora a estabilidade do sistema e minimiza o sobressinal (overshoot). Astrom e Hagglund (1995) destacam que o controlador PID é um dos mais amplamente aplicados em sistemas industriais devido à sua versatilidade e eficácia em uma ampla gama de aplicações, desde controle de posicionamento até processos químicos complexos. Em contrapartida o controlador P Ressonante é menos discutido na literatura clássica, mas pode ser entendido como uma abordagem que enfatiza a adaptação contínua às variabilidades do sistema. Este tipo de controlador é particularmente útil em sistemas não lineares ou em situações onde há mudanças frequentes nas condições de operação. Na prática, pode ser implementado em sistemas que exigem ajuste contínuo e dinâmico,

como mencionado por Guo e Zhang (2017), em seu estudo sobre controle adaptativo em sistemas não lineares .

Tabela 4 - Tipos e aplicações do controlador

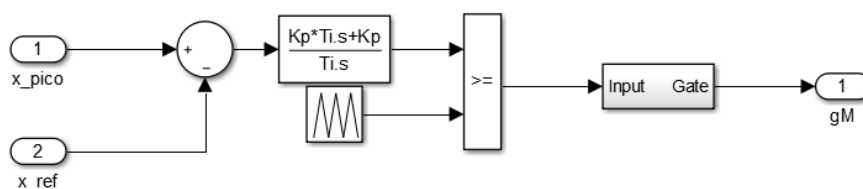
Tipo de Controlador	Aplicações Principais
PI (Proporcional-Integral)	<ul style="list-style-type: none"> - Controle de processos industriais com dinâmica simples - Controle de velocidade de motores e sistemas eletromecânicos - Aplicações onde a precisão a longo prazo é prioritária
PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	<ul style="list-style-type: none"> - Controle de processos industriais complexos - Sistemas de navegação e servo-mecanismos - Automação industrial e robótica
P Ressonante	<ul style="list-style-type: none"> - Controle de sistemas dinâmicos não lineares - Sistemas de energia renovável com variabilidade alta - Controle de movimento avançado e robótica adaptativa

Fonte: Guo e Zhang (2017)

A tabela 4 resume as principais áreas de aplicação de cada tipo de controlador, destacando como cada um é utilizado conforme as características e requisitos específicos dos sistemas de controle.

A partir da robustez e da simplicidade de atuação, o controlador PI mostrou-se uma excelente alternativa de implementação. Assim, os ganhos do PI ($K_p = 0.08$ e $T_i = 1$) definem o comportamento do controlador que atuará na resultante da diferença entre a posição de referência e o sinal advindo do detector de pico, figura 42.

Figura 42 – Controlador e portadora



Fonte: próprio autor

Vale ressaltar que a atuação não incide diretamente sobre a perturbação $F_{mec}(t)$, a análise dos polos e zeros da planta global do sistema para determinar estabilidade, tempo de subida e demais parâmetros característicos dos métodos clássicos de controle ativo não se mostra justificada. Isso se deve ao fato de que questões como

instabilidades ou saturação do controlador são consideradas de menor relevância nesse contexto específico.

Na modelagem de um controlador, a determinação dos critérios de projeto é essencial para assegurar a estabilidade e o desempenho desejado do sistema. Neste trabalho, os ganhos proporcional e integrativo foram estabelecidos utilizando uma abordagem baseada em tentativa e erro, onde um dos ganhos foi fixado enquanto o outro foi ajustado até que o sistema alcançasse a estabilização. Especificamente, utilizou-se um ganho correspondente a 80 milissegundos, valor este que representa uma frequência cinco vezes menor que a frequência mecânica de atuação do sistema. Essa escolha está em conformidade com os critérios de projeto recomendados na literatura, que sugerem que o ganho de tempo do controlador deve estar entre 5 e 100 vezes menor que a frequência mecânica do sistema para garantir uma resposta eficaz e estável (Åström & Murray, 2008; Ogata, 2010). Dessa forma, o controlador projetado atende aos requisitos estabelecidos, assegurando a estabilidade do sistema e o cumprimento dos critérios de desempenho desejados. Consequentemente, os parâmetros proporcional e integrativo foram ajustados até que fosse observada, de forma gráfica, a obtenção de um erro nulo em regime e um tempo de resposta adequado.

A função da portadora triangular é fornecer um sinal de referência que é comparado com o sinal de erro do sistema. O sinal de erro é a diferença entre a saída desejada e a saída real do sistema. A portadora triangular é geralmente utilizada em sistemas de modulação de largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*), em que a largura do pulso do sinal de controle é ajustada de acordo com a relação entre a portadora triangular e o sinal de erro (RASHID, 1999).

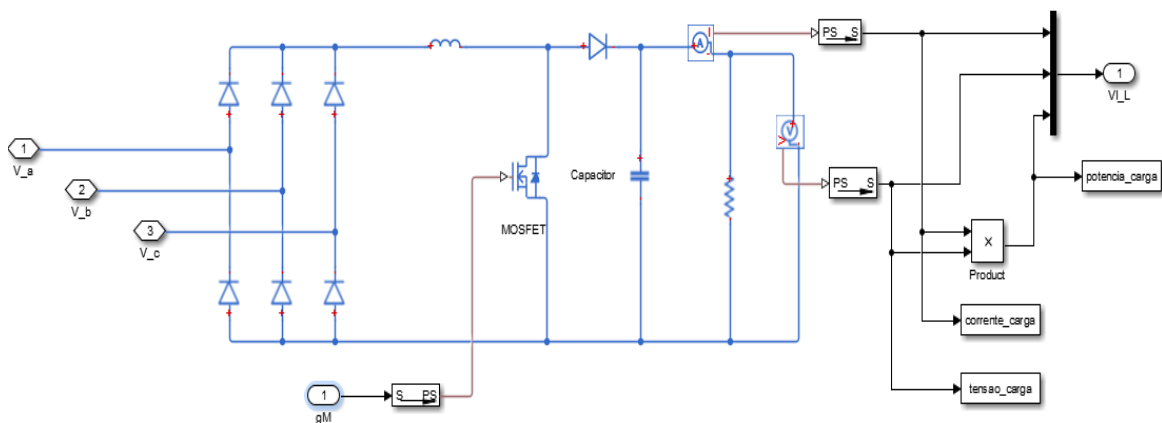
No contexto de um controlador, a portadora triangular é frequentemente usada para modular a parte integral do sinal de controle. Isso significa que a área sob o sinal de erro é comparada com a área sob a portadora triangular, determinando assim a quantidade de integração aplicada ao sinal de controle. Essa abordagem é comumente empregada em sistemas de controle de conversores de potência, inversores, acionamentos de motores, entre outros dispositivos e sistemas industriais.

O conversor desempenha a função de elevar, ou diminuir, o sinal de tensão de entrada em relação ao valor de saída, visando sua utilização na carga designada. Esse processo inicia-se com a retificação das tensões trifásicas por um retificador de onda

completa, resultando em tensão contínua. Posteriormente, os dados passam por um filtro composto por capacitores e indutores, dimensionados conforme o *ripple* desejado (RASHID, 1999).

Outro componente chave desse sistema é o MOSFET, responsável pelo chaveamento do sinal. Em conjunto com o diodo, presente no circuito, direciona a parcela positiva do sinal. A presença do circuito retificador é fundamental para estabelecer curvas contínuas de tensão e corrente elétricas, permitindo o controle adequado do conversor. Os elementos capacitores e indutores colaboram para a estabilização das curvas de tensão e

Figura 43 – Conversor



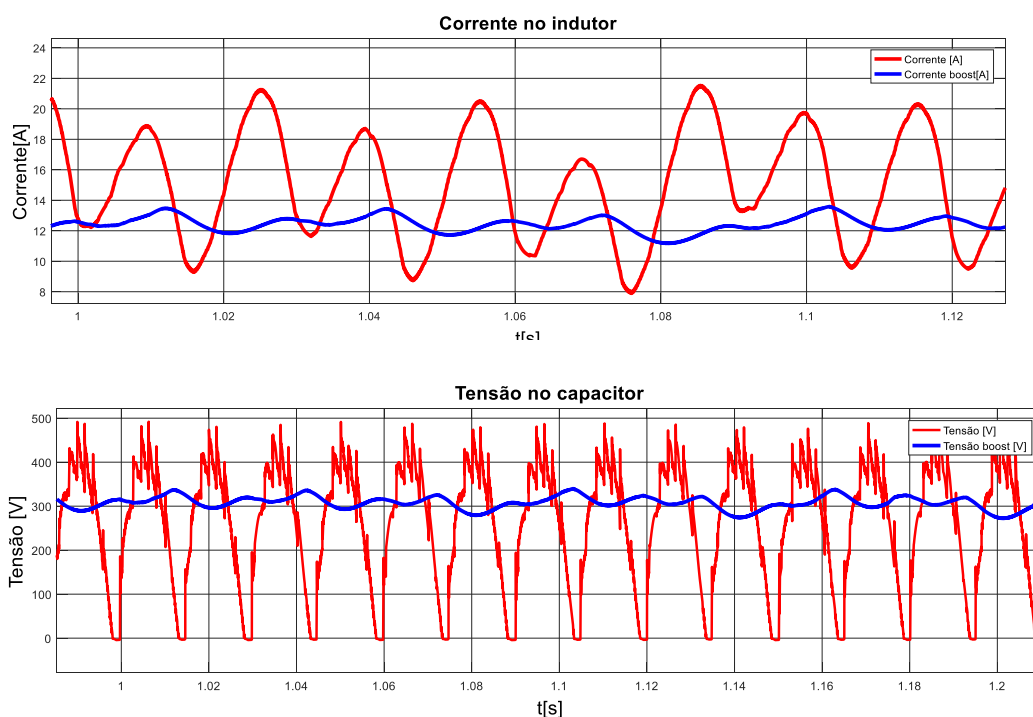
Fonte: próprio autor

corrente, reduzindo os *ripples*. Nesta pesquisa o conversor foi modelado usando componentes com valores comerciais visando a construção física do projeto (indutor de 100mH e capacitor de $820\mu\text{F}$). Assim, o controle da razão cíclica aplicado ao MOSFET possibilita elevar a tensão de entrada para valores maiores de saída, até atingir um valor máximo de saturação. Este controle varia entre de 0 a 100%, correspondendo respectivamente à tensão de entrada e à tensão infinita, teórica (BOYLESTAD, 2004).

A integração do retificador de onda completa, dos componentes de filtragem capacitivos e indutivos, e do controle da razão cíclica no MOSFET, contribui para a eficácia do conversor garantindo a adequada implementação da tensão de entrada para a saída desejada. A figura 43 ilustra o circuito do conversor usado na simulação. O conversor do tipo boost, por exemplo, possui, além da função de elevação da tensão de saída, a capacidade de contribuir significativamente para a filtragem do sinal elétrico. A

corrente que percorre o indutor e a tensão aplicada no capacitor desempenham papéis cruciais na atenuação de ripples e ruídos indesejados, resultando em um sinal de saída mais limpo e estável. Essa característica de filtragem inerente aos conversores boost, assim como em outros tipos de conversores, como o buck, é uma vantagem significativa em sistemas de energia, especialmente em aplicações que requerem alta qualidade e pureza do sinal, como em dispositivos eletrônicos sensíveis. Com isso, os elementos de filtragem passivos presentes nos conversores, como indutores e capacitores, permitem a redução de oscilações de alta frequência, contribuindo para uma maior eficiência do sistema e proteção dos componentes eletrônicos (Erickson & Maksimovic, 2007; Mohan et al., 2003). Dessa forma, a combinação de elevação de tensão com a filtragem de sinal torna os conversores boost e buck ideais para uma ampla gama de aplicações, onde tanto a regulação da tensão quanto a qualidade do sinal são essenciais.

Figura 44 - Parâmetros elétricos no conversor



Fonte: Próprio autor

A corrente no indutor, e a tensão no capacitor, do conversor servem de parâmetro sensorial para avaliar o comportamento e qualidade de atuação do conversor. Logo, a figura 44 elenca essas informações necessárias para os demais direcionamentos quanto à construção física do controlador a ser usado no protótipo do gerador. Assim, o melhoramento na qualidade do sinal se mostrou nítido após o uso do conversor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

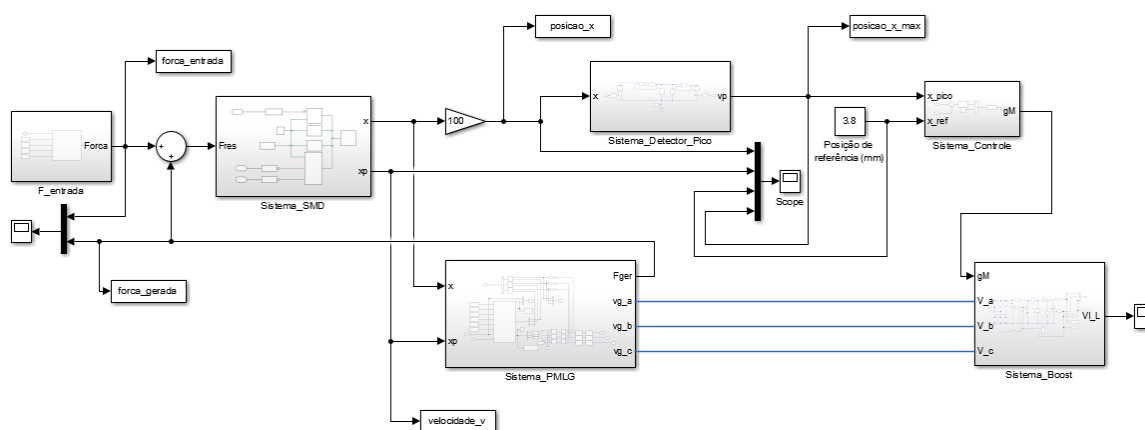
4.1 Análise dos resultados

O modelo analítico apresentado mostrou uma representação do desempenho eletromagnético do gerador linear, cuja precisão foi avaliada por meio da Análise de Elementos Finitos (FEA). A FEA é reconhecida como uma ferramenta robusta, eficiente e adequada para análise de projetos e desenvolvimento de máquinas elétricas (ANSYS®, 2022). A plataforma de programação Matlab® foi utilizada para realizar a modelagem analítica e dinâmica, a qual foi confrontada com os resultados obtidos através da FEA. Assim o modelo analítico, dinâmico e de Elementos Finitos demonstrou uma concordância satisfatória entre os resultados previstos.

A figura 45 apresenta o sistema dinâmico completo usado na simulação de atuação do gerador, desde a aplicação da força exercida pela máquina primária, até a tensão induzida retificada na carga resistiva. Além disso, observa-se o comportamento do SMD, bem como o desempenho do modelo do gerador a partir do sistema de controle implementado.

Apesar da simulação em blocos, *Simulink*®, tornar a modelagem visualmente mais fácil para as análises, alguns modelos de função foram implementados em linhas de código do *Matlab*®.

Figura 45 – Sistema Completo- Simulink®



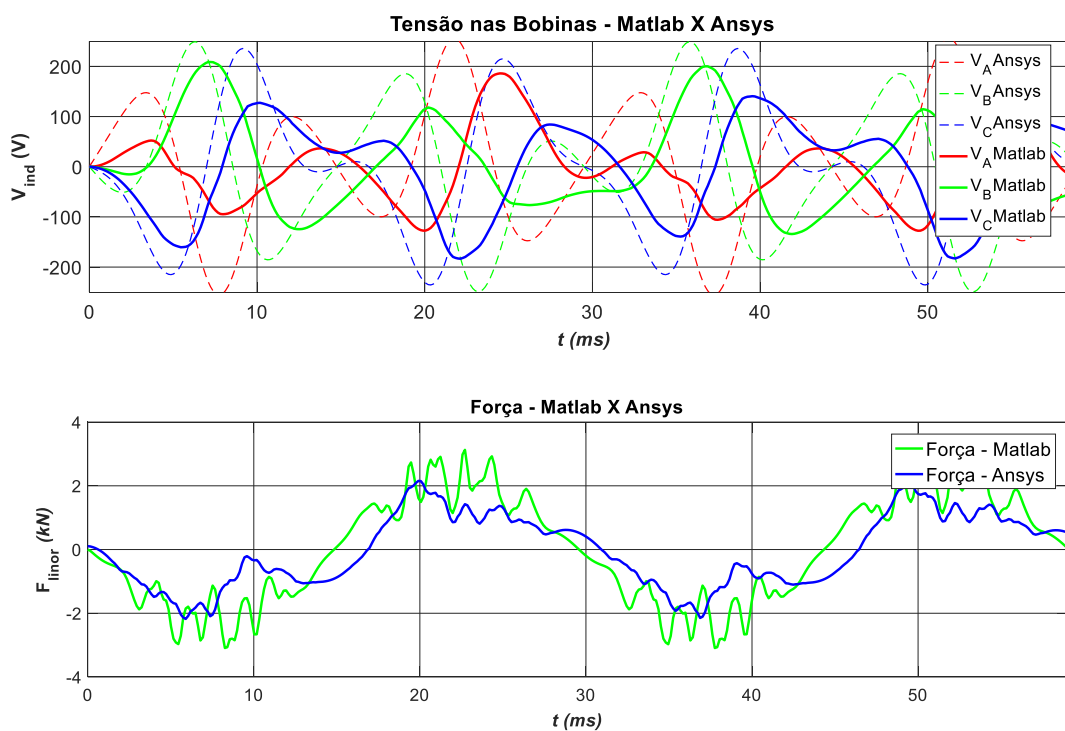
Fonte: próprio autor

4.1.1 Validação do modelo em Elementos Finitos.

Os modelos matemáticos, em geral, facilitam a modelagem e as análises das pesquisas. Contudo, a validação desses modelos deve ser inserida em ambientes de simulação que contribuem com resultados mais condizentes com as características reais da máquina. Com isso, a proposta de estudo e desenvolvimento do gerador linear a imã permanente transitou por esses estágios chegando aos resultados apresentados na figura 46. Conforme previsão inicial, os valores de tensão, corrente, potência e força gerada estão bem próximos ao que se espera da máquina com perfil linear e um campo magnético gerado por ímãs de Neodímio de Ferro Boro. Além disso, os valores obtidos estão de acordo com as pesquisas atuais na literatura técnica que desenvolve estudos sobre geradores lineares atuando em conjunto com os motores a pistão livre.

Cabe ressaltar que a ferramenta de análise do comportamento magnético, ANSYS®, tem a especificidade de verificar as características da densidade do campo magnético atuando na máquina. Apesar disso, foi possível inserir um circuito elétrico representando a carga, na simulação, via ANSYS®, e analisar, também, os parâmetros elétricos.

Figura 46 – ANSYS® e Matlab®



Fonte: Próprio autor

À título de comparação foi possível imprimir as curvas elétricas geradas nas duas ferramentas de simulação, ANSYS® e Matlab®. Contudo o modelo implementado no ANSYS® não prevê o controle do gerador. Logo, a representação, via Matlab®, teve que ser implementada somente com uma carga resistiva fixa sem o sistema de controle mostrado no modelo dinâmico. Assim, o modelo matemático analítico usado, via Matlab®, obteve resultados próximos aos vistos na implementação do ANSYS®.

4.1.2 Análise baseada nos perfis de carga variados

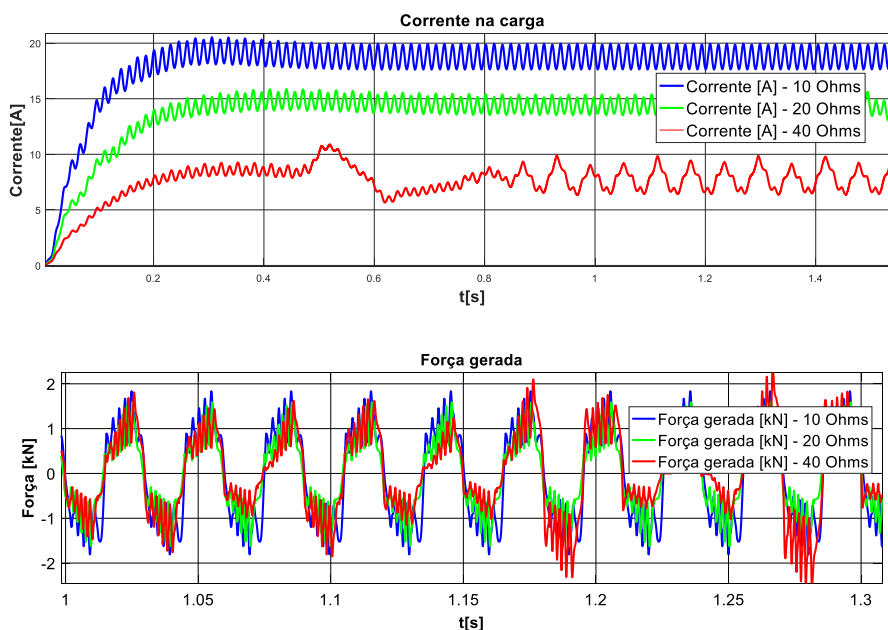
Tabela 5 – Valores médios a partir de cargas diferentes

	Exemplo de carga Resistiva			Exemplo de carga (Baterias e/ou Rede de Distribuição)		
	10 Ω	20 Ω	40 Ω	RL	RC	RLC
Corrente [A]	21,33	15,00	9,03	29,21	14,23	29,12
Tensão [V]	213,36	300	361,44	0,98	292,62	1,25
Potência [kW]	4,63	4,7	3,7	0,017	4,37	0,022
Eficiência [%]	66,09	59,18	48,40	1,26	58,41	1,26

Fonte: Próprio autor

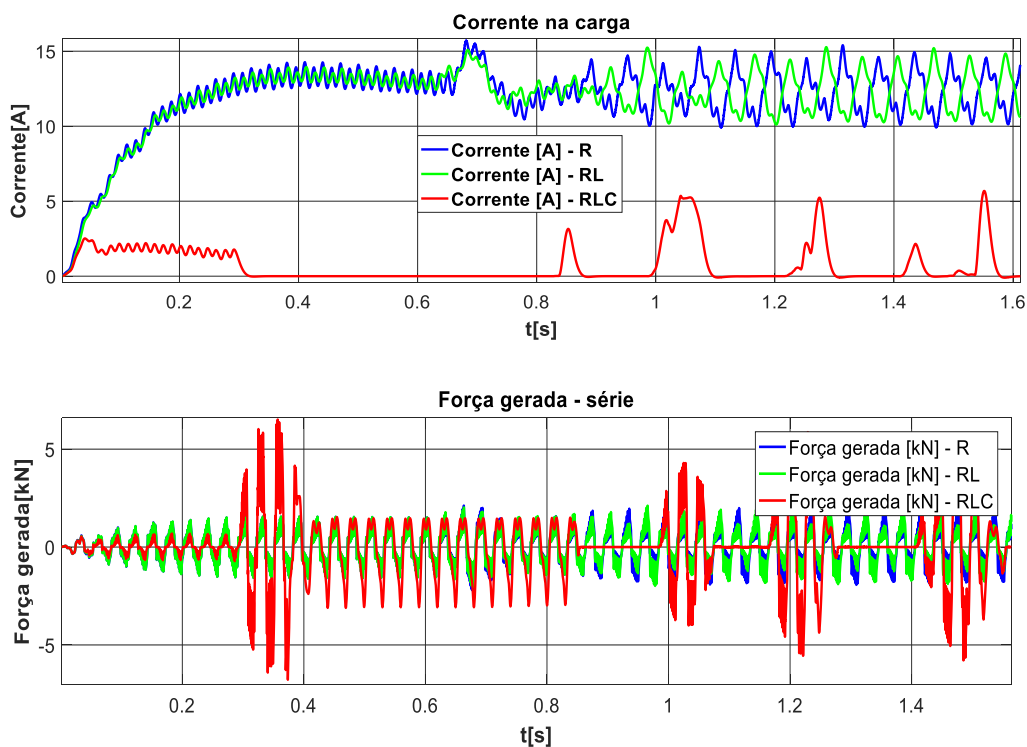
A maioria das simulações projetadas para o gerador baseou-se em uma carga predominantemente resistiva. No entanto, faz-se necessário considerar que pode haver a

Figura 47 – Variação das cargas resistivas - modelo dinâmico



Fonte: Próprio autor

Figura 48 – Variação dos perfis de carga - modelo dinâmico: Série



Fonte: Próprio autor

utilização da máquina para fins de geração de energia a partir da aplicação em outro tipo de perfil de carga. Sendo assim, foram avaliados, por meio das figuras 47, 48, e 49, os tipos e valores de carga que podem ser aplicadas aos terminais do gerador.

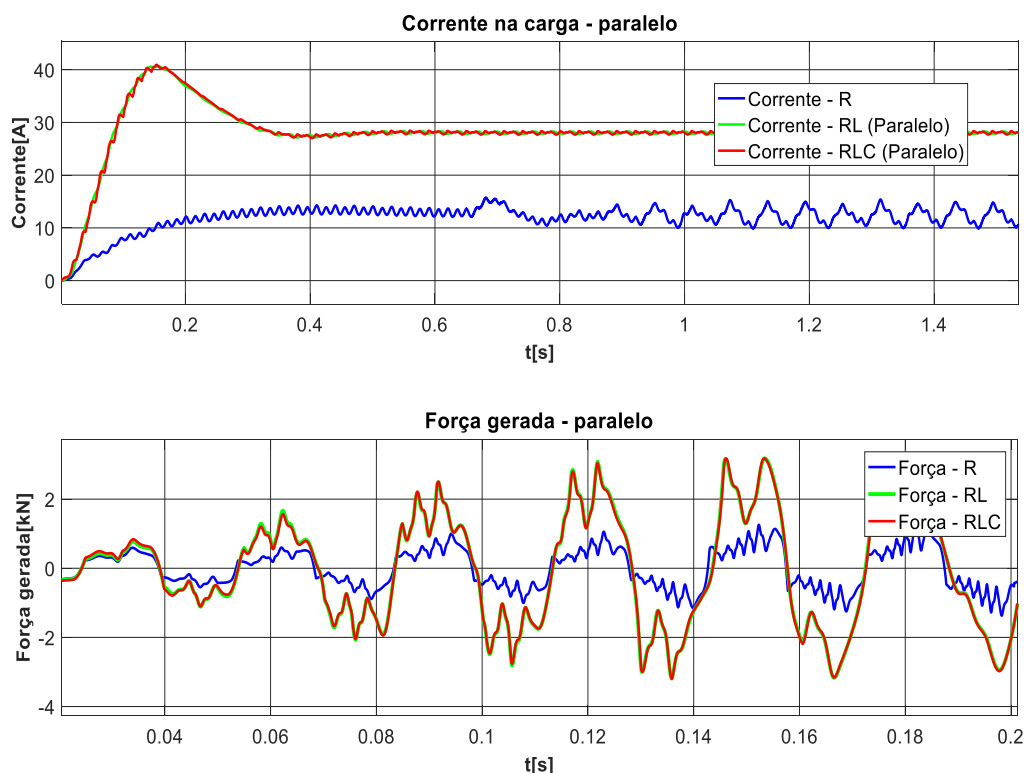
Na curva de força da figura 48 o período de 1.07 até 1.16, ou seja, 90 milissegundos, a carga RLC diminui e fica, praticamente, constante até voltar a ter um comportamento próximo as demais cargas. Isso ocorre por conta do carregamento e descarregamento característico das cargas capacitivas.

De acordo com o projeto inicial da máquina, a previsão era obter na saída algo em torno de 15 A, por isso escolheu-se uma carga de 25 ohms para ser usada nas simulações. Além disso, as análises realizadas a partir do estudo com cargas resistivas distintas permitiu que a avaliação quanto aos padrões elétricos de geração previstos para máquina fosse atendida.

$$R=25 \text{ ohms}, L=100\text{m H}, C=820 \text{ }\mu\text{F}.$$

Para uma análise abrangente do comportamento dos parâmetros elétricos (corrente, tensão e potência) em diferentes tipos de carga (R, RL e RLC) quando submetidos a uma tensão induzida aplicada por um gerador linear de ímã permanente,

Figura 49 – Variação dos perfis de carga - modelo dinâmico: Paralelo



Fonte: Próprio autor

considerando também as configurações de conexão em série e em paralelo, é essencial examinar as características distintas de cada tipo de carga e como elas interagem em diferentes arranjos de circuito. Com isso, as figuras 48 e 49 apresentam a carga nas conexões série e paralelo. Por conta da característica linear da carga resistiva, tal carga foi selecionada como base para o projeto, simulação e construção futura do gerador a ser acoplado ao motor de pistão livre. Na carga RL, tanto em série quanto em paralelo, a corrente inicialmente aumentou conforme a tensão é aplicada, mas manteve-se limitada pela reatância indutiva. Logo este tipo de carga serve apenas para uma análise didática do comportamento final dos parâmetros elétricos.

Os pontos que mais chamam atenção estão relacionados às cargas com a presença do elemento indutivo. Essas cargas (RL e RLC) exigem um aumento na corrente, por parte do gerador, para suprir a exigência dos campos magnéticos característicos das cargas indutivas. Por conseguinte, a tensão induzida resultante reduz drasticamente tendo como consequência a diminuição da potência útil (haja vista a necessidade de elevar a potência reativa solicitada), bem como da eficiência.

4.1.3 Análise da eficiência energética do gerador

O princípio de análise vinculada eficiência do gerador está relacionado com a transformação de energia em meio ao processo de execução da ação geradora da máquina. Assim, o que ocorre é a conversão de energia cinética (dada pela força mecânica exercida pela máquina primária) em energia eletromagnética (representada pela força resultante da interação entre o campo magnético e as correntes nas bobinas) e, posteriormente, em energia elétrica entregue a carga.

$E_{\text{eletromag}}/E_{\text{mec}} \rightarrow$ Eficiência da energia mecânica convertida em elétrica;

$E_{\text{eletric}}/E_{\text{eletromag}} \rightarrow$ Perdas eletromagnéticas;

$E_{\text{eletric}}/E_{\text{mec}} \rightarrow$ Eficiência total do sistema.

A tabela 4 apresenta um consolidado dos valores médios obtidos nas simulações. Para cargas de perfil resistivo com valores de resistência maiores, há um aumento na tensão induzida aplicada, conforme o esperado. Em contrapartida, os demais parâmetros diminuem consideravelmente chegando a uma redução de 26.76 % na eficiência total do sistema considerando uma carga de 40 ohms.

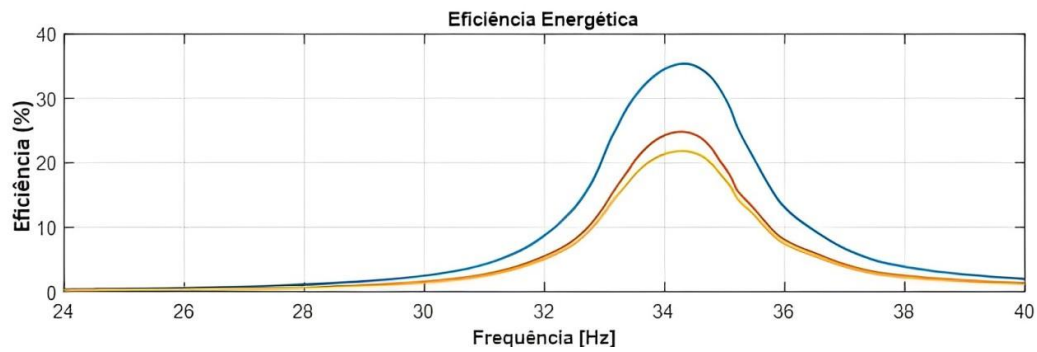
Tabela 6 - Variação da frequência

	Variação da frequência de ressonância do sistema					
	-1%	+1%	-5%	+5%	-10%	+10%
Corrente [A]	14,17	14,32	8,91	12,12	4,99	6,76
Tensão [V]	293,42	293,61	181,66	245,52	103,08	137,89
Potência [kW]	4,27	4,45	1,63	3,01	0,52	0,94
Eficiência [%]	60,80	57,03	61,44	61,18	59,83	61,15

Fonte: Próprio Autor

A frequência de ressonância mecânica usada nas simulações influencia diretamente no comportamento do gerador. Logo, a partir dos dados obtidos, mostrados na tabela 5, foi possível avaliar as alterações nos parâmetros médios analisados. O gráfico da figura 50 mostra a variação da frequência de 25 a 39 Hz com um passo de 0.1 Hz. A partir da tabela 5, e dos dados analisados, nota-se que o gerador obteve seu melhor desempenho na frequência natural de ressonância, conforme presumido.

Figura 50 – Curvas de eficiência do gerador

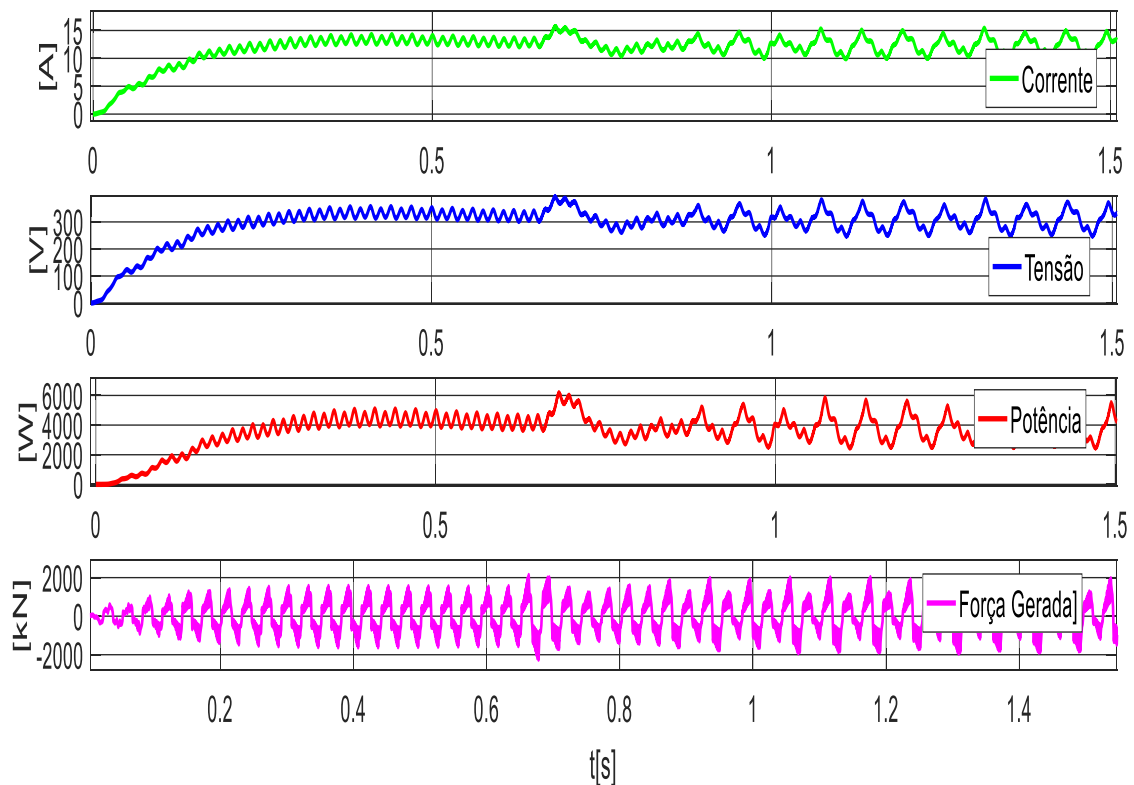


Fonte: Próprio autor

4.1.4 Parâmetros finais do gerador

A Figura 51 mostra os desempenhos de saída de tensão, corrente, potência elétrica trifásica e a força gerada do sistema. A tensão média na fase é de 277 (V), e a corrente média na fase não é maior que 14 (A). De posse dos parâmetros de saída modelados e simulados foi possível visualizar que o condicionamento e controle das variáveis surtiram efeito direto tornando os resultados dentro do esperado para a futura implementação física do protótipo do gerado linear.

Figura 51 – Parâmetros elétricos na carga resistiva



Fonte: Próprio autor

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa científica acadêmica pressupõe o estudo minucioso do tema, bem como o levantamento de hipóteses seguido, muitas vezes, de simulações, testes, avaliações e análises dos resultados. Algumas vezes, a pesquisa não atinge o resultado esperado por conta das mais diversas variáveis, externas ou internas, que interferem no desenvolvimento do estudo. No entanto, esta dissertação conseguiu chegar a resultados satisfatórios do ponto de vista do equacionamento matemático, da modelagem numérica via softwares de simulação, e das análises dos resultados.

A base para a análise do desempenho e do comportamento dinâmico do gerador decorreu da avaliação conjunta das equações que determinaram as correntes instantâneas dos circuitos do gerador, e das equações que estimaram a tensão e força. Além disso, a simulação do gerador em ambiente numérico permitiu a convalidação dos dados obtidos.

Este estudo empregou análises numéricas para modelagem e projeto de um gerador linear a imã permanente destinado a operar em conjunto com um motor de pistão livre. Utilizando o software de Elementos Finitos, ANSYS® Maxwell, os parâmetros foram obtidos com base em valores médios documentados na literatura sobre geradores elétricos. Como resultado, foram registrados nos terminais do gerador valores de 8.45 A de corrente elétrica, 87.02 V de tensão, 2.18 kW de potência e 1.2 kN de força. Os resultados apresentados consideram uma frequência constante imposta pela máquina primária sem atuação de qualquer controle no deslocamento do linor. No entanto, ao desenvolver o estudo matemático e implementá-lo via *Matlab®/Simulink®*, com inserção do sistema de controle, obteve-se melhores resultados no que tange aos parâmetros elétricos fornecidos pelo gerador, a saber, 13.84 A, 276.87 V e 3.92 kW.

A maioria dos resultados enfatizam o correto conceito dos geradores lineares propostos e as vantagens de usar os elementos selecionados nas construções de geradores lineares poligonais. Com pequenas alterações no design, tanto a frequência quanto a amplitude de tensões geradas pode ser alterada de maneira a atender a todos os requisitos dos dispositivos de eletrônica de potência, conectados entre si, ou às condições das ondas (amplitude e velocidade) do local onde o sistema será alocado.

Um gerador linear com ímã permanente acoplado a um motor de pistão livre possui diversas aplicações potenciais devido à sua capacidade de converter energia mecânica em elétrica de maneira eficiente e compacta. Logo, como recomendação para trabalhos futuros pode-se elencar os estudos:

- Construção do gerador linear a ímã permanente visando o levantamento dos dados da máquina (ensaios a vazio e a plena carga) e comparação com os resultados obtidos a partir deste estudo;
- Configuração da estrutura das bobinas com fechamento em delta visando análise e comparação da eficiência da máquina;
- Aplicação deste mesmo gerador sendo utilizado em sistemas de aproveitamento de energia das ondas marítimas;
- Construção, a partir dos modelos matemáticos apresentados, de um gerador portátil e energia visando o atendimento de áreas remotas, ou sem acesso a rede elétrica
- Implementação do controle da máquina, bem como o estudo e desenvolvimento de demais técnicas de controle que podem ser usadas nesse tipo de máquina (como por exemplo, o controle MPC).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. ANSYS® Maxwell scripting guide. ANSYS® Electromagnetics Suite 2022 R1.
- ASTROM, K. J., & HAGGLUND, T. (1995). "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning." 2nd Edition, Instrument Society of America. ISBN: 978-1556175169.
- ARSLAN, S. GÜRDAL, O. "Polygonal tubular linear permanent magnet generator analysis and experimental test," *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 1 D, pp. 168–182, Jan. 2022. <http://dx.doi.org/10.24200/sci.2019.50094.2739>
- BAKER, N. J. KORBKANDI, R. M. WU, D. JALAL, A. S. "An Investigation of Short Translator Linear Machines for Use in a Free Piston Engine," in 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), IEEE, May 2019, pp. 68–73. <http://dx.doi.org/10.1109/iemdc.2019.8785125>
- BENTO, P. F. Modelo dinâmico e termodinâmico para motor de pistão livre. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Uberlândia – MG, 2019. <http://dx.doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v10n2p224-239>
- BERGMAN, M. CFD Modelling of a Free-Piston Engine Using Detailed Chemistry. Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2006.
- BOLDEA, I., *Linear electric machines, drives, and MAGLEVs handbook*, Boca Raton, CRC press, 2017. <http://dx.doi.org/10.1201/b13756>
- BOLDEA, I., *Synchronous generators*, Boca Raton, CRC Press, 2015.
- BOYLESTAD, R. L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos*. 8ª edição. Editora Prentice Hall. São Paulo, SP. 2004.
- CHEN, Z. YU, H. "Design and Experiment of a Permanent Magnet Tubular Linear Generator for Wave Energy Conversion System," 2014. <http://dx.doi.org/10.2528/pierc14041202>
- CHEN, H. ZHAN, Y. WANG, H. NIE, R. A Tubular Permanent Magnet Linear Generator With Novel Structure. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 47, NO. 6, june 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/tps.2019.2911257>

ERICKSON, R. W., & MAKSIMOVIC, D. (2007). "Fundamentals of Power Electronics." Springer.

FENG, H., GUO, C., JIA B., ZUO Z., GUO Y., ROSKILLY T., Research on the intermediate process of a free-piston linear generator from cold start-up to stable operation: Numerical model and experimental results. *Energy Convers Manage* 2016;122:153–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.068>

GHANI, N. S. IBRAHIM, A. T. NOR, N. M. "Refine design parameters for permanent magnet shape modification of the direct-drive generator," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 132–138. <http://dx.doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i1.pp132-138>

GUO, C., FENG, H., JIA, B., ZUO, Z., GUO Y., ROSKILLY T., Research on the operation characteristics of a free-piston linear generator: Numerical model and experimental results. *Energy Convers Manage* 2017; 131:32–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.010>

GYSEN, B. L. J. Generalized harmonic modeling technique for 2d electromagnetic problems. *Applied to the design of a Direct-Drive Active Suspension System*, 2011.

HANSSON, J. Analysis and control of a hybrid vehicle powered by a free-piston energy converter. Stockholm: KTH; 2006.

HU, Y. XU, Z. SUN, Y. LIU, L. "Electromagnetic characteristics analysis of a tubular moving magnet linear generator system," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 11, Jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/app10113713>

JALAL, A. BAKER, N.J. WU, D. "Design of tubular Moving Magnet Linear Alternator for use with an External Combustion - Free Piston Engine". In: 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016). 2016, Glasgow, UK: Institute of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/cp.2016.0273>

JIA, B. et al. A study and comparison of frictional losses in free-piston engine and crankshaft engines. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 140, p. 217–224, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.018>

JIA, B., Analysis and control of a spark ignition free-piston engine generator. Tese de Doutorado, Newcastle University, 2016.

JUN, J. SHIN, Y. CHO, S. J. CHO, Y. W. LEE, S. H. KIM, J. H. “Optimal linear generator with Halbach array for harvesting of vibration energy during human walking,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1–8, May 2016.
<http://dx.doi.org/10.1177/1687814016649880>

KHATRI, P. WANG, X. “Design parameter sensitivity analysis and performance prediction of a novel direct drive double dumbbell flux switching linear generator,” *J Ocean Eng Mar Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 65–82, Feb. 2022.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40722-021-00217-8>

LI, Y. HUANG, L. CHEN, M. TAN, P. HU, M. “A Linear-Rotating Axial Flux Permanent Magnet Generator for Direct Drive Wave Energy Conversion,” in *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.
<http://dx.doi.org/10.1109/ldia49489.2021.9505815>

MAX, E., MPLc, free piston energy converter, in *Proceedings of the 21st Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS. 2005*.

MELO, G. A. M. P. Estudo e desenvolvimento da estratégia de controle de um gerador elétrico acionado por motor a pistão livre. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Uberlândia – MG, 2020.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2020.608>

MIKALSEN, R.; JONES, E.; ROSKILLY, A. P., Predictive piston motion control in a freepiston internal combustion engine, *Applied Energy*, May 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.005>

MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P., A review of free-piston engine history and applications, *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 27, n. 14-15, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.015>

MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P., The control of a free-piston engine generator. Part 1: Fundamental analyses, *Applied Energy*, April 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.036>

MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P., The control of a free-piston engine generator. Part 2: Engine dynamics and piston motion control, *Applied Energy*, April 2010.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.035>

MIN, S. G . SARLIOGLO, B. Analytical Calculation of Back EMF Waveform for Linear PM Motors in Slotted and Slotless Structures. Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium, University of Wisconsin–Madison, Madison, WI 53705 USA. IEEE transactions on magnetics, vol. 53, no. 12, december 2017. <http://dx.doi.org/10.25368/2020.53>

NISE, N. S. Engenharia de Sistemas de Controle. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 6º edição. Rio de Janeiro, RJ. 2012.

OGATA, K. (2010). "Modern Control Engineering." 5th Edition, Prentice Hall. ISBN: 978-0136156734.

PARTHASARATHY, R. Linear PM generator for wave energy conversion Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. LSU Master’s Theses. 2012.

PARVEEN, S. M. NELSON, I. MURUGAN, S. S. “Magnetic Circuit Analysis of Tubular-Direct Drive Linear Generator for Wave Energy Conversion,” in Oceans Conference Record (IEEE), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. <http://dx.doi.org/10.1109/oceanschennai45887.2022.9775255>

PARVEEN, S. M. NELSON, I. MURUGAN, S. S. “Performance Analysis of N40 Permanent Magnet Using PMSLG for Wave Energy Conversion,” in PESGRE 2022 - IEEE International Conference on “Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy,” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. <http://dx.doi.org/10.1109/pesgre52268.2022.9715893>

PIRISI, A. GRUOSSO, G. ZICH, R. E. “Novel modeling design of three phase tubular permanent magnet linear generator for marine applications,” in POWERENG 2009 - 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings, 2009, pp. 78–83. <http://dx.doi.org/10.1109/powereng.2009.4915209>

RASHID, M. H. Eletrônica de Potência: Circuitos Dispositivos e Aplicações. Tradução Carlos Alberto Favato. Editora Makron Books. São Paulo, SP. 1999.

RATHORE, S. S. MISHRA, S. PASWAN, M. K. SANJAY. “A Review on Design and Development of Free Piston Linear Generators in Hybrid Vehicles,” in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/691/1/012053>

RIGAMONTE, Michele. A comprehensive model for the simulation of free piston linear generators. Academic Thesys. School of Industrial and Information Engineering Department of Aerospace Science and Technology Master's Degree in Aeronautical Engineering. Politecnico di Milano. Milano, Italy – 2021.

RIGOBELLO, L. da S. Projeto e dimensionamento de um motor de pistão livre para operação em associação com um gerador elétrico linear. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Uberlândia – MG, 2020. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2020.567>

RODRIGUES, R. V. Estudo e desenvolvimento numérico do projeto de um gerador elétrico acionado por motor a pistão livre. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Uberlândia – MG, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2020.48>

SASIC, M. LLOYD, B. ELEZ, A. Finite Element Analysis of Turbine Generator Rotor Winding Shorted Turns. IEEE. Transactions on energy conversion, vol. 27, no. 4, December 2012. <http://dx.doi.org/10.1109/tec.2012.2216270>

SMALLBONE, A. et al., “Realization of a Novel Free-Piston Engine Generator for Hybrid-Electric Vehicle Applications,” Energy and Fuels, vol. 34, no. 10, pp. 12926–12939, Oct. 2020. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01647>

SUBRAMANIAN, J. Comparison of Halbach, Radial and Axial Magnet Arrangement for Single Phase Tubular Permanent Magnet Linear Alternators. Electric Power Energy Conference - (EPEC). IEEE – 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/epec48502.2020.9320008>

VAN BLARIGAN, P.; PARADISO, N.; GOLDSBOROUGH, S., Homogeneous charge compression ignition with a free piston: A new approach to ideal Otto cycle performance, SAE Technical Paper, 1998. <http://dx.doi.org/10.4271/982484>

WANG, J. HOWE , G. Tubular Modular Permanent-Magnet Machines Equipped With Quasi-Halbach Magnetized Magnets—Part I: Magnetic Field Distribution, EMF, and Thrust Force. Department of Electronic and Electrical Engineering, the University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, U. IEEE transactions on magnetics, vol. 41, no. 9, september 2005. <http://dx.doi.org/10.1109/tmag.2005.854328>

YUAN, C.FENG, H. HE, Y. XU, J. Combustion characteristics analysis of a free-piston engine generator coupling with dynamic and scavenging. *Energy* 2016;102:637–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.131>

ZASECK, K. M., Modeling and Control of Hydraulic Linear and Free-Piston Engines, PhD thesis, University of Michigan, 2013.

ZHANG, Z. WU, B. LU, Q. XU, W. “Novel Linear Generator Concepts and Topologies for Wave Energy Conversion Systems: A Review,” in 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. <http://dx.doi.org/10.1109/ldia49489.2021.9505738>

7 APÊNDICE

7.1 Modelo analítico completo

A modelagem matemática do comportamento do campo magnético a partir da análise da disposição do fluxo no entreferro pode ser demonstrada através das séries de Fourier com base no equacionamento obtido de acordo com o perfil harmônico do deslocamento senoidal do linor (BOLDEA, 2017).

$$\overline{M}_F(x) = \frac{1}{2}a_0 + \overbrace{a_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x\right)} + \overbrace{b_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x\right)} \quad (1)$$

A partir dos termos a_0 , a_1 e b_1 é possível compor o perfil do sinal com base nos limites de integração.

1º Elemento

$$a_0 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) dx$$

$$a_0 = \frac{1}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p+\tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p-\tau)}{2}} -M_p dx + \frac{1}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p-\tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p+\tau)}{2}} M_p dx$$

$$M_p = H \cdot h_m$$

(H – Intensidade do Campo e h_m – Altura do imã)

$$a_{0I} = \frac{1}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p+\tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p-\tau)}{2}} -M_p dx$$

$$a_{0I} = -\frac{1}{\tau_p} M_p \left[\left(\frac{-(\tau_p - \tau)}{2} \right) - \left(\frac{-(\tau_p + \tau)}{2} \right) \right]$$

$$a_{0I} = -\frac{M_p}{\tau_p} \left[\left(\frac{2\tau}{2} \right) \right]$$

$$a_{0I} = \boxed{-M_p \frac{\tau}{\tau_p}}$$

$$a_{0II} = \frac{1}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p - \tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p + \tau)}{2}} M_p dx$$

$$a_{0II} = \frac{1}{\tau_p} M_p \left[\left(\frac{(\tau_p + \tau)}{2} \right) - \left(\frac{(\tau_p - \tau)}{2} \right) \right]$$

$$a_{0II} = \frac{M_p}{\tau_p} \left[\left(\frac{\tau_p + \tau - \tau_p + \tau}{2} \right) \right]$$

$$a_{0II} = \frac{M_p}{\tau_p} \left[\left(\frac{2\tau}{2} \right) \right]$$

$$a_{0II} = \boxed{M_p \frac{\tau}{\tau_p}}$$

$$(a_{0I}) + (a_{0II}) = a_0$$

$$-M_p \frac{\tau}{\tau_p} + M_p \frac{\tau}{\tau_p} = a_0$$

$$\boxed{a_0 = 0}$$

2º elemento

$$a_1 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$a_1 = \overbrace{-\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p + \tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p - \tau)}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx}^I + \overbrace{\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p - \tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p + \tau)}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx}^{II}$$

$$a_{1I} = -\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p + \tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p - \tau)}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$a_{1I} = -\frac{M_p}{\tau_p} \left(-\frac{\tau_p}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{-\tau_p + \tau}{2} \right)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{-\tau_p - \tau}{2} \right)\right) \right] \right)$$

$$a_{1I} = \frac{M_p}{\pi} \left[\overbrace{\sin(\alpha(-\tau_p + \tau))}^1 - \overbrace{\sin(\alpha(\tau_p + \tau))}^2 \right] \quad \alpha = \frac{\pi}{2\tau_p}$$

$$a_{1I_1} e a_{1I_2} = [\sin(-\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) + \sin(\alpha\tau) \cos(-\alpha\tau_p)] \\ - [\sin(\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) + \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)]$$

$$\boxed{a_{1I} = \frac{M_p}{\pi} [-2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)]}$$

$$a_{1II} = \frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p - \tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p + \tau)}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$a_{1II} = \frac{M_p}{\tau_p} \left(-\frac{\tau_p}{\pi}\right) \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p + \tau}{2}\right)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p - \tau}{2}\right)\right) \right]$$

$$a_{1I} = -\frac{M_p}{\pi} \left[\overbrace{\sin(\alpha(\tau_p + \tau))}^1 - \overbrace{\sin(\alpha(\tau_p - \tau))}^2 \right]$$

$$a_{1II_1} e a_{1II_2} = [\sin(\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) + \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)] \\ - [\sin(\alpha\tau_p) \cos(-\alpha\tau) - \sin(-\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)]$$

$$\boxed{a_{1II} = \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)]}$$

$$(a_{1I}) + (a_{1II}) = a_1$$

$$a_1 = \frac{M_p}{\pi} [-2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)] + \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \cos(\alpha\tau_p)]$$

$$\boxed{a_1 = 0}$$

3º Elemento

$$b_1 = \frac{1}{\tau_p} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} M_F(x) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$b_{1I} = \overbrace{-\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p+\tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p-\tau)}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx}^I + \overbrace{\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p-\tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p+\tau)}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx}^{II}$$

$$b_{1II} = -\frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{-(\tau_p+\tau)}{2}}^{\frac{-(\tau_p-\tau)}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$b_{1II} = -\frac{M_p}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p}{\pi}\right) \left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{-\tau_p+\tau}{2}\right)\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{-\tau_p-\tau}{2}\right)\right) \right]$$

$$b_{1II} = \frac{M_p}{\pi} \left[\overbrace{\cos\left(\alpha(-\tau_p+\tau)\right)}^1 - \overbrace{\cos\left(\alpha(\tau_p+\tau)\right)}^2 \right] \quad \alpha = \frac{\pi}{2\tau_p}$$

$$b_{1II_1} e b_{1II_2} = [\cos(-\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) - \sin(-\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)] \\ - [\cos(\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) - \sin(\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)]$$

$$\boxed{b_{1II} = \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \sin(\alpha\tau_p)]}$$

$$b_{1III} = \frac{M_p}{\tau_p} \int_{\frac{(\tau_p-\tau)}{2}}^{\frac{(\tau_p+\tau)}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx$$

$$b_{1III} = \frac{M_p}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p}{\pi}\right) \left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p+\tau}{2}\right)\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} \left(\frac{\tau_p-\tau}{2}\right)\right) \right]$$

$$b_{1III} = \frac{M_p}{\pi} \left[\overbrace{\cos\left(\alpha(\tau_p+\tau)\right)}^1 - \overbrace{\cos\left(\alpha(\tau_p-\tau)\right)}^2 \right]$$

$$b_{1III_1} e b_{1III_2} = [\cos(\alpha\tau_p) \cos(\alpha\tau) - \sin(\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)] \\ - [\cos(\alpha\tau_p) \cos(-\alpha\tau) - \sin(\alpha\tau_p) \sin(-\alpha\tau)]$$

$$\boxed{b_{1III} = \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)]}$$

$$(b_{1I}) + (b_{1II}) = b_1$$

$$b_1 = \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau) \sin(\alpha\tau_p)] + \frac{M_p}{\pi} [2 \sin(\alpha\tau_p) \sin(\alpha\tau)]$$

$$b_1 = \frac{4M_p}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi \tau}{2 \tau_p}\right) \sin\left(\frac{\pi \tau_p}{2 \tau_p}\right) \right]$$

$$b_1 = \frac{4M_p}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi \tau}{2 \tau_p}\right) \right]$$

Assim, a média é dada pela equação abaixo.

$$\overline{M_F(x)} = \frac{4M_p}{\pi} \sin\left(\frac{\pi \tau}{2 \tau_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$$

O fluxo magnético é calculado em cada posição dx , considerando que este fluxo é dependente da posição do linor (Lei de Lenz). Além disso, o fluxo devido ao campo magnético em uma área pode ser obtido decompondo a variação da área dA em um elemento diferencial dx . Assim:

$$\Phi = B \cdot A \quad d\Phi = B(x) \cdot dA \quad d\Phi = B(x) \cdot L_{Comp} dx$$

A variável L_{Comp} representa o comprimento da área em que há fluxo magnético na bobina. A partir do somatório do elemento infinitesimal dx é possível obter o fluxo total na bobina em qualquer posição x no caminho de deslocamento do eixo-linor com base na lei de Lenz.

$$\lambda(x) = \int_{x-\tau_p}^x N_{Coil} L_{Comp} \sum_{h=1}^H B_h \cos\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) dx$$

$$\lambda(x) = \int_{x-\tau_p}^x N_{Coil} L_{Comp} \sum_{h=1}^H B_h \cos\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) dx$$

$$\lambda(x) = \sum_{h=1}^H N_{Coil} L_{Comp} B_h \frac{\tau_p}{h\pi} \left[\overbrace{\sin\left(h \frac{\pi}{\tau_p} x + \phi_h\right) - \sin\left(h \frac{\pi}{\tau_p} (x - \tau_p) + \phi_h\right)}^{\lambda(x)_a} \right]$$

$$\lambda(x)_a = \overbrace{\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x + \phi_h\right)}^{\lambda(x)_{a1}} - \overbrace{\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}(x - \tau_p) + \phi_h\right)}^{\lambda(x)_{a2}}$$

$$\lambda(x)_{a1} = \sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(\phi_h) + \sin(\phi_h)\cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)$$

$$\lambda(x)_{a2} = -\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}(x - \tau_p) + \phi_h\right)$$

$$\lambda(x)_{a2} = -\left[\overbrace{\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}(x - \tau_p)\cos(\phi_h)\right)}^{\lambda(x)_{a3}} + \overbrace{\cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}(x - \tau_p)\right)}^{\lambda(x)_{a4}}\right]$$

$$\lambda(x)_{a3} = \left[\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi) - \sin(h\pi)\cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\right]\cos(\phi_h)$$

$$\lambda(x)_{a3} = \sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi)\cos(\phi_h)$$

$$\lambda(x)_{a4} = \left[\cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi) + \sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\sin(h\pi)\right]\sin(\phi_h)$$

$$\lambda(x)_{a4} = \cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi)\sin(\phi_h)$$

$$\lambda(x)_{a2} = -\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi)\cos(\phi_h) - \cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(h\pi)\sin(\phi_h)$$

$$\lambda(x)_{a1}\lambda(x)_{a2} = [1 - \cos(h\pi)]\left(\sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\cos(\phi_h) + \sin(\phi_h)\cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x\right)\right)$$

A distribuição do campo ao longo do deslocamento possui somente harmônicos de ordem ímpar, uma vez que os harmônicos pares não influenciam diretamente no sistema.

$$[1 - \cos(h\pi)] \begin{cases} 2 - \text{Se } h \text{ ímpar} \\ 0 - \text{Se } h \text{ par} \end{cases}$$

Assim o fluxo magnético na bobina é dado por:

$$\lambda(x) = \sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \frac{\tau_p}{h\pi} \sin\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x + \phi_h\right)$$

Com isso é gerado nos terminais da bobina um fluxo concatenado variável, ou tensão induzida E_{emf} .

$$E_{emf} = -\frac{d\lambda(x)}{dt}$$

$$\frac{d\lambda(x)}{dt} = -\sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \frac{\tau_p}{h\pi} \cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x + \phi_h\right) h\frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt}$$

$$E_{emf}(x, t) = -\sum_{h=1}^H 2N_{Coil}L_{Comp}B_h \cos\left(h\frac{\pi}{\tau_p}x + \phi_h\right) v_{vel}(t)$$

Expressa a força mecânica que tem o sinal oposto em relação à direção do movimento do linor.

$$F_{ger}(x, t) = 2HN_{coil}B(x)i_L(t)$$