

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - FEELT
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

EDUARDO MARQUES DA SILVA

Avaliação paramétrica de um gerador linear síncrono para motogerador a pistão livre
utilizados em veículos híbridos.

UBERLÂNDIA - MG

2024

EDUARDO MARQUES DA SILVA

Avaliação paramétrica de um gerador linear síncrono para motogerador a pistão livre utilizados em veículos híbridos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes.

UBERLÂNDIA - MG

2024

EDUARDO MARQUES DA SILVA

Avaliação paramétrica de um gerador linear síncrono para motogerador a pistão livre utilizados em veículos híbridos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro mecatrônico.

Aprovado em: **02/05/2024**

Banca examinadora:

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

Prof. Dr. Pedro José dos Santos Neto – UNICAMP

Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos – UFU

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão, primeiramente a Deus e a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso.

Não posso deixar de agradecer aos meus familiares e amigos por seu amor, incentivo e compreensão ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento foram uma fonte constante de motivação. Deixo um agradecimento especial a minha mãe, Luiza Aparecida, a minha madrinha, Celia Maria, a meu irmão, Douglas Marques, e também a minha namorada, Giovanna Soares, pelo apoio imensurável em toda essa caminhada.

Desejo agradecer ao meu orientador, Pedro José dos Santos Neto, pela orientação, apoio e expertise ao longo de todo o processo de pesquisa. Seus insights foram fundamentais para moldar este trabalho.

Também sou grato aos membros do corpo docente da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela dedicação e conhecimentos compartilhados ao longo da minha jornada acadêmica.

Agradeço aos meus colegas de curso, que estiveram ao meu lado durante esses anos de estudo, pelos momentos de colaboração, amizade e apoio mútuo. Suas contribuições enriqueceram minha experiência acadêmica. Em especial aos colegas, Maycon e Paulo por contribuírem com a minha pesquisa fonte deste trabalho.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todas as fontes de conhecimento, autores e pesquisadores cujas obras foram consultadas e citadas nesta pesquisa. Seus estudos e contribuições foram essenciais para o desenvolvimento do meu trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para este projeto, o meu sincero agradecimento. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

“Não podemos prever o futuro,
mas podemos criá-lo.”

Peter Drucker

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso (TCC) envolve a temática relacionada à melhoria nas tecnologias atuais de carros híbridos, com foco em geradores lineares que aproveitam a energia gerada de um motor de pistão livre. O objetivo primordial deste estudo consiste na simulação e avaliação paramétrica de um gerador linear síncrono para motogerador à pistão livre utilizado em motores de veículos híbridos. Este trabalho apresenta uma revisão de artigos e teses bem avaliados na tecnologia pouco explorada do sistema motogerador, foram estudados trabalhos que empregam aplicações em carros elétricos e híbridos, motores de pistão livre e geradores linear síncrono. O estudo tem como prioridade embasar as modelagens matemáticas e numéricas. Em seguida, após o estudo, são selecionadas modelagens matemáticas que fossem de encontro ao objetivo do projeto, ou seja, que pudessem ser utilizadas como modelo do sistema moto gerador. Isso posto, buscou-se calcular e modelar todos os parâmetros do sistema motogerador, com os parâmetros que são influentes no sistema motogerador, faz-se necessário o auxílio de modelagens numéricas. Assim, por meio da ajuda de softwares de elementos finitos, a modelagem numérica gerou informações de fluxo magnético, tensão elétrica e força elétrica por meio das informações de dimensões e materiais presentes no gerador. Por fim, todos os parâmetros de entrada do gerador foram analisados. A análise observa o comportamento dos resultados de interesse por meio da alteração dos parâmetros de entrada. Logo, é possível obter um modelo mais otimizado. Ainda nessa fase, teve-se o objetivo de controlar as variáveis que o gerador linear envia e recebe do motor de pistão livre. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade de criar projetos de protótipos de geradores lineares para serem usados em projetos de veículos híbridos acoplado no eixo de um motor a pistão livre. Dessa forma, o gerador linear consegue gerar energia a partir do funcionamento do motor de pistão livre.

Palavras-chave: Gerador linear, veículo híbrido, simulação e parâmetros eletromagnéticos.

ABSTRACT

This course completion work involves the theme related to the improvement of current hybrid car technologies, with a focus on linear generators that harness energy generated by the resonance vibration of a motor. The primary goal of this study is the simulation and parametric evaluation of a synchronous linear generator for a free piston motor-generator used in hybrid vehicle engines. This work presents a review of well-assessed articles and theses in the underexplored technology of the motor-generator system, examining works that employ applications in electric and hybrid cars, free piston engines, and synchronous linear generators. The study prioritizes grounding in mathematical and numerical modeling. Next, after the study, mathematical models meeting the project's objective were selected, i.e., those that could be used as a model of the motor-generator system. Therefore, efforts were made to calculate and model all parameters of the motor-generator system, with influential parameters necessitating the aid of numerical modeling. Thus, through finite element software assistance, the numerical modeling generated information on magnetic flux, electrical voltage, and electrical force based on dimensions and materials present in the generator. Finally, all generator input parameters were analyzed. The analysis observes the behavior of interest results through changes in input parameters, thereby obtaining a more optimized model. Still, in this phase, the objective was to control the variables that the linear generator sends and receives from the free piston engine. The obtained results demonstrate the feasibility of creating linear generator prototype projects to be used in hybrid vehicle projects coupled to the shaft of a free piston engine. In this way, the linear generator can generate energy from the operation of the free piston engine.

Keywords: Linear generator, hybrid vehicle, simulation and electromagnetic parameters

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Benz Patent Motorwagen.	19
Figura 2: Ciclo do motor de quatro tempos.....	20
Figura 3: Arquitetura em série.	22
Figura 4: Topologia em paralelo.	23
Figura 5: Exemplar da topologia dupla.	23
Figura 6: Topologia existente no VEHP.....	24
Figura 7: Classificação dos veículos que usam eletricidade.....	25
Figura 8: Sistema de armazenamento combinado.	28
Figura 9: Processo de freio regenerativo.....	29
Figura 10: Esquema de colheita de energia pela suspensão.	30
Figura 11: Sistema único de armazenamento, colheita e recuperação de energia.	31
Figura 12: Comparação entre os motores: a) Motor a pistão livre b) Motor alternativo convencional:.....	33
Figura 13: Configuração básica de um motor de pistão livre.....	33
Figura 14: Configuração de um motor de pistão simples.....	34
Figura 15: Configuração de um motor de pistão duplo.....	35
Figura 16: Motor de pistões opostos.....	36
Figura 17: Exemplos das classes de GEL. (a) Topologia com magnetização externa. (b) Topologia com magnetização interna.	38
Figura 18: Possíveis maneiras de magnetização.	38
Figura 19: Magnetização interna e externa.....	39
Figura 20: Classificação dada segundo a distribuição das bobinas.....	41
Figura 21: Gerador linear de referência.....	45
Figura 22: Trecho ativo com as dimensões representadas.	46
Figura 23: Desenho do recorte do gerador feito no FEMM.....	48
Figura 24: Condições de contorno.....	49
Figura 25: Malha gerado pelo FEMM após comandos do MATLAB.....	50
Figura 26: Exemplo da reta usada como região de análise no trecho ativo....	50
Figura 27: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio do entreferro.....	51
Figura 28: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio do entreferro.....	52

Figura 29: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio dos ímãs.	52
Figura 30: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio dos ímãs.	53
Figura 31: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio das bobinas.....	53
Figura 32: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio das bobinas..	54
Figura 33: Mapa de densidade de fluxo magnético, legenda por cores.....	56
Figura 34: Fluxo magnético em metros.....	57
Figura 35: Tensão induzida trifásica.	58
Figura 36: Comportamento da densidade de fluxo, assumindo a não existência dos ímãs e usando como região o encontro do entreferro e dentes da bobina.....	59
Figura 37: Gráfico de força elétrica com eixo representado em graus.	59
Figura 38: Mudança relativa percentual de densidade de fluxo magnética para os 10 parâmetros. a) Radial. b) Tangencial. c) Módulo.....	62
Figura 39: Mudança relativa percentual. a) Fluxo magnético. b) Tensão elétrica. c) Força elétrica.....	63
Figura 40: Desenho do novo trecho ativo.	64
Figura 41: Mapa de densidade de fluxo do novo trecho ativo.....	65
Figura 42: Comparação entre máquinas, no quesito densidade de fluxo magnético. a) Radial. b) tangencial. c) Módulo.	66
Figura 43: Comparação da variável de fluxo entre as máquinas.....	67
Figura 44: Comparação da variável de tensão elétrica entre as máquinas. ...	67
Figura 45: Comparação da variável de força elétrica entre as máquinas.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de configurações e topologia de um gerador elétrico linear. Fonte: (Gysen, 2011).	37
Tabela 2: Parâmetros estruturais da máquina de referência. Fonte: Autor.....	47
Tabela 3: Alguns valores de permeabilidade magnética. Fonte: Autor.	48
Tabela 4: Novos valores de parâmetros da nova máquina otimizada. Fonte: Autor.....	64
Tabela 5: Aumento das quatidade eletromagnéticas importantes do gerador linear. Fonte: Autor.....	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Função de Bessel para densidade de fluxo magnético na direção radial.

Equação 2 – Função de Bessel para densidade de fluxo magnético na direção tangencial.

Equação 3 – Função de Bessel para densidade de fluxo magnético em módulo.

Equação 4 – Calcula o fluxo magnético.

Equação 5 – Calcula a força eletromotriz.

Equação 6 – Calcula a força elétrica.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

MCI – Motor de Combustão Interna

ME – Motor Elétrico

VEH – Veículo Elétrico Híbrido

VEP – Veículo Elétrico Puro

VEHP – Veículo Elétrico Híbrido por Plug-in

VEB – Veículo Elétrico a Bateria

VECC – Veículo Elétrico com Cédula de Carga

VEH-SP – Veículo Elétrico Híbrido Série e Paralelo

MMSC – Método de Mapeamento por Schwartz Christoffel

MEF – Método de Elementos Finitos

MS – Método dos Subdomínios

EDC - Estado de Carga

UC – Ultracapacitor

SSR - Sistema de Suspensão Regenerativa

MF - Módulos Fotovoltaicos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVO	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	VEÍCULOS MOVIDOS POR MCI	19
2.2	VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS	21
2.2.1	<i>Recarga de Veículos.....</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>Classificação de Veículos Elétricos e Híbridos.....</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Metodologias de Armazenamento e Colheita de Energia</i>	<i>26</i>
2.2.3.1	Sistema de Armazenamento em Baterias	27
2.2.3.2	Sistema de Armazenamento em Células de Carga.....	28
2.2.3.3	Sistema de Armazenamento e Colheita por Freio Regenerativo	28
2.2.3.4	Sistema de Colheita por Suspensão	30
2.2.3.5	Sistema de Colheita por Vento e Sol.....	31
2.3	MOTOR DE PISTÃO LIVRE	32
2.3.1	<i>Motor de Pistão Livre Simples</i>	<i>34</i>
2.3.2	<i>Motor de Pistão Livre Duplo</i>	<i>35</i>
2.3.3	<i>Motor de Pistão Livre Oposto</i>	<i>35</i>
2.4	GERADOR ELÉTRICO LINEAR	36
2.4.1	<i>Topologia de Geradores elétricos de ímãs permanentes</i>	<i>37</i>
2.4.2	<i>Classificação Quanto a Posição do Estator e Configuração do Linor</i>	<i>37</i>
2.4.3	<i>Classificação Quanto a Geometria dos Polos</i>	<i>39</i>
2.4.4	<i>Classificação Quanto a Distribuição das Bobinas</i>	<i>40</i>
3	MODELAGENS E SIMULAÇÃO	42
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA	42
3.1.1	<i>Método de Mapeamento por Schwartz Christoffel</i>	<i>42</i>
3.1.2	<i>Método de Elementos Finitos</i>	<i>43</i>
3.1.3	<i>Método dos Subdomínios.....</i>	<i>43</i>
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	44
3.2.1	<i>Definição do Projeto e Descrição dos Softwares</i>	<i>44</i>
3.2.2	<i>Metodologia de Simulação.....</i>	<i>46</i>
3.2.2.1	Definição e Envio de Parâmetros	46
3.2.2.2	Gráficos de Densidade de Fluxo Magnético, Fluxo Magnético, Tensão e Força	51

3.2.2.3	Análise de Gráficos	60
3.3	AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DA MÁQUINA DE REFERÊNCIA	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5	CONCLUSÃO	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

É notório o aumento da abordagem do impacto da ação humana sobre a natureza e seus efeitos em eventos globais. Algumas das principais preocupações que motivam essas discussões em eventos são os gases produzidos por indústrias por todo o planeta que afetam negativamente a camada de ozônio da terra, bem como o acúmulo de resíduos derivados do petróleo. Dentre esses resíduos se destacam, os plásticos e combustíveis fósseis (Roger, 2019). A versatilidade do plástico para diversas aplicações no cotidiano o torna o item mais presente e comum em lixões. Devido à dificuldade em lidar com os gases e com o acúmulo de itens derivados do petróleo no ambiente, acordos e normas que restringem o lançamento de substâncias poluentes são assinados, no intuito de reduzir fenômenos como aquecimento global.

A preocupação do ser humano engloba também a tecnologia de carros. Para uma indústria automobilística, a produção de um carro é dada por meio de montadoras que possuem várias peças em esteiras. Para produzir tais peças, uma grande quantidade de gases é liberada no meio ambiente. O motor mais usado em carros, o motor térmico de combustão interna, tem como combustível a gasolina, um dos principais derivados do petróleo. Assim, como resposta aos problemas, é evidente o crescimento de pesquisas científicas que buscam formas alternativas de geração de energia em veículos a partir de fontes renováveis. Fontes de energia essas que são diferentes dos combustíveis fósseis como: eólica, solar, geotérmica, hidráulica, biomassa, entre outros (ZOU et al., 2017). Costa (2006) recomenda além do uso de fontes alternativas para obtenção de combustíveis, o uso de formas mais eficazes dos recursos petrolíferos que ainda nos restam, seja por técnicas de otimização da eficiência energética, ou por processos de reciclagem e reutilização dos recursos provenientes do petróleo.

Devido ao aumento da população mundial em uma enorme quantidade, as quantidades de veículos existentes aumentaram proporcionalmente e, como consequência os danos ao meio ambiente aumentaram. Assim, a dinâmica mundial

está em busca por veículos que não dependem completamente de combustíveis como gasolina, álcool e diesel. Desse modo, devido à necessidade da diminuição de danos ao meio ambiente, surgiram os veículos híbridos (R. Baran; L. F. L. Legey, 2013; EPE, 2021).

Em linhas gerais, veículos híbridos são alimentados por dois tipos de motores: combustão e eletricidade. Assim, ele consegue funcionar com gasolina, etanol ou diesel e, ainda, ter um propulsor elétrico. Dessa forma, o sistema reúne os pontos positivos de cada uma dessas fontes de energia. Por um lado, os modelos de motor a combustão conseguem uma boa autonomia pela facilidade de abastecimento, porém a queima de combustível resulta em poluentes dispensados ao meio-ambiente (Verma et al., 2021). Já a fonte elétrica, por outro lado, faz a autonomia e o tempo de recarga das baterias ser um desconforto ao usuário. Entra, então, a facilidade dos carros híbridos: eles conseguem aproveitar os pontos positivos dos diferentes tipos de motores, trazendo muitas vantagens ao motorista, como praticidade, conforto e autonomia (Wang et al., 2022).

Em 1898, pela Porsche, foi criado o primeiro carro puramente elétrico, porém a ideia de carros elétricos foi descartada na época devido ao alto custo de produção. Já os primeiros veículos híbridos e elétricos da forma como é conhecido hoje foram produzidos no Japão em 1997. Muitos anos depois, a fabricação desses veículos se tornou mais acessível e popular devido ao aumento da conscientização sobre o meio ambiente. Com os tratados ambientais assinados pela Europa, que visavam a redução de emissão de gás carbônico por volta dos anos 2010 caracterizou um grande aumento da pressão política de cada um dos países para a indústria automotiva produzir e popularizar os veículos híbridos, desse modo, reduzindo significativamente a emissão de poluentes (M. HASAN et al., 2021).

Veículos híbridos são inteligentes, pois integram um gerador linear acoplado no eixo do motor que ao funcionar gera uma energia que pode ser usada para abastecer o gerador linear. Há estratégias de abastecimento de energia nos geradores por meio de recuperação de energia, a mais comum é o freio regenerativo. Ao utilizar o freio, parte da energia que seria desperdiçada é captado pelo sistema de recuperação de energia e transportada ao gerador para o armazenamento.

Neste âmbito, a associação do gerador linear ao motor de pistão livre, um sistema vibratório de um grau de liberdade, pode resultar em uma máquina mais

eficiente na conversão da energia química do combustível em energia elétrica (ZOU et al., 2017; YUAN et., 2018; ABDALLA; IBRAHIM; NOR, 2016; JIA et al., 2018). Devido a ser uma tecnologia recentemente introduzida no Brasil, a comunidade científica carece de bons trabalhos que guiam novos projetos, assim é imprescindível compreender as dificuldades enfrentadas no desenvolvimento de projetos de sistema motogerador para carros híbridos no contexto nacional. Dada a complexidade do problema, torna-se essencial o estudo dos modelos físicos, matemáticos e numéricos, bem como técnicas de controle e otimização das variáveis importantes.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação paramétrica de um gerador linear a ímãs permanentes para aplicações em motor de pistão livre. Com qual é possível projetá-lo e otimizá-lo. Para que o objetivo seja atingido, buscou-se as modelagens mais adequadas para ambos os equipamentos que compõem o sistema motogerador. Uma modelagem própria que combina o software de alta performance em cálculo numérico (MATLAB) e software de métodos de elementos finitos magnéticos (FEMM) foi essencial para observar o comportamento dos parâmetros do gerador linear. O modelo desenvolvido explora a reação das variáveis eletromagnéticas do sistema motogerador a mudança dos parâmetros de construção do gerador linear. Assim, este trabalho buscou-se realizar uma avaliação paramétrica que tem como finalidade entender e melhorar o desempenho do gerador linear dentro do sistema motogerador.

Ao descobrir a influência dos parâmetros sobre o desempenho do equipamento, surge-se a possibilidade de fazer um estudo de sensibilidade acerca das variáveis com base na alteração das dimensões do gerador linear. A principal alteração realizada foi a distância entre entreferros, parâmetro este que é essencial para o correto funcionamento do gerador.

Após a otimização, pretende-se controlá-las para que assim seja possível ter todos os parâmetros de ambos equipamentos presentes no sistema interligados e se

comunicando. O objetivo principal da otimização é entender o comportamento trifásico das variáveis elétricas de tensão e força, pois assim podem posteriormente serem usadas em projetos de motores elétricos.

Por fim, este trabalho tem o objetivo final de contribuir para o avanço científico e tecnológico no campo de geradores lineares para um sistema motogerador. Espera-se que esse trabalho contribua com novos protótipos e novas tecnologias em veículos que promovam a segurança, eficiência e o menor dano para o meio ambiente.

1.3 Organização do Texto

O capítulo 2 apresenta uma breve explicação sobre o funcionamento dos veículos movidos a motor de combustão interna, além da tecnologia de veículos elétricos e híbridos. Ademais é abordado os tópicos de recarga e classificação, bem como metodologias de armazenamento e colheita de energia em veículos elétricos híbridos. Ainda nesse capítulo, é introduzido os tipos de motor de pistão livre e uma revisão da tecnologia de geradores linear síncrono.

O capítulo 3 mostra toda a modelagem própria desenvolvida com base nas modelagens matemáticas estudadas. Dessa forma, com a modelagem é feito uma simulação numérica que demonstra a definição e envio de parâmetros, em sequência registra todos os gráficos de interesse obtidos, bem como uma análise dos mesmos gráficos. No fim do capítulo, ainda há um tópico que aborda a otimização ou análise de sensibilidade dos parâmetros.

O capítulo 4 consta todos os resultados obtidos, ou seja, consta o novo gerador linear síncrono obtido com os parâmetros melhorados. Ainda nesse tópico, há uma discussão sobre como os resultados afetam o desempenho do gerador.

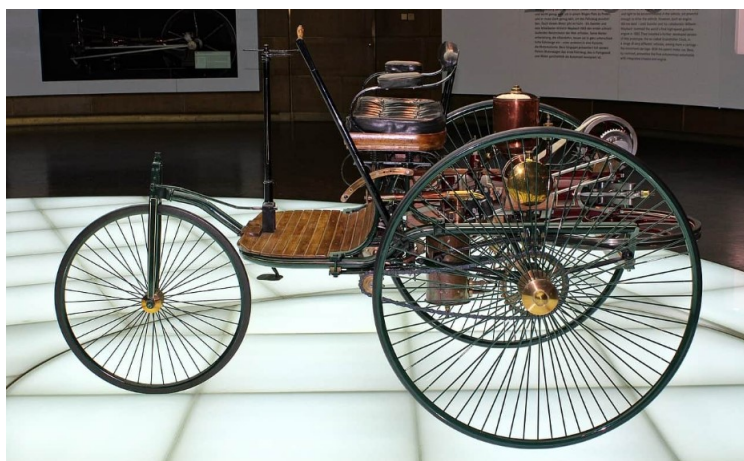
O capítulo 5 reflete como os resultados alcançados podem afetar a tecnologia de sistema motogeradores, além de indicar como o gerador otimizado pode ser utilizada em projetos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Veículos Movidos por MCI

Veículos movidos por combustão interna compõem a grande maioria dos carros nos tráfegos ao redor do mundo. A Figura 1 apresenta o primeiro carro criado pelos humanos, o carro foi criado em 1886 e possuía apenas três rodas, na época o veículo ganhou o apelido de carruagem sem cavalos, esse veículo foi criado pela Mercedes-Benz e se encontra em um museu alemão, na cidade de Stuttgart. Esse automóvel tinha um derivado de petróleo como alimentação para o motor, esse produto alimentador é usado em grande escala ainda nos dias atuais. A melhoria dos veículos de três rodas para quatro foi dada em 1891, esse padrão de quatro rodas se mantém até hoje, devido a estabilidade e equilíbrio que é proporcionado ao motorista.

Figura 1: Benz Patent Motorwagen.

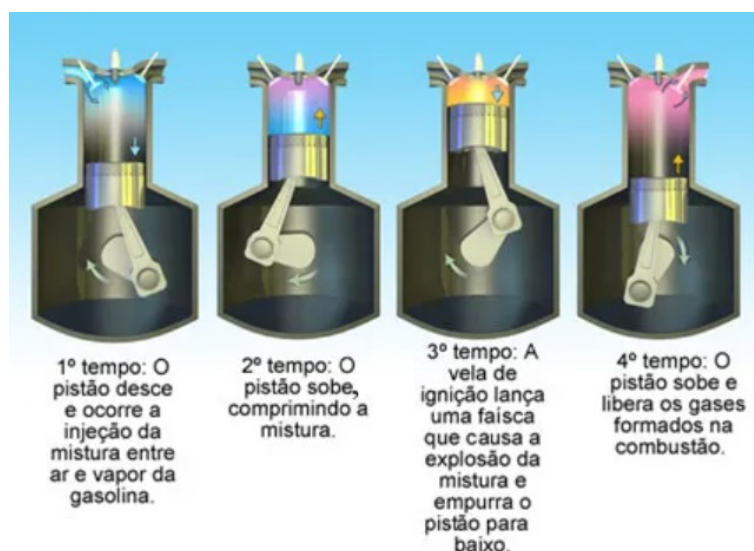


Fonte: <https://olhardigital.com.br/2023/09/06/carros-e-tecnologia/quem-inventou-o-primeiro-carro-e-quando-foi-feito/>

Veículos têm como princípio de funcionamento um motor, o motor mais usado e vendido é o de combustão interna. O MCI se caracteriza por ser pequeno e ter um cilindro de quatro tempos. Motores tem o objetivo de transforma energias no geral em energia mecânica e assim proporcionar um movimento.

O MCI, também chamado de motor de quatro tempos completa o ciclo de trabalho em quatro estágios: admissão, compressão, combustão e exaustão. No primeiro estágio o pistão desce e permite a entrada de ar por meio de uma válvula de admissão e em sequência ocorre a mistura de ar e combustível. No segundo estágio a válvula de admissão se fecha e o pistão sobe com o intuito de comprimir a mistura. No terceiro estágio a vela produz uma faísca que causa a combustão da mistura de forma que desloque o pistão de volta para baixo. No quarto e último estágio do ciclo a válvula de exaustão se abre e o pistão sobe novamente expelindo os gases formados. Após a repetição desse processo o motor transforma energia térmica em energia mecânica. A Figura 2 exemplifica os quatro estágios de um ciclo do motor de quatro tempos.

Figura 2: Ciclo do motor de quatro tempos.



Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>

Os pistões (carros de passeio costumam ter de quatro a seis pistões), que ficam subindo e descendo, movem um eixo de manivela, chamado virabrequim, que está ligado às rodas por motores, fazendo-as girar e, conseqüentemente, o carro andar. Uma analogia que pode ajudar no entendimento desse processo é pensar em como fazemos uma bicicleta movimentar-se. Fazemos com as pernas movimentos de sobe e desce, assim como os pistões do carro.

2.2 Veículos Elétricos e Híbridos

Os ditos veículos híbridos ou “carros verdes” é uma tecnologia recente, o que acarreta em ter um valor aquisitivo ainda elevado. Mas trazem consigo prerrogativas de menor emissão de poluentes e a promessa de uma melhor eficiência energética. Por isso muitas empresas atualmente vêm investindo nesse tipo de tecnologia. Eles não são somente utilizados em modelos de passeio, mas também em outros meios de transporte como ônibus, locomotivas e veículos fora de estrada. Alguns estudos estão sendo desenvolvidos para redução de custos nesses projetos e uma das possibilidades está concentrada justamente no uso do motor a pistão livre (GUSTAVO, 2021).

VEH são veículos nos quais duas ou mais fontes distintas de energia são empregadas no sistema de propulsão. A combinação mais comum é a utilização de MCI em conjunto com um banco de baterias (REVOREDO, 2007). A compreensão a respeito destes veículos foi feita com a finalidade de unir as principais características dos VEP, tais como sua grande eficiência energética e a emissão nula de poluentes, com a principal atributo dos veículos convencionais que é a de possuir uma grande autonomia (GUSTAVO, 2021).

O propulsor elétrico em VEH podem ser de dois tipos: plug-in, que utiliza a tomada residenciais para carregar a rede elétrica do veículo ou a “tradicional” que utiliza a carga gerada pela frenagem e também pelo motor de combustão interna, que funciona como um gerador.

2.2.1 Recarga de Veículos

O modelo de recarga plug-in pode ser executado de duas formas, na própria casa ou em estações de recarga de energia. A principal diferença no carregamento é devido ao tempo, em casa as recargas são mais lentas.

A recarga em casa feita pode ser feita em horários mais tranquilos, como por exemplo, madrugada. Já para as estações, há a necessidade de um sistema de

carregamento rápido ou de carregamento simultâneo. O sistema de carregamento rápido, fast charger, evita grandes tempos de recarga nas estações, enquanto o sistema de carregamento coletivo, smart, permite o uso simultâneo de um carregador.

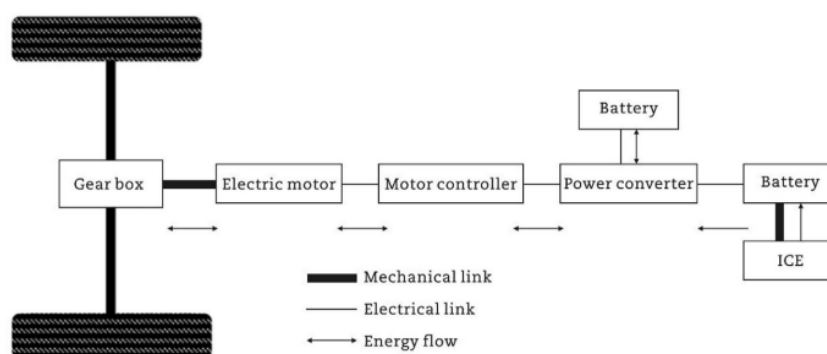
Outra alternativa muito presente em híbridos é a acoplagem de um gerador com o motor de combustão interna, a recarga da fonte elétrica é feita pelo próprio motor por meio de tecnologias de recuperação de energia. O modo de recuperação mais comum e usado atualmente é a de freio regenerativo.

2.2.2 Classificação de Veículos Elétricos e Híbridos

Segundo Tran et al. (2020) existem duas configurações básicas para o powertrain do VEH: paralelo e série, enquanto Verma et al. (2021) afirmam que existem três configurações de powertrain do VEH: série, paralelo e duplo.

Na topologia em série, Tran et al. (2020) afirma que um gerador acionado por um motor de combustão interna (MCI), fornece a energia elétrica junto com uma unidade de armazenamento de energia para um motor elétrico que impulsiona as rodas. Já Verma et al. (2021) complementa que o motor de combustão interna carrega a bateria no qual fornece energia para um conversor de potência que leva energia para o motor elétrico. Quando o motor de combustão interna está em contato com a bateria não há perda de eficiência. Na Figura 3, um exemplo da topologia em série pode ser visto.

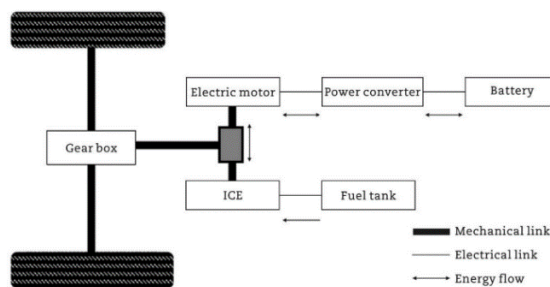
Figura 3: Arquitetura em série.



Fonte: Verma et al. (2021)

No VEH em paralelo, Tran et al. (2020) fala que a energia gerada por um MCI e um motor elétrico é combinada para impulsionar as rodas. Já Verma et al. (2021) diz que há dois sistemas, um mecânico e outro elétrico, o elétrico possui bateria, conversor de potência e ME enquanto o mecânico possui o tanque de combustível e o MCI, a vantagem é que pode ser usado um dos sistemas se o outro falhar. Na Figura 4 pode ser observado a topologia em paralelo.

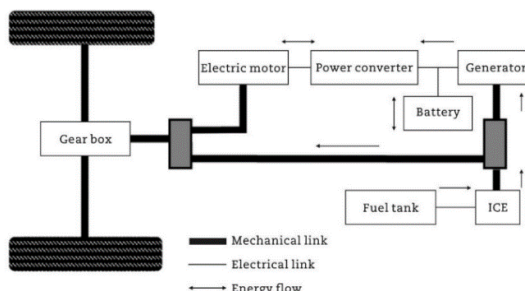
Figura 4: Topologia em paralelo.



Fonte: Verma et al. (2021).

Na configuração combinada da cadeia cinemática do VEH, mencionada e chamada de série-paralelo (VEH-SP) por Tran et al. (2020), o veículo combina as vantagens das configurações em série e em paralelo, mas possui uma cadeia cinemática e controle de fluxo de energia mais complexos. Ademais, nos VEH duplos Verma et al. (2021) propõe que têm dois sistemas de powertrain, primeiramente há um tanque de combustível que fornece o líquido para o motor de combustão interna, no qual oferece energia para um gerador, no primeiro sistema de powertrain há apenas o motor de combustão interna e no outro temos o gerador, bateria, conversor de potência e motor elétrico. A Figura 5 nos dá uma noção da topologia dupla.

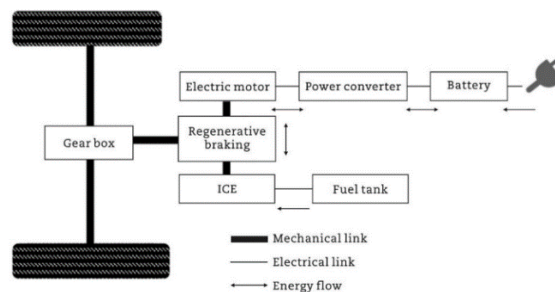
Figura 5: Exemplar da topologia dupla.



Fonte: Verma et al. (2021).

No trabalho realizado pelo Verma et al. (2021) ainda consta um exemplo da topologia em VEHP. O exemplar pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Topologia existente no VEHP.



Fonte: Verma et al. (2021).

De acordo com Singh et al., (2005), engloba os híbridos como um tipo dentro da divisão de VEPs. VEPs são principalmente classificados em quatro tipos, com base na fonte de eletricidade para a propulsão do veículo. Dois dos quatro tipos são puramente elétricos, eles são VEB e VECC, já os dois restantes são híbridos, eles são VEH e VEHP.

V. Krithika & C. Subramani (2018) dizem que os VEHs podem ser divididos em quatro tipos com base em seu grau de hibridização: VEH leve, VEH médio, VEH completo e VEHP.

- Os VEHs leves utilizam eletricidade durante paradas e eventos de frenagem, permitindo que o MCI seja desligado, mas não possuem um modo totalmente elétrico.
- Os VEHs médios podem operar em modo totalmente elétrico por um tempo limitado; além disso, o motor elétrico (ME) pode operar em paralelo com o MCI. A principal diferença entre um VEH médio e um VEH completo é o tamanho da bateria.
- Os VEHs completos têm pacotes de bateria maiores para percorrer longas distâncias.
- Os VEHPs aplicam tanto um MCI quanto uma cadeia cinemática elétrica, como um HEV normal, mas a unidade elétrica atua como a principal fonte de propulsão, o que significa que os VEHPs tendem a ter baterias com mais capacidade em comparação com outros VEHs. A diferença entre VEHP e VEH

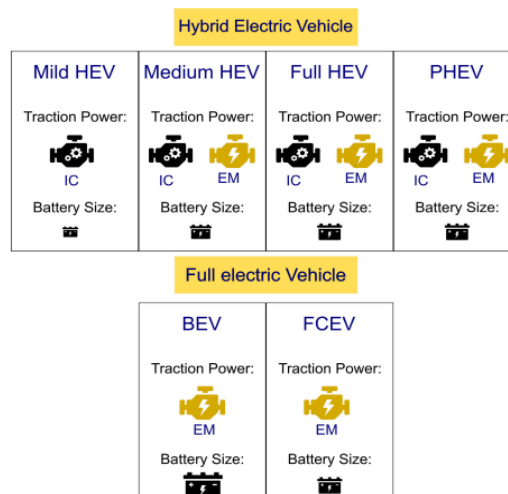
completo é a capacidade dos VEHPs de serem conectados à rede elétrica para recarga.

Além disso, Krithika & Subramani (2018), também chamam um VE que depende exclusivamente de uma cadeia cinemática elétrica de VEP. Hoje, os veículos elétricos a bateria (VEBs), que dependem apenas de baterias para acionar motores elétricos, são muito populares. Uma fonte adicional de eletricidade pode ser obtida a partir de uma célula de combustível que atua como uma unidade a bordo para geração de eletricidade. Um veículo elétrico com célula de combustível (VECC) depende do hidrogênio como combustível, com alta energia específica para gerar eletricidade, conferindo-lhe a vantagem de emissões praticamente nulas.

Em geral, reações químicas geram corrente. A eletricidade produzida é utilizada para impulsionar o veículo ou é armazenada em uma unidade de armazenamento de energia, como uma bateria, UC ou uma combinação de ambos (M. Kandidayeni; J. P. Trovão, M. Soleymani; and L. Boulon, 2022).

Quanto ao fornecimento de energia para o motor, há 4 tipos presentes na tecnologia de veículos elétricos: VEH; VEHP; VEB e VECC. A Figura 7 mostra a classificação dos tipos de veículos quanto ao tamanho da bateria e potência de tração, bem como os tipos de motores existentes.

Figura 7: Classificação dos veículos que usam eletricidade.



Fonte: (Hosseini et al., 2023)

VEH possuem maior eficiência por terem 2 fontes de energia, elétrica e mecânica. Cerca de 96,2% de eficiência, 158 km/h, 1880 kg, 435 km, porém cerca de 95% dos carros elétricos ficam parados em estações de recarga de bateria e têm baterias comuns que duram 6-8h e as rápidas que duram 20-40min e distância percorrida é de 100-400km (Verma, 2021).

VEHP há dois sistemas de powertrain, em um a bateria é carregada pelo plugging que fornece energia para o conversor de potência que liga o motor elétrico e que por uma ligação mecânica ativa o freio regenerativo e assim é ligado aos eixos, em outro é por meio do tanque de combustível que fornece o líquido para o motor de combustão interna que por meio de uma ligação mecânica ativa o freio regenerativo (Verma, 2021).

VECC a arquitetura é parecida com os carros de motores de combustão interna, porém possui um gerador que fornece tração para o motor, nas células de proton a eficiência do pneu é de 48% que é maior do que a da combustão interna que é de 25-35% (Verma, 2021).

2.2.3 Metodologias de Armazenamento e Colheita de Energia

A principal barreira dos VEHs é a capacidade de armazenamento, também temos que a fonte de energia da bateria custa 30% do total do carro. Em VEB ou em VE, apesar de não poluírem o meio ambiente quando em execução, poluem no momento em que são produzidos os componentes de bateria e carregadores da bateria (Verma, 2021).

Em carros de motor de combustão interna apenas 25% é convertido em energia usável, o resto vira calor e perdas por atrito. Em carros elétricos 80% é convertido em energia usável, porém os problemas são a pequena distância que é possível percorrer, além da bateria demorar a ser recarregada (Verma, 2021).

2.2.3.1 Sistema de Armazenamento em Baterias

O sistema de armazenamento em VEB inclui uma bateria, UC ou ambos e podem conter diferentes tipos e números de conversores DC (Hosseini et al., 2023).

De acordo com o Hosseini et al, existem vários tipos de baterias hoje amplamente aceitas no mercado. Contudo as seis mais comuns são: chumbo-ácido; níquel-cádmio; níquel-hidreto metálico; íon de lítio; polímero de íon de lítio e níquel sódio cloreto.

- As baterias de chumbo-ácido ainda são amplamente utilizadas hoje devido ao baixo custo de produção e à impressionante relação potência-peso. No entanto, não são recomendadas em FEVs. Isso ocorre porque essas baterias não foram projetadas para operar em carga de estado parcial e assim a colheita é piorada.
- As baterias níquel-cádmio têm longa duração e sempre foram promissoras para as indústrias de carros elétricos, porém a aplicação é reduzida por ser prejudicial ao ser humano.
- Baterias de níquel-hidreto metálico se destacam pela velocidade com que é carregado e pela fácil manutenção, contudo a capacidade de armazenamento não é maior entre as baterias.
- Baterias de íon de lítio mostram uma grande capacidade de armazenamento e uma alta densidade de energia, além de serem rapidamente carregadas, possuem uma pequena taxa de descarga e capacidade de operar em uma larga faixa de temperatura. Atualmente, essa bateria está dominando o mercado.
- A bateria de polímero de íon de lítio ganhou popularidade rapidamente e já superou outras baterias em termos de uso, isso se deve ao grande uso em eletrônicos. Como contraponto, são frágeis e possuem uma vida útil pequena.
- Com uma aparência de zebra, a bateria níquel sódio cloreto é a melhor opção em consumo de energia, mas são problemáticas no momento da operação.

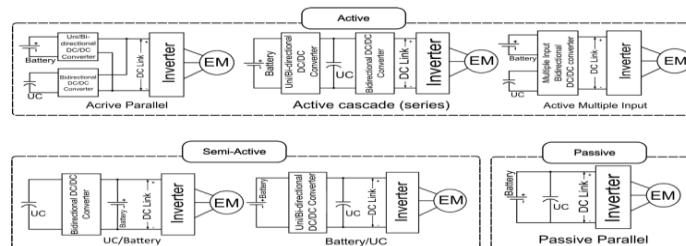
UC são unidades de armazenamento que não tem nenhuma interferência química. Eles possuem um ciclo de vida e uma densidade de potência maior do que as baterias, isso os tornam bons candidatos a serem usados com a tecnologia de freio regenerativo (Hosseini et al., 2023).

2.2.3.2 Sistema de Armazenamento em Células de Carga

Segundo Hosseini et al. (2023), a principal característica célula cheia em carros elétricos é fornecer uma potência constante para aplicações que possuam uma dinâmica lenta, como por exemplo, submarinos e veículos lentos no geral. Normalmente as células requerem um sistema externo de colheita de energia, pois não conseguem realizar um carregamento rápido sem queda de tensão. As células ocupam o papel principal em carros elétricos, mas demandam uma fonte auxiliar.

De acordo com Hosseini et al. (2023), as células são capazes de mesclar com a tecnologia de baterias e UC. O resultado de ambas tecnologias juntas geram um sistema complexo e de difícil controle, entretanto tem mostrado a maior eficiência em conservar energia dentre os outros sistemas de armazenamento em VE.

Figura 8: Sistema de armazenamento combinado.



Fonte: (Hosseini et al., 2023).

2.2.3.3 Sistema de Armazenamento e Colheita por Freio Regenerativo

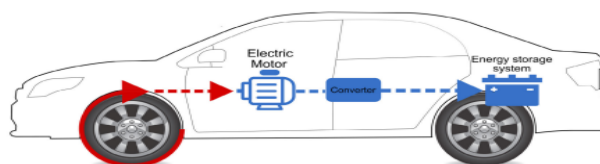
Durante uma viagem, a maior parte da energia é direcionada para as rodas para acelerar o veículo e atingir uma velocidade desejada. Uma quantidade considerável de energia é perdida durante o processo de frenagem de um veículo em movimento, onde a energia cinética é convertida em calor entre as pastilhas de freio e a roda. Em cidades com tráfego intenso, mais da metade da energia é dissipada em

padrões de parada e movimento (Y. Gao, L. Chen, M. Ehsani, 1999). Recapturar essa energia cinética desperdiçada é a principal ideia por trás da frenagem regenerativa.

Durante o processo de frenagem regenerativa, o motor elétrico atua como um gerador e produz um torque negativo nas rodas. Dessa forma, parte da energia cinética é convertida em energia elétrica armazenada no sistema de armazenamento de energia (Peng et al., 2008).

A Figura 9 ilustra o processo de frenagem regenerativa. O motor elétrico não é a única forma de conservar energia, e uma bomba hidráulica também pode ser usada para armazenar energia em um acumulador de alta pressão. O fluxo entre um acumulador de baixa pressão e um acumulador de alta pressão pode aplicar a energia armazenada para impulsionar o veículo quando necessário (Q. Zhao, H. Zhang, Y. Xin, 2021).

Figura 9: Processo de freio regenerativo.



Fonte: (Hosseini et al., 2023).

Em outros tipos de sistemas de armazenamento de energia, como por exemplo, o sistema de armazenamento de energia por molas, a energia cinética durante o processo de frenagem é armazenada em uma mola comprimida, e a energia potencial da mola converte de volta em energia cinética quando necessário. Sistemas de armazenamento de energia hidráulica, sistemas de armazenamento de energia por molas e sistemas de armazenamento de energia por volante que armazenam a energia cinética de um volante giratório foram discutidos de maneira abrangente na literatura (Hamada, Orhan, 2022).

As baterias são a forma mais comum de armazenar energia em VEP e desempenham um papel significativo, especialmente porque a frenagem regenerativa gera uma alta potência quando está ativa. A capacidade da bateria, o nível de tensão e a potência da bateria variam com base nos diferentes tipos de bateria. Outro fator importante nas baterias é o estado de carga (EDC), que é crucial no processo de

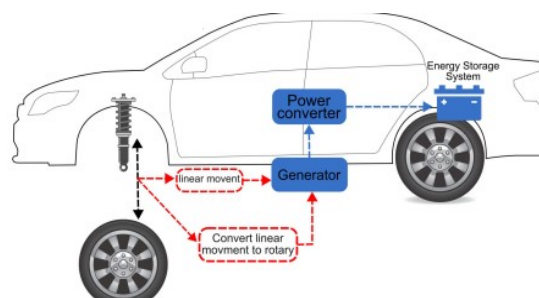
frenagem regenerativa. Para todos os tipos de baterias e, em particular, baterias de chumbo-ácido, o EDC afeta significativamente a aceitação de carga, sendo um fator relevante durante a frenagem regenerativa (Budde-Meiwes et al., 2013). Além do EDC, outro desafio para a frenagem regenerativa em relação às baterias é a temperatura. Esses dois fatores impactam significativamente a capacidade do VE de colher energia de frenagem (Hosseini et al., 2023).

2.2.3.4 Sistema de Colheita por Suspensão

Quando um veículo se move em uma estrada, há a possibilidade de aproveitar as vibrações verticais causadas por estradas irregulares e convertê-las em energia elétrica.

De acordo com Hosseini et al (2023), tradicionalmente, amortecedores em paralelo com molas de suspensão são aplicados para diminuir a vibração dissipando essa energia como calor, mas um SSR oferece a perspectiva de colher vibrações verticais. Quando um veículo atravessa a estrada, há um movimento linear no sistema de suspensão. Esse movimento é utilizado para gerar eletricidade de forma direta ou indireta, por fim, a eletricidade é armazenada em um SAE. Em um carro de passageiros típico de tamanho médio, existe o potencial para colher energia variando de 100 W a 400 W em uma estrada boa com aproximadamente 96 km/h. A Figura 10 mostra o esquema do SSR.

Figura 10: Esquema de colheita de energia pela suspensão.



Fonte: (Hosseini et al., 2023).

No processo de colheita de energia, há fatores que afetam a energia final recebida pelo sistema. Estradas esburacadas, uma maior velocidade, maior massa de veículo e grossura do pneu melhoram a quantidade de energia coletada.

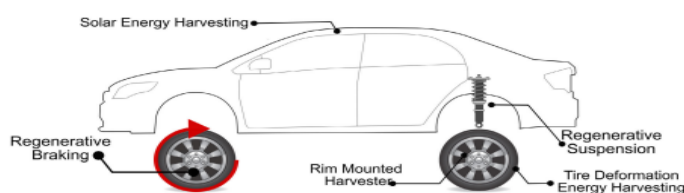
2.2.3.5 Sistema de Colheita por Vento e Sol

Estudos dizem que entre 30 a 47 por cento de energia direcionada as rodas são perdidas devido à resistência do vento. A solução desse problema é melhorar a aerodinâmica do veículo como um todo. Uma estrutura híbrida de colheita, chamada de flutter piezo-eletromagnética, foi proposta para recuperar energia do vento e vibrações durante o movimento do veículo. Sua estrutura incluía uma viga piezoelétrica com um ímã na ponta, uma asa rígida e um colhedor eletromagnético fixado na frente da asa. O resultado experimental mostrou uma potência colhida de 14,5 mW no colhedor piezoelétrico e 31,8 mW no colhedor eletromagnético a uma velocidade do vento de 18 m/s (Hosseini et al., 2023).

Colher energia solar e convertê-la em eletricidade para diferentes aplicações tem sido estudado por muitos anos, e com a tendência atual de mercado, os preços e a atenção dos MF e VEP com painéis solares cresceram. Entretanto, as eficiências dos MF ainda são baixas mesmo em dias ensolarados. Atualmente, um veículo todo propulsionado pela energia gerada de MF é impraticável, porém tem se mostrado ser promissor. Além da energia coletada por vento e por raios solares, há também estudos que dizem que no futuro teremos energia coletadas por ondas eletromagnéticas.

O objetivo final de todos esses sistemas é unifica-los em apenas um sistema que englobe todos, a Figura 11 exemplifica sistemas e suas localizações nos veículos.

Figura 11: Sistema único de armazenamento, colheita e recuperação de energia.



Fonte: (Hosseini et al., 2023).

2.3 Motor de Pistão Livre

Os primeiros protótipos do motor de pistão livre surgiram, quase que simultaneamente, em locais diversos da Europa nas décadas de 20 e 30 do último século. Contudo, o crédito da nova invenção é dado a Pescara, advogado e inventor nascido na Argentina e residente do velho continente na época, pelo fato de sua patente, dentre as várias registradas no período, ter sido a primeira datada, no ano 1928. A patente de Pescara descreve um aparato movido pelo motor de pistão livre de uma câmara somente e cuja função era produzir ar comprimido. Contudo, Pescara também tomou o cuidado com a possibilidade de expandir e garantir a patente para diversas aplicações (Roger, 2019).

Nos últimos anos, o motor de combustão interna tem perdido espaço devido à futura escassez dos recursos minerais, principalmente o petróleo e das altas taxas de emissão de poluentes provenientes desses combustíveis. Diante disso, Jia (2016) relata que o regresso a esse tipo de motor, a pistão livre, é devido a uma maior eficiência termomecânica. Enquanto os motores a pistão livre têm cerca de 40 a 50% de eficiência, os 'tradicionais' têm a eficiência entre 30 e 40%. Em conjunto a isso, o retorno foi fomentado por precisar atender as restrições dos órgãos regulamentadores quanto a emissão de poluentes, além da disponibilidade de técnicas mais sofisticadas de controle e atuação de sistemas (Gustavo, 2021).

Brunetti (2012) afirma que o motor de pistão livre é uma máquina térmica que pode ser classificada como motor de combustão interna, quanto ao comportamento do fluido ativo, e classificado em motor alternativo, quanto à forma de se obter trabalho mecânico. Já Mikalsen (2008) diz que motores de pistão livre são motores lineares, não possuidores do mecanismo biela-manivela, assim sendo que o movimento do pistão não é dado por este mecanismo e sim pela resultante de forças atuando sobre o mesmo. Entretanto, Jia (2016) descreve que os motores de pistão livre como motores lineares nos quais o uso do mecanismo biela-manivela é eliminado e o pistão e outros elementos associados a ele, possui movimento livre e linear.

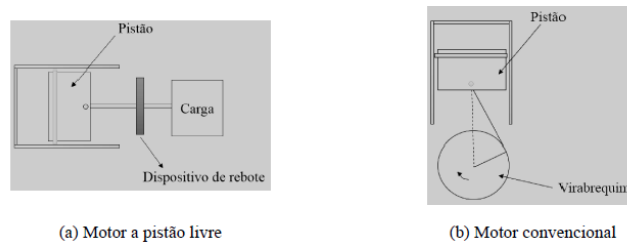
Do ponto de vista termodinâmico, máquinas térmicas e motores de pistão livre possuem a mesma teoria, logo é possível aplicar os mesmos conceitos e observar os

mesmos processos que acontecem em uma máquina elétrica, logo os processos de 2 ou 4 tempos também valem para o motor de pistão livre (Roger, 2019).

Já do ponto de vista dinâmico, sabe-se que motores a pistão livre não possuem a presença do mecanismo biela-manivela, assim tem-se que o movimento do pistão é determinado pela resultante das forças que atuam sobre ele, independentemente da cadeia cinemática (Roger, 2019).

O termo pistão livre é comumente utilizado para distinguir o motor linear de um motor de virabrequim rotativo. O pistão é considerado "livre", pois seu movimento não é restringido pela posição do virabrequim, mas é determinado apenas pela interação entre as forças atuantes no volume de controle. A Figura 12 mostra uma comparação entre o motor alternativo convencional e o motor linear.

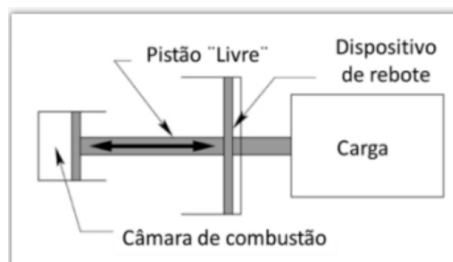
Figura 12: Comparação entre os motores: a) Motor a pistão livre b) Motor alternativo convencional:



Fonte: (BENTO et al., 2019).

Os motores de pistão livre têm a câmara de combustão, o pistão, dispositivo de rebote e carga como componentes. O funcionamento se deve ao fato de espremer o ar dentro do pistão para assim aquecê-lo e gerar a reação em um dos tempos do motor. A configuração básica de um motor de pistão livre está presente na Figura 13.

Figura 13: Configuração básica de um motor de pistão livre.



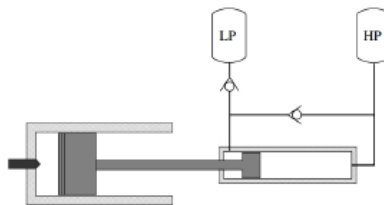
Fonte: (BENTO et al., 2019).

Na câmara de combustão acontecem processos físicos e químicos que envolvem o fluido ativo. Os processos dependem do ciclo e do regime no qual o motor foi projetado para trabalhar. O dispositivo de rebote, ou ressalto, armazena parte da energia produzida durante o processo de expansão. Essa energia armazenada é garante que haja compressão suficiente para o próximo processo de combustão, assegurando assim, o funcionamento do equipamento em regime constante (Gustavo, 2021). Há vários tipos de motor de pistão livre, os mais comuns são o motor de pistão simples, o motor de pistão duplo e o motor de pistões opostos.

2.3.1 Motor de Pistão Livre Simples

O motor de pistão simples possui apenas três componentes, câmara de combustão, a carga e o pistão. A Figura 14 mostra um exemplo de configuração de um motor de pistão livre simples.

Figura 14: Configuração de um motor de pistão simples.



Fonte: (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007).

O motor presente na Figura 14 possui como elemento de carga um cilindro hidráulico, logo a energia gerada pelo equipamento é direcionada para pressurização do fluido que passa pelo cilindro. Deve-se observar, no entanto, que o dispositivo de carga atua também como rebote, por meio do controle de válvulas (Roger, 2021).

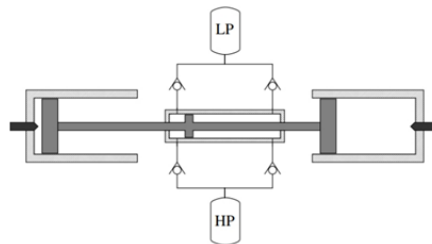
Dentre as características desse motor, cita-se maior controlabilidade e a fácil obtenção da frequência, taxa de compressão e curso do pistão. Além disso, devido a existência de uma única câmara de combustão, o desbalanceamento das forças e a

consequente presença de vibrações são características inerentes a essa configuração (MIKALSEN, 2008; JIA, 2016).

2.3.2 Motor de Pistão Livre Duplo

Este tipo de configuração pode dispensar a necessidade do dispositivo de rebote, sendo o trabalho para compressão do gás contido em um cilindro fornecido pelo processo de expansão ocorrido no outro (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007; JIA, 2016). Assim, uma construção mais simples e mais compacta do equipamento é obtida e, conseqüentemente, uma maior razão entre potência e peso do motor (ROGER 2019). O motor pode ser visto na Figura 15.

Figura 15: Configuração de um motor de pistão duplo.



Fonte: (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007).

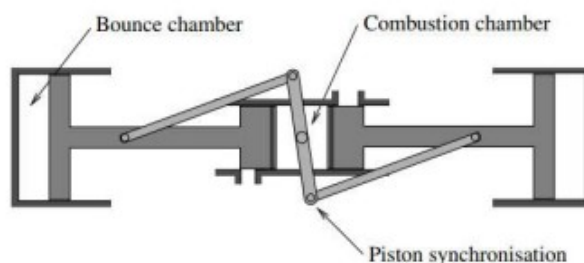
Os motores de pistões duplos possuem alguns problemas. O controle do movimento do pistão, acentua-se o controle do deslocamento e taxa de compressão, essas estratégias de controle ainda são pesquisadas atualmente.

2.3.3 Motor de Pistão Livre Oposto

O motor de pistões opostos consiste, essencialmente, em um par de pistões que compartilham de uma mesma câmara de combustão, isso indica, que os mecanismos de rebote e carga devem estar associados ao mesmo par (Roger, 2019).

O desenho que representa o motor com pistões opostos constam na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 16: Motor de pistões opostos.



Fonte: (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007).

Jia (2016) cita como principais vantagens dessa configuração o comportamento balanceado do motor, do ponto de vista dinâmico, e conseqüentemente a ausência de vibrações. Além disso, a eliminação do cabeçote resulta em uma perda de calor reduzida, e o fluxo unidirecional que aumenta a eficiência do processo de admissão e exaustão simultânea dos gases combustível e residuais do processo. Como desvantagens, a autora cita a necessidade dos mecanismos de sincronização e de rebote, elevando a complexidade do equipamento.

2.4 Gerador Elétrico Linear

De acordo com Boldea (2017), cerca de 40 % da energia em indústria é elétrica, isso ocorre devido às vantagens associadas a esse tipo de energia, como a alta disponibilidade, facilidade na transmissão e a ausência de emissão de poluentes.

Máquinas elétrica convertem energias em energia elétrica. Usualmente, máquina elétrica são rotativas devido a normalmente converterem energia mecânica vindas de eixos rotativos. Contudo, a partir da década de 1960 o uso de máquina elétricas lineares (MEL) tem aumentado progressivamente (Boldea, 2017). Na MEL, a energia mecânica tem o movimento linear.

Um gerador é uma máquina elétrica que é primordial para veículos elétricos e híbridos em geral.

A tecnologia de geradores foi deixada de lado por muito tempo, porém com o surgimento da eletrônica de potência, aliado à necessidade de mecanismos de controle linear, o desenvolvimento das máquinas elétricas lineares reaparece com novas topologias, materiais, modelos e métodos de construção (BOLDEA, 2017).

Geradores lineares normalmente envolvem ímãs em sua construção. O ímã ideal é o que é feito de um material que o deixa ‘permanente’.

2.4.1 Topologia de Geradores elétricos de ímãs permanentes

Há um grande número de topologias e configurações a serem consideradas na construção de uma máquina elétrica linear. Na Tabela 1, consta as classes quanto a posição do estator, configuração do linor, geometria dos polos e distribuição das bobinas.

Tabela 1: Classes de configurações e topologia de um gerador elétrico linear. Fonte: (Gysen, 2011).

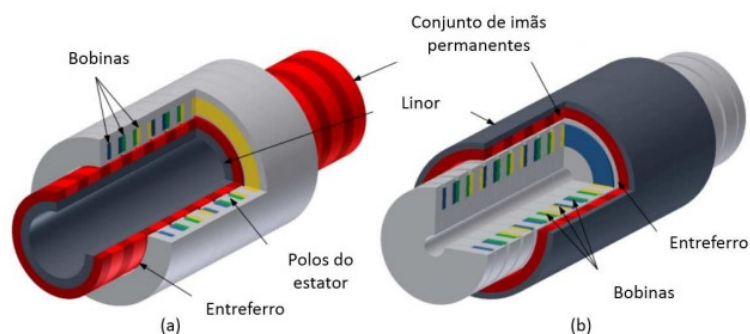
Classe segundo ...	Denominação
Posição do estator	Topologia com magnetização interna
	Topologia com magnetização externa
Configuração do linor	Magnetização radial com eixo ferroso
	Magnetização radial com ferro interposto
	Magnetização axial com ferro interposto
	Quasi-Halbach
Geometria dos polos	Estator com polos não salientes
	Estator com polos salientes não-retangulares
	Estator com polos salientes retangulares
Distribuição das bobinas	Concentrado
	Distribuído
	Multi-camadas
	Singular

2.4.2 Classificação Quanto a Posição do Estator e Configuração do Linor

O conjunto de ímãs permanentes podem ser posicionados de maneiras diversas com o fim de direcionar os seus polos de maneira mais adequada, criando

assim fluxos de campo magnéticos mais coerentes (ROGER, 2019). Como em um gerador linear, o campo gerado deve passar pelo entreferro para ser conduzido pelos polos do estator, resultando na corrente induzida, é preferível que os polos dos ímãs sejam posicionados de tal forma que o campo no entreferro seja predominantemente radial (GYSEN, 2011; BOLDEA, 2015; YAN et al., 2016). A Figura 17 mostra as classes segundo posição do estator.

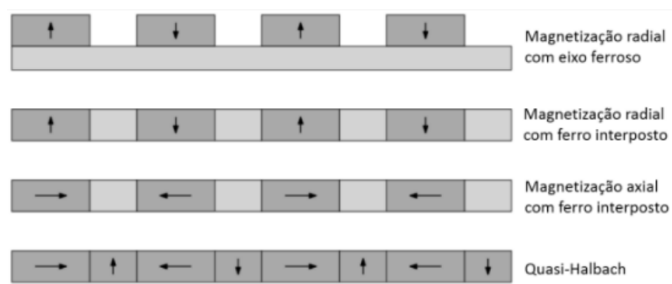
Figura 17: Exemplos das classes de GEL. (a) Topologia com magnetização externa. (b) Topologia com magnetização interna.



Fonte: Gysen (2011).

Como verificado na figura acima, para a configuração (a), é necessário utilizar um eixo, ou suporte, composto por um material magnético mole, para que a permeabilidade no retorno do campo magnético gerado aumente e, como consequência, o fluxo magnético no entreferro aumente (GYSEN, 2011). O mesmo efeito é também obtido com o uso de material ferromagnético entre os ímãs, como indicado na configuração (b).

Figura 18: Possíveis maneiras de magnetização.



Fonte: Gysen (2011).

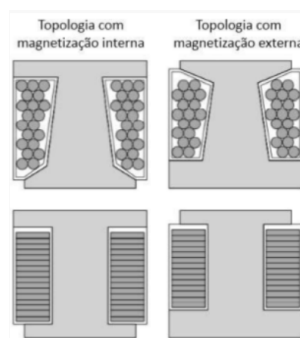
A substituição dos ímãs com polarização radial para axial, resulta em menor relutância do caminho traçado pelo fluxo de campo magnético, e, portanto, uma maior concentração de campo é presente no entreferro (GYSEN, 2011). Como ilustrado, esta configuração não requer o uso de eixo com material magnético mole, pois o seu uso iria desviar o campo do entreferro. Segundo (YAN et al., 2016), uma vantagem dessa configuração é o menor custo de manufatura deste tipo de ímã. Quando ímãs com polarização radial e axial são intercalados, a configuração denominada "quasi-Halbach" é obtida. Como na configuração anterior, não há necessidade de utilizar um eixo de material magnético mole, resultando em menores amplitudes de força coercitiva (GYSEN, 2011). Contudo, devido ao uso de ímãs com polarização radial, é uma solução com maior custo, visto que os ímãs com esta polarização são mais caros.

2.4.3 Classificação Quanto a Geometria dos Polos

O estator é classificado segundo a existência ou ausência de polos salientes, estruturas formadas com o objetivo de concentrar o fluxo de campo magnético no interior das bobinas, sendo esta classificação simplesmente: polos salientes ou polos não salientes (ROGER, 2019).

As máquinas elétricas de ímãs permanentes com polos não salientes não apresentam forças coercitivas, isso ocorre devido à ausência dessa sobresalência de material ferromagnético, contudo menores densidade de força induzida são obtidas devido a maior distância do entreferro.

Figura 19: Magnetização interna e externa.



Fonte: Gysen (2011).

Geometrias não-retangulares provém da possibilidade de variar a largura dos polos na direção radial de modo a aumentar a área das ranhuras e a área efetiva das bobinas (ROGER, 2019).

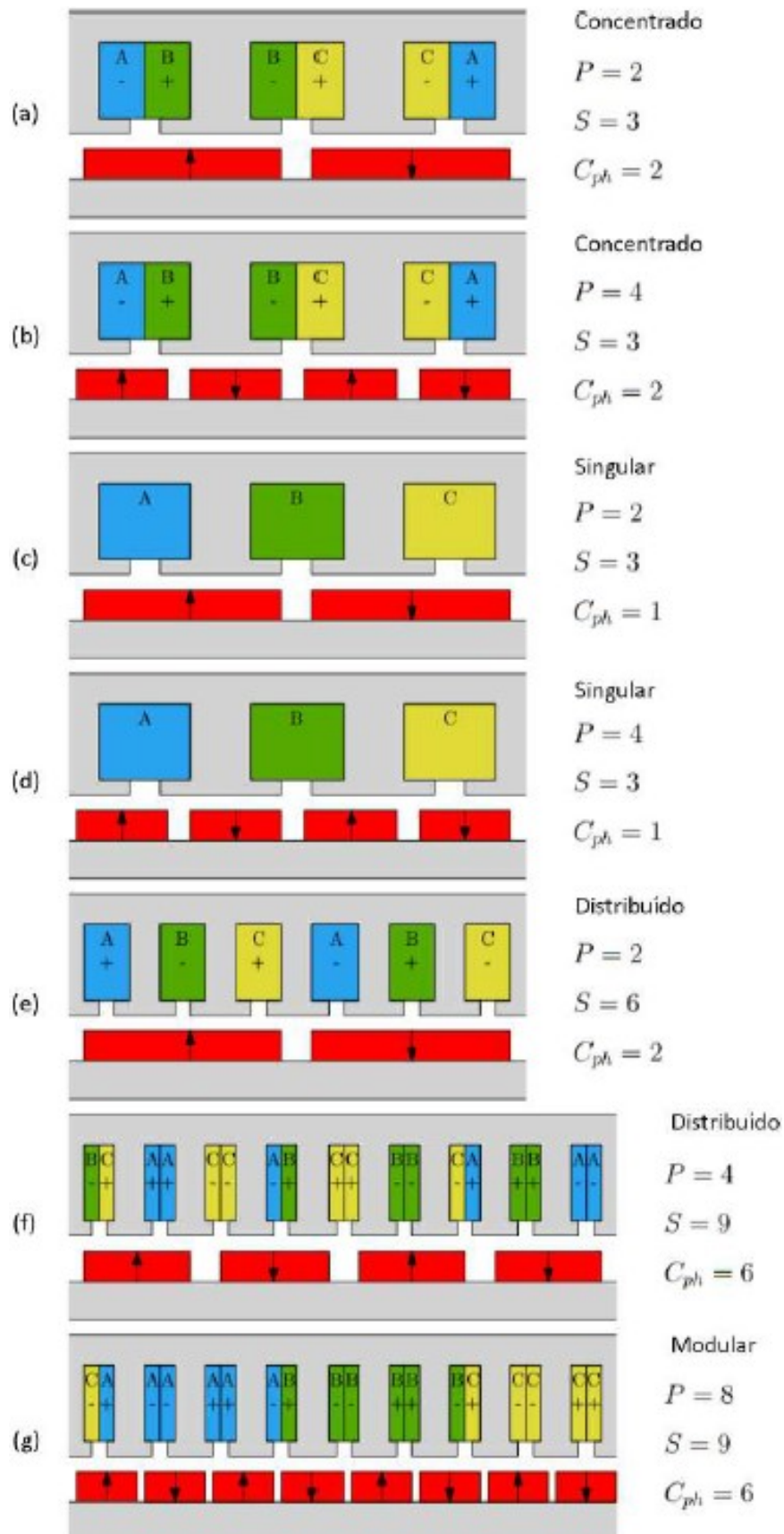
2.4.4 Classificação Quanto a Distribuição das Bobinas

A distribuição das bobinas deve ser pensada de tal forma, que permita uma razão fixa entre polos magnéticos e ranhuras bobinadas, além de maximizar o fluxo concatenado. Para máquinas elétricas lineares, existem mais possibilidades construtivas para obter tal objetivo em relação às máquinas rotativas (GYSEN, 2011).

A classificação contém alguns parâmetros característicos do trecho ativo da máquina. Dentre esses parâmetros, observa-se o número de polos magnéticos, de ranhuras, além do número de terminais de enrolamento por trecho ativo (Roger, 2019).

O uso de um gerador elétrico linear acoplado ao motor de pistão livre é um conceito que atrai a atenção dos pesquisadores desde o momento em que foi concebido (JIA, 2016). O motogerador de pistão livre ainda não é disponibilizado no mercado comercial. A razão disso são os obstáculos impostos pela ausência do mecanismo biela-manivela.

Figura 20: Classificação dada segundo a distribuição das bobinas.



Fonte: Gysen (2011).

3 MODELAGENS E SIMULAÇÃO

3.1 Modelagem Matemática

Um dos obstáculos, quando se pretende projetar uma máquina elétrica, é modelar e calcular o campo eletromagnético e a sua distribuição no interior da máquina. O surgimento de máquinas com alta precisão, aceleração e densidade de força cada vez maiores destacam a necessidade da compreensão da distribuição do campo, bem como destacam paralelamente o desenvolvimento de métodos de cálculo mais precisos (BOLDEA, 2015).

Historicamente, o método do circuito magnético equivalente foi o primeiro método utilizado para obter a distribuição do campo magnético. Este método consiste em discretizar o interior da máquina elétrica, ou uma parte representativa do mesmo, substituindo os seus elementos por modelos teóricos e associando-os de forma a montar um circuito semelhante a um circuito elétrico (ROGER, 2019).

Quanto aos métodos de modelagem de geradores elétricos lineares, os mais famosos e utilizados são a modelagem por um circuito magnético equivalente, mapeamento por SC, método dos elementos finitos (MEF) e o método dos subdomínios.

3.1.1 Método de Mapeamento por Schwartz Christoffel

O MMSC consiste em uma transformação que permite mapear um domínio com um formato qualquer, pois o transforma em um domínio com o formato poligonal. Aplicável em quaisquer operações que envolvem o conceito de campo, e que os parâmetros físicos são uniformemente distribuídos em um espaço isotrópico. O SC é comparável à Transformação de Laplace, utilizada em estudos de vibrações mecânicas, controle de sistema, entre outras áreas do conhecimento (ROGER, 2019).

Uma característica desse método é sempre estar vinculado a outro método analítico, e assim uma boa precisão dos resultados é alcançada, cerca de 2% a 3% quando comparado ao MEF, além de ser de fácil implementação. Porém, o método é limitado para problemas planos, além de que deve ser considerado a permeabilidade magnética infinita (ROGER, 2019).

3.1.2 Método de Elementos Finitos

O MEF consiste em dividir o domínio avaliado em diversos elementos. Para um único elemento, tem-se a matriz que associa as variáveis físicas contidas no modelo, a associação advém das equações diferenciais que ditam os fenômenos físicos simulados. Logo, constrói-se para o domínio discretizado a matriz de rigidez global e resolve-se o sistema avaliado (ROGER, 2019).

Uma característica do MEF é a não necessidade de resolver as equações das leis de Gauss e Maxwell para obter um resultado preciso. Contudo esta apresenta como contraponto o esforço computacional, consideravelmente elevado (ROGER, 2019).

3.1.3 Método dos Subdomínios

O MS consiste em dividir o domínio avaliado em regiões físicas, denominadas subdomínios, para as quais as equações de Maxwell são resolvidas. Logo, as equações de Maxwell são escritas para cada subdomínio em termos de potencial, a partir das quais a densidade de fluxo é derivada. Condições de contorno são impostas nos limites de cada subdomínio através da determinação do potencial, ou fluxo, do campo eletromagnético, obtendo-se por fim um sistema de equações lineares (DEVILLERS et al., 2016).

Estimada a distribuição do campo magnético no equipamento elétrico, através da técnica escolhida, o próximo passo é determinar a tensão, corrente e força

induzidas, o que é facilmente obtido através das conhecidas equações das Leis de Lenz, Kirchhoff e Ohm (ROGER, 2019).

3.2 Simulação Numérica

3.2.1 Definição do Projeto e Descrição dos Softwares

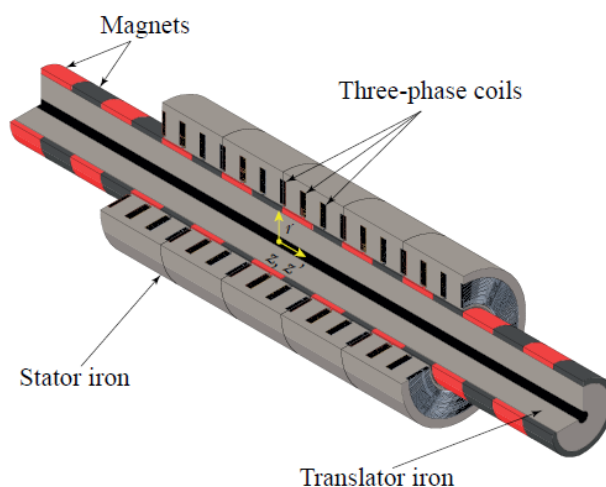
Para uma boa simulação, antes é preciso estabelecer corretamente o escopo do projeto. Dessa forma, para esse TCC, o projeto está relacionado ao sistema motogerador. Dentre os motores vistos, foi escolhido o motor de pistão duplo devido à sua alta densidade energética e capacidade de entregar energia para o gerador linear. Ademais foi dado enfoque no gerador elétrico linear, como o intuito de conhecer o comportamento das variáveis de tensão e força elétrica.

Esse TCC dá um foco maior no gerador linear presente no sistema motogerador. Logo, é preciso selecionar topologias e configurações de um gerador linear, e essas foram:

- Magnetização do linor externa;
- Magnetização interna;
- Magnetização radial com eixo ferroso sem espaço entre ímãs;
- Bobinas concentradas.

As topologias e configurações do gerador elétrico linear foram selecionadas com base em um gerador linear de referência proposto por Gysen et al., (2008). A máquina de referência pode ser visto na Figura 21.

Figura 21: Gerador linear de referência.



Fonte: Autor.

Com o gerador linear de referência conhecido, é possível agora propor as dimensões do trecho ativo (linor, ímãs, entreferro e bobinas), bem como os materiais de cada um dos objetivos que compõem o trecho ativo. O tamanho do trecho ativo respeita o sistema motogerador, logo o gerador como um todo deve ter por volta de 50 cm.

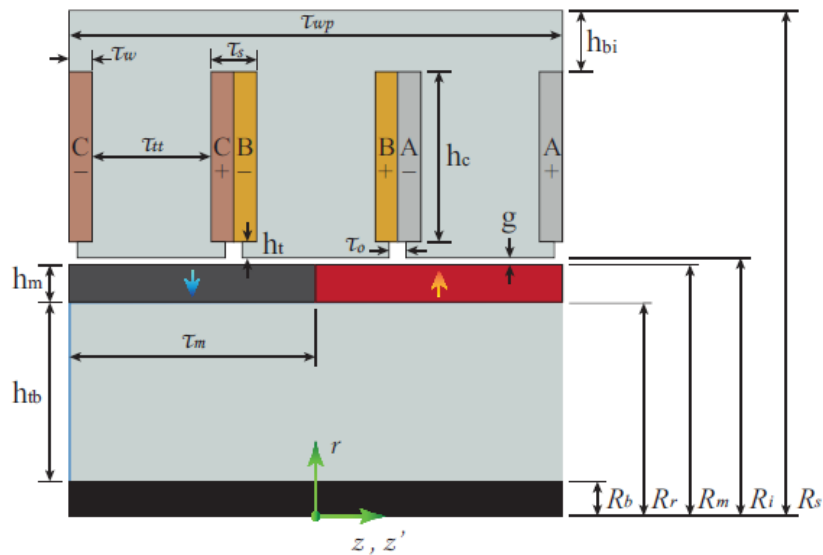
A simulação numérica faz uso de dois softwares, o FEMM e o MATLAB. O FEMM é um software de simulação de problemas magnéticos que utiliza principalmente do MEF para a resolução das malhas criadas em cima do desenho feito. Já o MATLAB é um software interativo de alta performance voltada para o cálculo numérico, dentre as várias ferramentas do MATLAB, as que se destacam são análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e criação de gráficos. Uma característica de ambos os softwares é a intercomunicação entre eles por meio de pacotes de códigos.

Devido a interação dos softwares, é possível criar, através dos pacotes presentes em ambos softwares, um código em MATLAB que passa todas as informações que o FEMM precisa para a simulação e em sequência o FEMM devolve para o MATLAB todas as variáveis numéricas de interesse ao longo de um trecho escolhido.

O FEMM trabalha apenas com duas dimensões, logo fez-se necessário o uso de apenas um trecho ativo, ou seja, um recorte do gerador linear de forma a deixa-lo plano. O recorte foi feito ao longo do eixo do gerador e o comportamento de todas as

variáveis de interesse se expande radialmente. A Figura 22 mostra as dimensões do trecho ativo, bem como a noção visual do mesmo após a seleção das topologias e configurações do gerador linear.

Figura 22: Trecho ativo com as dimensões representadas.



Fonte: Gysen et al. (2008)

A utilização de apenas o trecho ativo é bem-vinda, pois no FEMM há a ferramenta de aplicar contornos periódicos que permitem replicar o efeito dos outros dois trechos ativos vizinhos no trecho ativo atual.

3.2.2 Metodologia de Simulação

3.2.2.1 Definição e Envio de Parâmetros

Como mencionado, um trecho ativo possui o linor, os ímãs, o entreferro e as bobinas. Logo, inicialmente é definido as dimensões desses itens. As dimensões dos parâmetros estruturais do trecho ativo se passam na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros estruturais da máquina de referência. Fonte: Autor.

Dimensão	Valor	Descrição
h_{bi}	7.8 mm	Altura do ferro superior (bobina até fronteira)
h_c	22.5 mm	Altura das bobinas
h_m	5 mm	Altura dos ímãs
h_t	2 mm	Altura dos dentes (Entreferro até bobina)
h_{tb}	23.3 mm	Altura do linor
g	1 mm	Comprimento do entreferro
N	1	Número de enrolamentos na bobina
N_p	2	Número de polos magnéticos
N_{pa}	5	Número de trechos ativos
N_{ph}	3	Número de fases
N_s	15	Número de ranhuras
N_{sp}	5	Número de ranhuras por fase (N_s/N_{ph})
R_{ag}	33.8 mm	Raio médio do entreferro
R_b	5 mm	Raio da barra de alumínio
R_i	34.3 mm	Raio interno do estator
R_m	33.3 mm	Raio externo dos ímãs
R_r	28.3 mm	Raio do eixo do linor
R_s	66.6 mm	Raio externo do estator
T_m	32.3 mm	Passo magnético
T_p	32.3 mm	Passo do polo
T_t	21.46 mm	Passo entre ranhuras
T_s	6 mm	Passo do slot
T_o	2.43 mm	Largura do slot
T_{tt}	15.53 mm	Distância entre ranhuras
T_{tp}	19.1 mm	Largura das extremidades
T_w	3 mm	Largura das ranhuras
T_{wp}	64.6 mm	Comprimento do trecho ativo
T_{ws}	1.18 mm	Largura das folhas de corrente

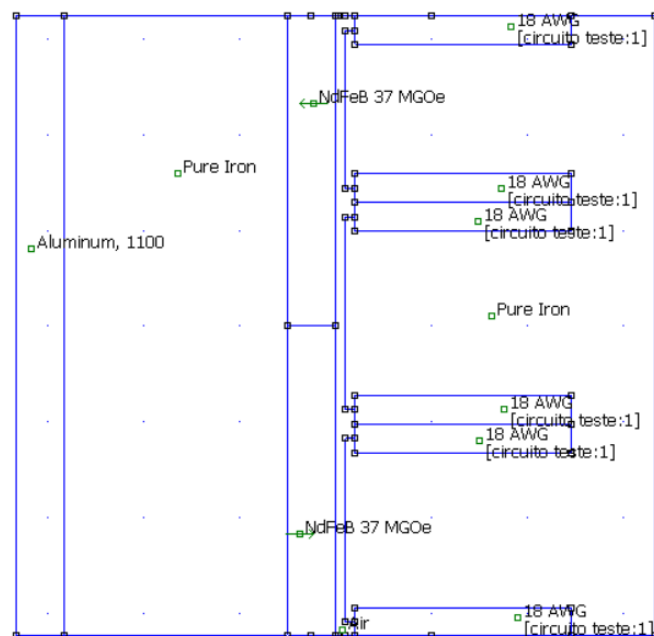
Além dos parâmetros estruturais, é preciso definir certas constantes e materiais, esses estão na Tabela 3.

Tabela 3: Alguns valores de permeabilidade magnética. Fonte: Autor.

Propriedades	Valor	Descrição
B_{rem}	1.23 T	Densidade de fluxo remanescente nos ímãs
μ_r	1.05	Permeabilidade magnética relativa
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A	Permeabilidade magnética do vácuo

Com posse dos parâmetros estruturais, constantes e materiais um script no MATLAB pode ser feito. No script, inicialmente, é posto os parâmetros estruturais como parâmetros de entrada da função. Em sequência, o MATLAB abre o FEMM e transfere em forma de comando as dimensões físicas do trecho ativo, bem como os materiais dos itens do trecho ativo. O desenho do trecho ativo no FEMM após receber o comando do MATLAB está representado na Figura 23.

Figura 23: Desenho do recorte do gerador feito no FEMM.

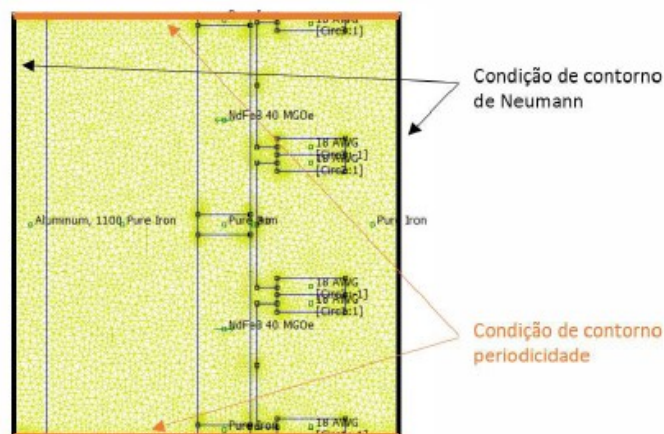


Fonte: Autor (FEMM).

Na Figura 23 é possível ver que foi atribuído alumínio para o centro do linor, enquanto para o restante do linor foi puro ferro. Para os ímãs, foi atribuído neodímio de ferro, ou seja, ímãs de terra rara no qual possuem a permeabilidade magnética relativa próxima do ar, ou seja, um, além disso foi atribuído as direções de magnetização radial com eixo ferroso sem espaço entre ímãs. Para o entreferro foi atribuído o ar. Para as bobinas foi atribuído 18 AWG (escala americana para bitola de fios) e um circuito com uma certa corrente e número de enrolamentos na bobina. Por fim, foi atribuído ferro puro para todo o resto do trecho ativo.

Adiante é enviado do MATLAB para o FEMM as fronteiras que são usadas nas arestas externas do desenho. Quanto as condições de contorno, foram utilizadas fronteiras de Newman e de periodicidade. A condição de contorno de Newman foi usada nas arestas esquerda e direita. Na aresta esquerda representa que já não mais material, pois chegou ao centro do gerador, enquanto a aresta direita representa que já não há mais material, pois chegou no externo ao gerador. A condição de periodicidade foi usada nas arestas superior e inferior, em ambos os casos representam o efeito dos trechos ativos vizinhos no desenho. A Figura 24 abaixo indica as fronteiras.

Figura 24: Condições de contorno.

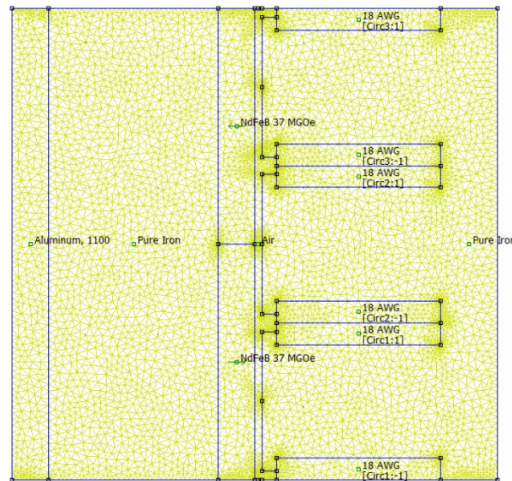


Fonte: Roger (2021).

Depois das condições de contorno, são nomeadas cada região do desenho e preenchidas com vários nós com o intuito de criar uma malha para a simulação. A malha, no problema do gerador linear, possui por volta de 10000 nós, no qual pode

variar ao alterar as dimensões, materiais e circuitos do trecho ativo. A Figura 25 contém a malha gerada pelo FEMM.

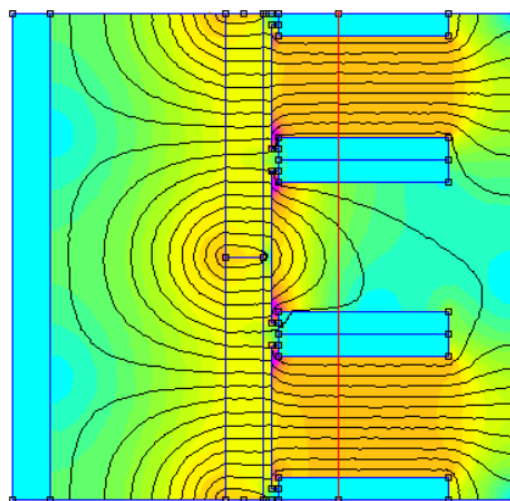
Figura 25: Malha gerado pelo FEMM após comandos do MATLAB.



Fonte: Autor.

Ao criar a malha, é preenchido no script do MATLAB a região de interesse para a simulação. O funcionamento da região se dá por uma reta, no qual o caminho percorre o trecho ativo, informações de densidade de fluxo magnético e intensidade de campo são obtidas. Um exemplo de região selecionada é mostrada na Figura 26 por uma reta vermelha, onde a reta vermelha se estende ocorre a análise.

Figura 26: Exemplo da reta usada como região de análise no trecho ativo.

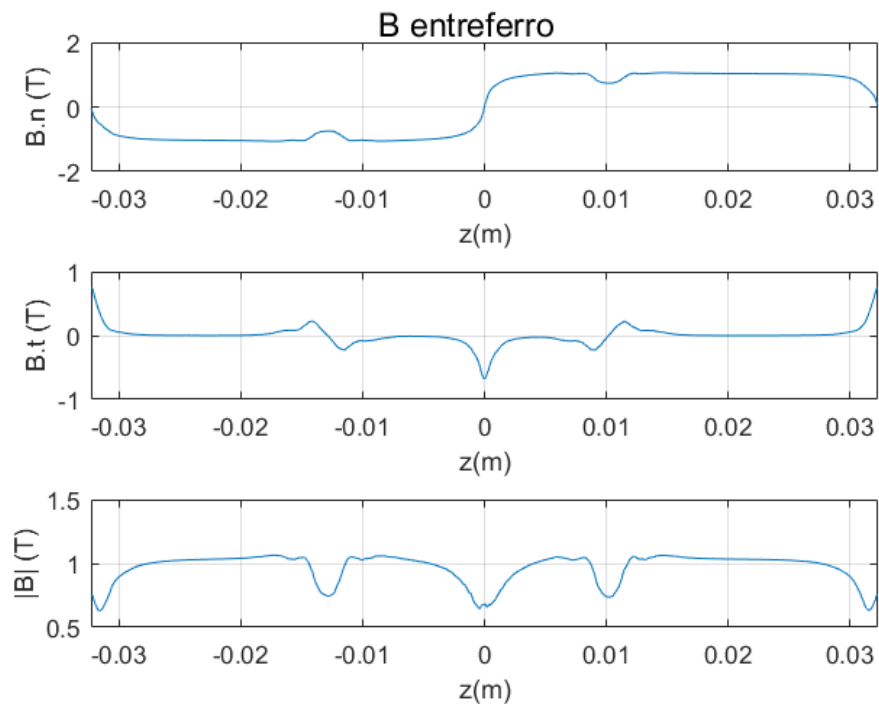


Fonte: Autor.

3.2.2.2 Gráficos de Densidade de Fluxo Magnético, Fluxo Magnético, Tensão e Força

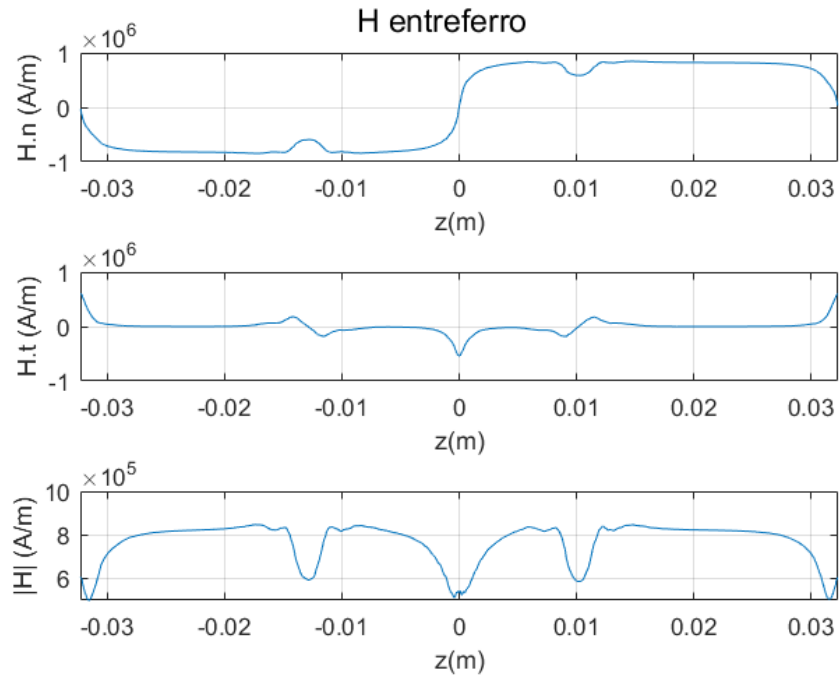
Gráficos de densidade de fluxo magnético e intensidade de campo são gerados pelo FEMM e retornados para o MATLAB em forma de vetores e matrizes. Como a ferramenta de MATLAB é superior ao FEMM para exibição de gráficos. Vale salientar que, a região selecionada para análise sempre está alinhada com o comprimento do trecho ativo, dessa forma os gráficos abaixo possuem os valores separados por eixos, nos quais são a normal, a tangencial e o módulo.

Figura 27: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio do entreferro.



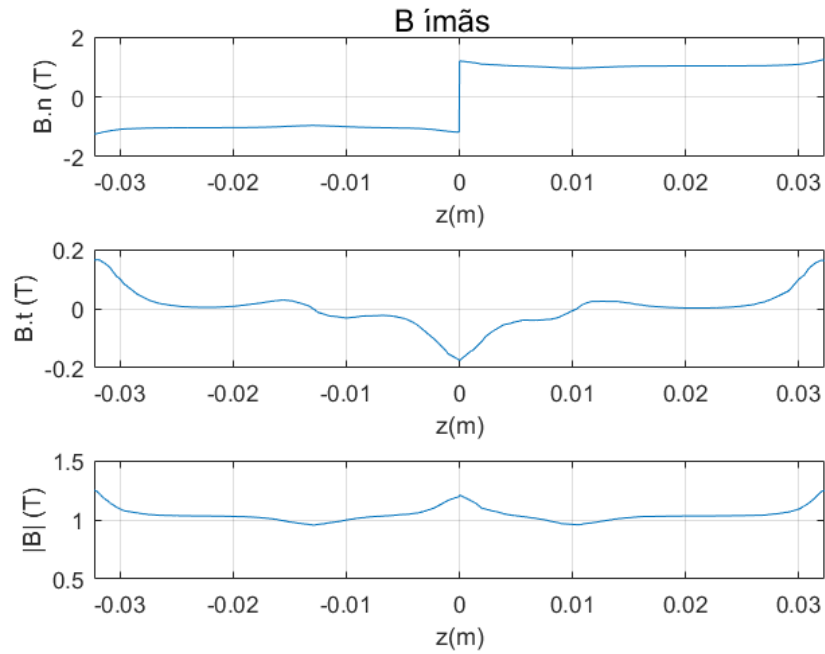
Fonte: Autor.

Figura 28: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio do entreferro.



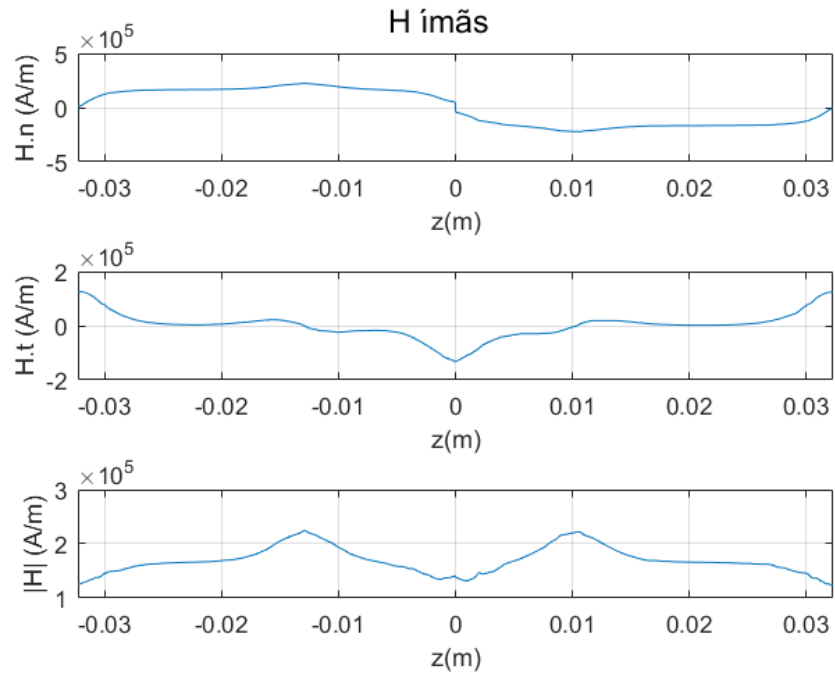
Fonte: Autor.

Figura 29: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio dos ímãs.



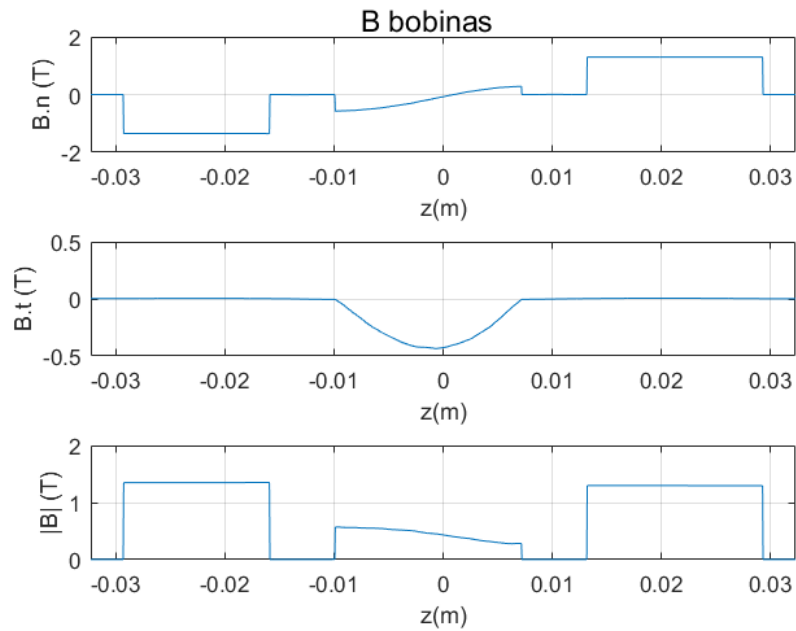
Fonte: Autor.

Figura 30: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio dos ímãs.



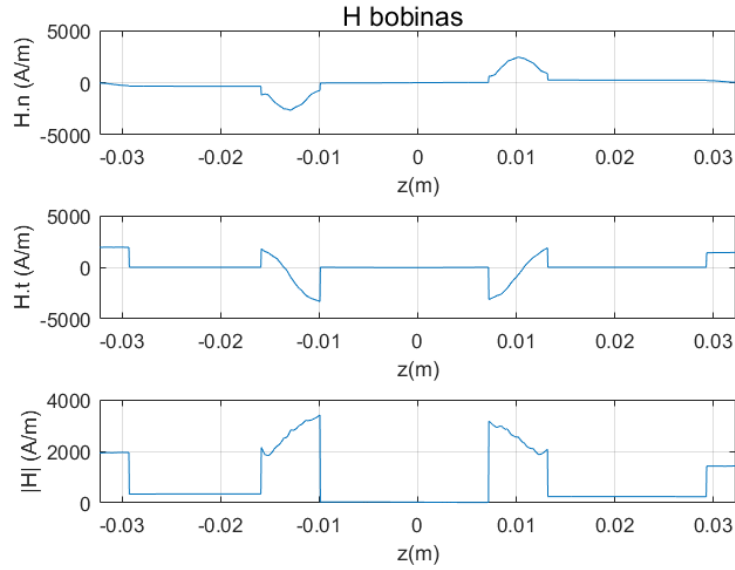
Fonte: Autor.

Figura 31: Gráficos de densidade de fluxo magnético cortando o meio das bobinas.



Fonte: Autor.

Figura 32: Gráficos de intensidade de campo cortando o meio das bobinas.



Fonte: Autor.

Das Figura 27 até Figura 32 mostram todas as possibilidades de gráficos que o FEMM é capaz de gerar.

O FEMM é capaz de gerar um mapa de densidade de fluxo magnético com base na região escolhida pelo autor, esse mapa está presente na Figura 33. Todos os resultados de densidade de fluxo magnético foram fornecidos no meio do entreferro, e funções de Bessel são utilizadas para descrever o resultado da densidade de fluxo magnético em ambas as direções. As Equações (1), (2) e (3) descrevem a densidade de fluxo magnético fornecidas.

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} (a_{1n} B_{I1}(m_n r) + b_{1n} B_{K1}(m_n r)) \sin(m_n z) \quad (1)$$

$$B_z = \sum_{n=1}^{\infty} (a_{1n} B_{I0}(m_n r) + b_{1n} B_{K0}(m_n r)) \cos(m_n z) \quad (2)$$

$$|B| = \sqrt{(B_r)^2 + (B_z)^2} \quad (3)$$

Onde,

B_r – Densidade de fluxo na direção radial;

B_z – Densidade de fluxo na direção tangencial;

$|B|$ - Densidade de fluxo em módulo.

B_{I0} e B_{K0} são funções de Bessel modificadas de primeira e segunda ordem, respectivamente, e a_{1n} , b_{1n} e m_n são derivados das condições de contorno, as quais são apresentadas na sequência.

$$m_n = \frac{n\pi}{\tau_p}$$

$$M_n = \frac{2B_{Rem}}{mu_0} \frac{1 - \cos(n\pi)}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi(1 - \tau_0)}{2}\right)$$

$$K_{an}(m_n r) = u_0 M_n \int_{m_n r}^{m_n R_r} B_{K1}(x) dx$$

$$K_{bn}(m_n r) = u_0 M_n \int_{m_n r}^{m_n R_r} B_{I1}(x) dx,$$

$$a_{1n} = \frac{-\left(\frac{c_{5n}}{c_{6n}} + \frac{c_{7n}}{c_{8n}}\right) \left(\frac{c_{3n}}{c_{4n}} K_{an}(m_n R_n) + K_{bn}(m_n R_n)\right)}{\left(\frac{c_{3n}}{c_{4n}} - \frac{c_{5n}}{c_{6n}}\right) \left(\frac{c_{1n}}{c_{2n}} + \frac{c_{7n}}{c_{8n}}\right) + u_r \left(\frac{c_{3n}}{c_{4n}} + \frac{c_{7n}}{c_{8n}}\right) \left(\frac{c_{5n}}{c_{6n}} - \frac{c_{1n}}{c_{2n}}\right)}$$

$$b_{1n} = \frac{c_{1n}}{c_{2n}} a_{1n}$$

Onde as constantes são:

$$c_{1n} = B_{I0}(m_n R_i),$$

$$c_{2n} = B_{I0}(m_n R_r),$$

$$c_{3n} = B_{I0}(m_n R_r m),$$

$$c_{4n} = B_{I1}(m_n R_m),$$

$$c_{5n} = B_{K0}(m_n R_i),$$

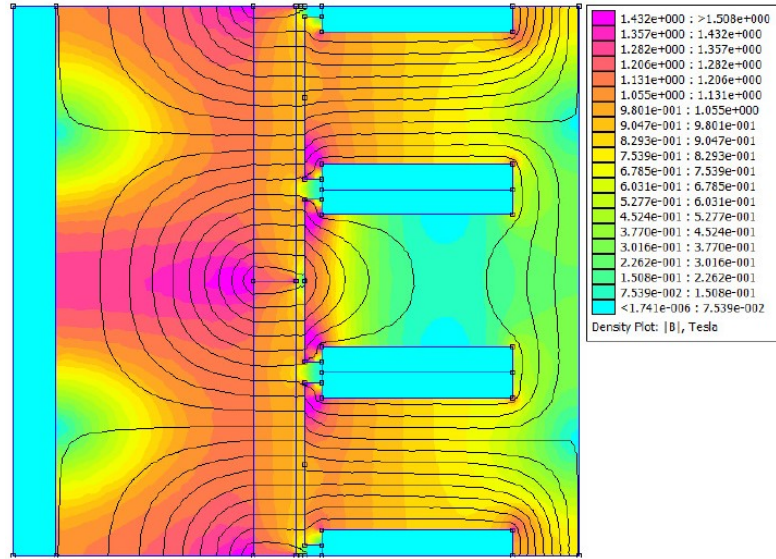
$$c_{6n} = B_{K0}(m_n R_r),$$

$$c_{7n} = B_{K0}(m_n R_r m),$$

$$c_{8n} = B_{K0}(m_n R_m).$$

Neste TCC, os valores de densidade de fluxo foram obtidos diretamente através do retorno das simulações FEMM.

Figura 33: Mapa de densidade de fluxo magnético, legenda por cores.



Fonte: Autor.

Com o objetivo de encontrar fluxo magnético, tensão elétrica e força elétrica, é aproveitado, principalmente, o vetor de densidade de fluxo magnético no entreferro, ou seja, o vetor correspondente ao gráfico presente na Figura 27 e criado outro script pessoal, no qual faz o cálculo no MATLAB com base nas 3 equações a seguir.

O fluxo magnético λ , pode ser calculado pela Equação (4).

$$\lambda = 2\pi R_i N N_{sp} \int_{t_t+D}^{t_t+D} B_n (R_i, z) dz \quad (4)$$

Onde,

λ – Fluxo magnético;

B_n – Densidade de fluxo magnético na direção radial;

R_i , N , N_{sp} e t_t - Tabelados na Tabela 2;

z – Eixo que percorre toda extensão do gerador linear;

D – Equivale a t_t , 0 e $-t_t$ para cada fase das bobinas A B e C, respectivamente.

A EMF pode ser representada pela Equação 5 abaixo, onde depende diretamente do fluxo magnético.

$$e = -\frac{\partial \lambda}{\partial \Delta z} v \quad (5)$$

Onde,

e – Tensão elétrica;

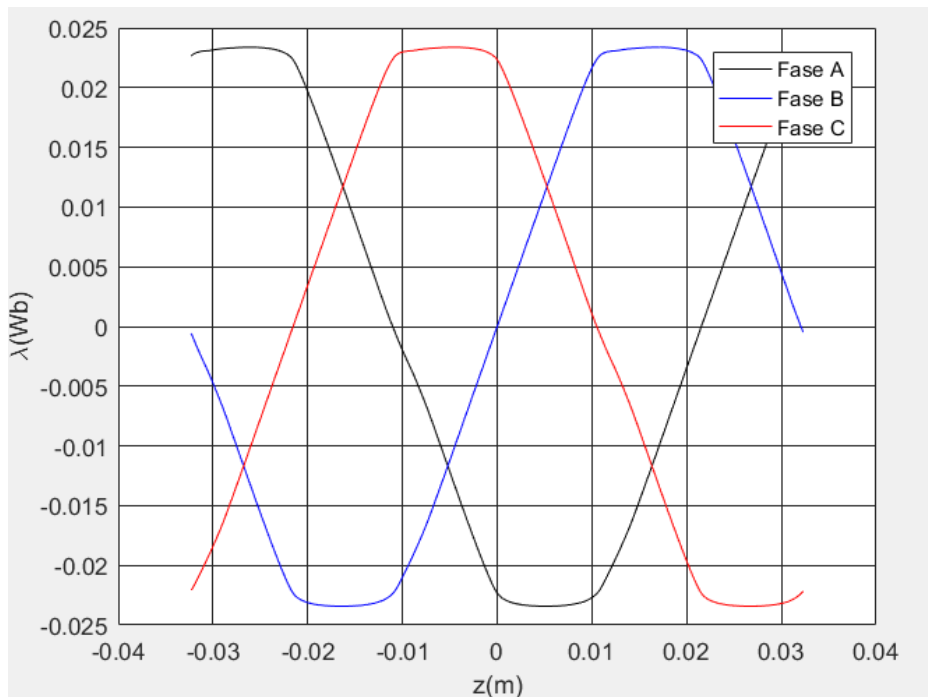
v – Velocidade em m/s;

Δz – Variação no eixo que percorre toda extensão do gerador linear.

Ambos fluxo magnético e tensão elétrica são trifásicos, logo possuem três fases, além disso, podem ser representadas por ângulos ao equivaler o valor percorrido do trecho ativo em metros por uma volta angular, ou seja, de 0° a 360°.

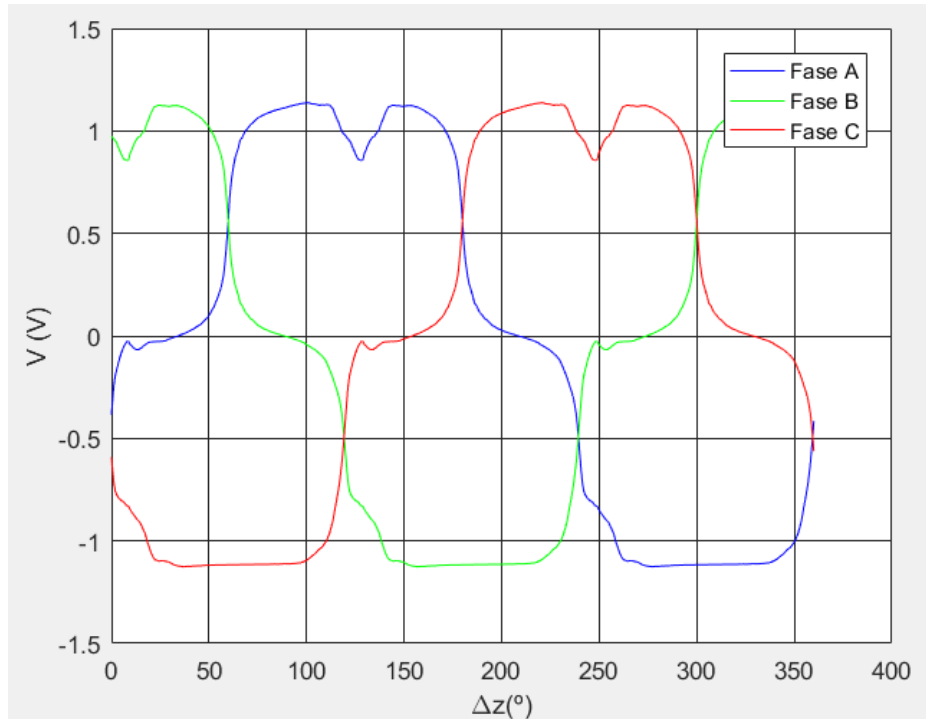
Os gráficos de fluxo e tensão elétrica são, respectivamente, as Figura 34 e .

Figura 34: Fluxo magnético em metros.



Fonte: Autor.

Figura 35: Tensão induzida trifásica.



Fonte: Autor.

O próximo desafio é encontrar o comportamento da força, a força é fortemente impactada por qualquer alteração pífia na densidade de fluxo. Logo, dentre todos os resultados obtidos a força elétrica é o que mais se distancia do trabalho de referência desenvolvido pelo Gysen (2011). A Equação (6) representa a forma de calcular a força elétrica.

$$F = \frac{2\pi R_{ag} N_p}{\mu_0} \int_{-\tau_p}^{\tau_p} (B_n + B_{IIIr}) * (B_z + B_{IIIz}) dz \quad (6)$$

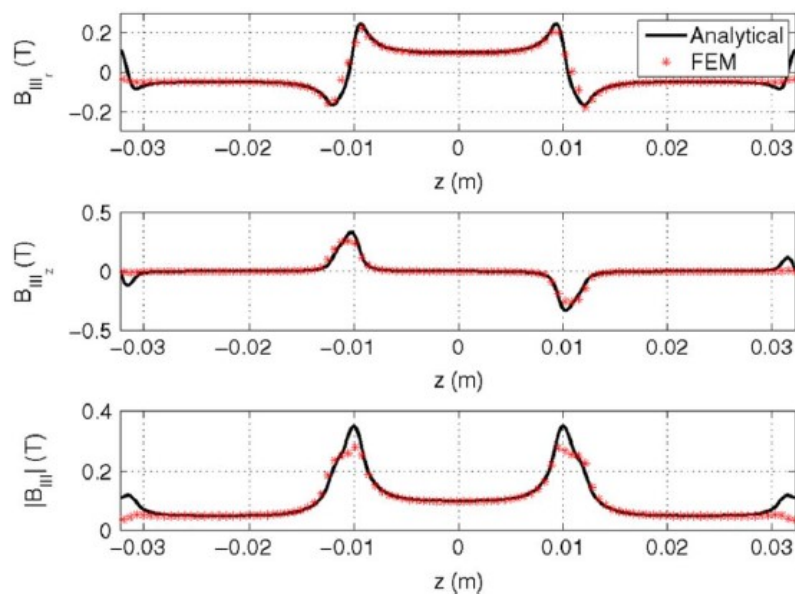
Onde,

R_{ag} , N_p e μ_0 – Estão nas Tabela 1 e Tabela 2;

B_n e B_z – Estão descritos pela Figura 27;

B_{IIIr} e B_{IIIz} – São descritos pela Figura 36.

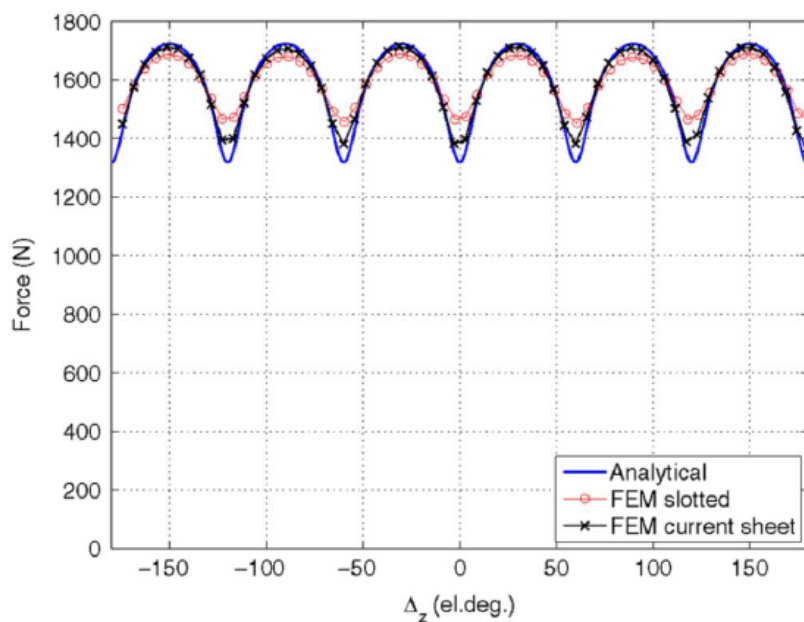
Figura 36: Comportamento da densidade de fluxo, assumindo a não existência dos ímãs e usando como região o encontro do entreferro e dentes da bobina.



Fonte: Gysen et al., (2008).

Por meio da Equação (6), e dos vetores gerados pelas Figura 27 e Figura 36, o gráfico que detêm o comportamento da força elétrica está presente na Figura 37.

Figura 37: Gráfico de força elétrica com eixo representado em graus.



Fonte: Gysen et al., (2008).

3.2.2.3 Análise de Gráficos

A Figura 27 mostra o comportamento da densidade de fluxo cortando o meio do entreferro, o gráfico indica que a variável de densidade de fluxo em ambas direções foi extremamente afetada pela presença dos ímãs. Como os ímãs estão magnetizados em sentidos opostos, a densidade na direção radial tem um comportamento até metade do trecho ativo, e ao entrar na zona do outro ímã o gráfico possui o mesmo valor, porém com magnitude contrária. Na direção tangencial, o gráfico de densidade é espelhado. Vale ressaltar que em ambas direções o valor da densidade não passa de 1 [T].

A Figura 33 mostra que no centro do linor e nas bobinas quase não existem densidade de fluxo magnético, enquanto os maiores valores de densidade se concentram no entreferro e ímãs.

A Figura 34 contém o comportamento do fluxo magnético, no gráfico é perceptível que é bastante afetado pelo comportamento da densidade de fluxo na direção radial, por consequência, é possível dizer que os ímãs afetam também o fluxo, ademais, alguns parâmetros estruturais conseguem afetar fortemente o fluxo.

A Figura 35 diz que a tensão é bastante afetada pela presença das bobinas, no gráfico indica que a cada 120° o sentido da tensão inverte, e a tensão máxima obtida foi de, aproximadamente, 1 [V].

A Figura 37 demonstra o comportamento da força obtida pelo Gysen et al., (2008). A força é inviável de ser obtida numericamente pelo conjunto de softwares MATLAB e FEMM, isso se deve a qualquer alteração tornar o gráfico imprevisível, ou seja, se desconfigura facilmente.

3.3 Avaliação Paramétrica da Máquina de Referência

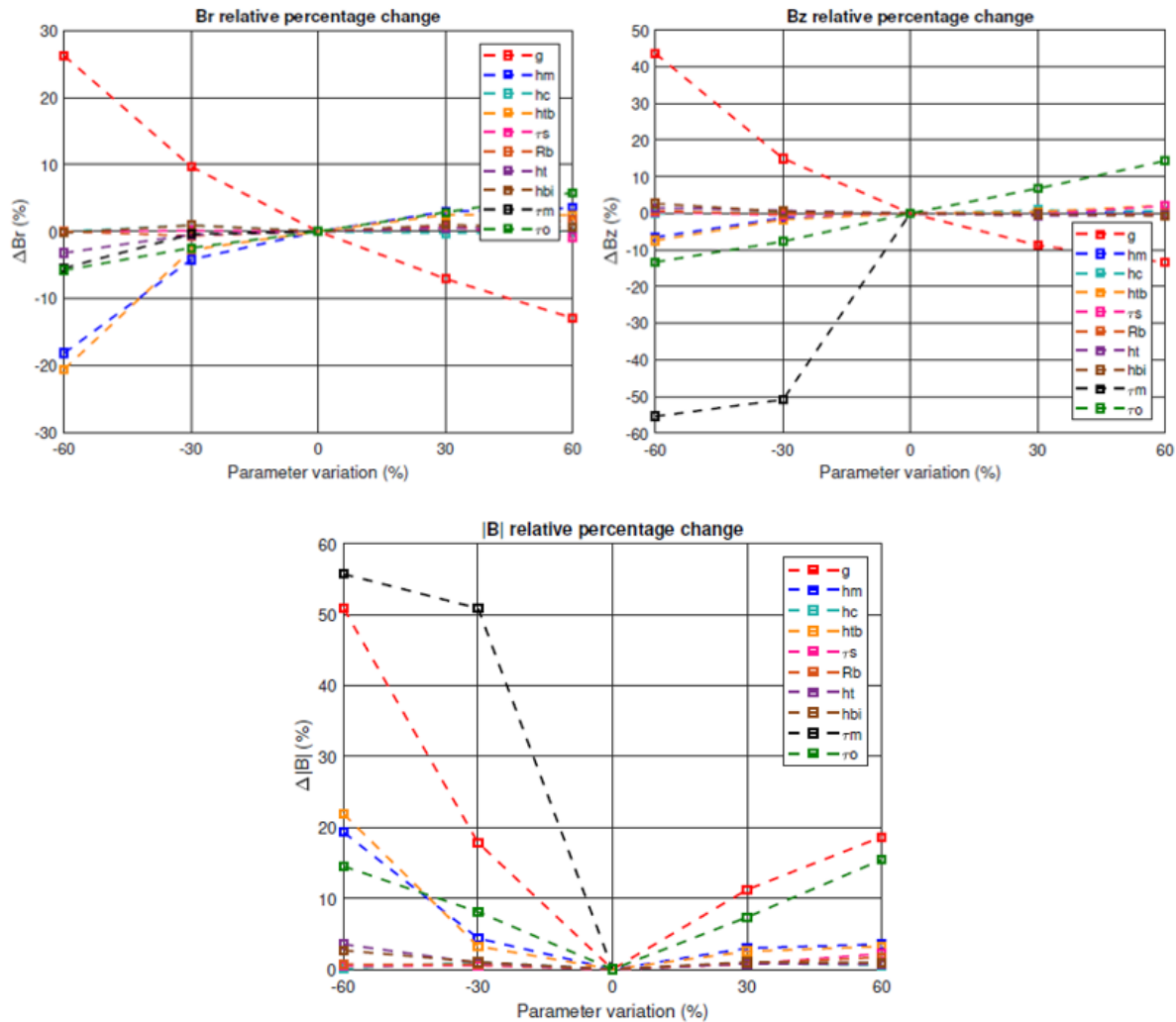
O objetivo da otimização é obter uma máquina que responde melhor ao sistema motogerador. A otimização foi feita por meio de uma análise de sensibilidade. A

metodologia da análise de sensibilidade constitui de selecionar todos os parâmetros que podem afetar o desempenho das variáveis de interesse no trecho ativo.

Um total de dez parâmetros estruturais foram selecionados. A fim de testar a sensibilidade da resposta das quantidades elétricas, cada um dos dez parâmetros pode ser alterado individualmente, mantendo todos os outros constantes. Essas mudanças resultam em alterações que afetam as quantidades elétricas. Portanto, os parâmetros alterados que têm o impacto mais positivo nessas quantidades são selecionados para a montagem de uma máquina otimizada. A análise de sensibilidade inclui todos os dez parâmetros com a mesma variação percentual relativa de -60% a 60% da variação do valor de referência do parâmetro.

Finalmente, após obter as curvas para todos os dez parâmetros, é perceptível pelas figuras exibidas neste tópico que os parâmetros do entreferro (g), largura da abertura do slot (τ_o), altura do ímã (h_m) e altura do tradutor (h_{tb}) são os que têm maior capacidade de influenciar as quantidades da máquina de referência sem comprometer a estrutura mecânica. Como exemplo, a análise mostra que o passo magnético (τ_m) tem uma grande influência sobre a densidade de fluxo. No entanto, alterar esse parâmetro requer modificar o tamanho de toda a seção ativa da máquina, o que está fora do objetivo do trabalho. Portanto, devido à sensibilidade a pequenas alterações nos quatro parâmetros mencionados, eles são selecionados para análise com o objetivo de otimizar a máquina de referência. Os dez parâmetros que influenciam a densidade de fluxo podem ser vistos na Figura 38.

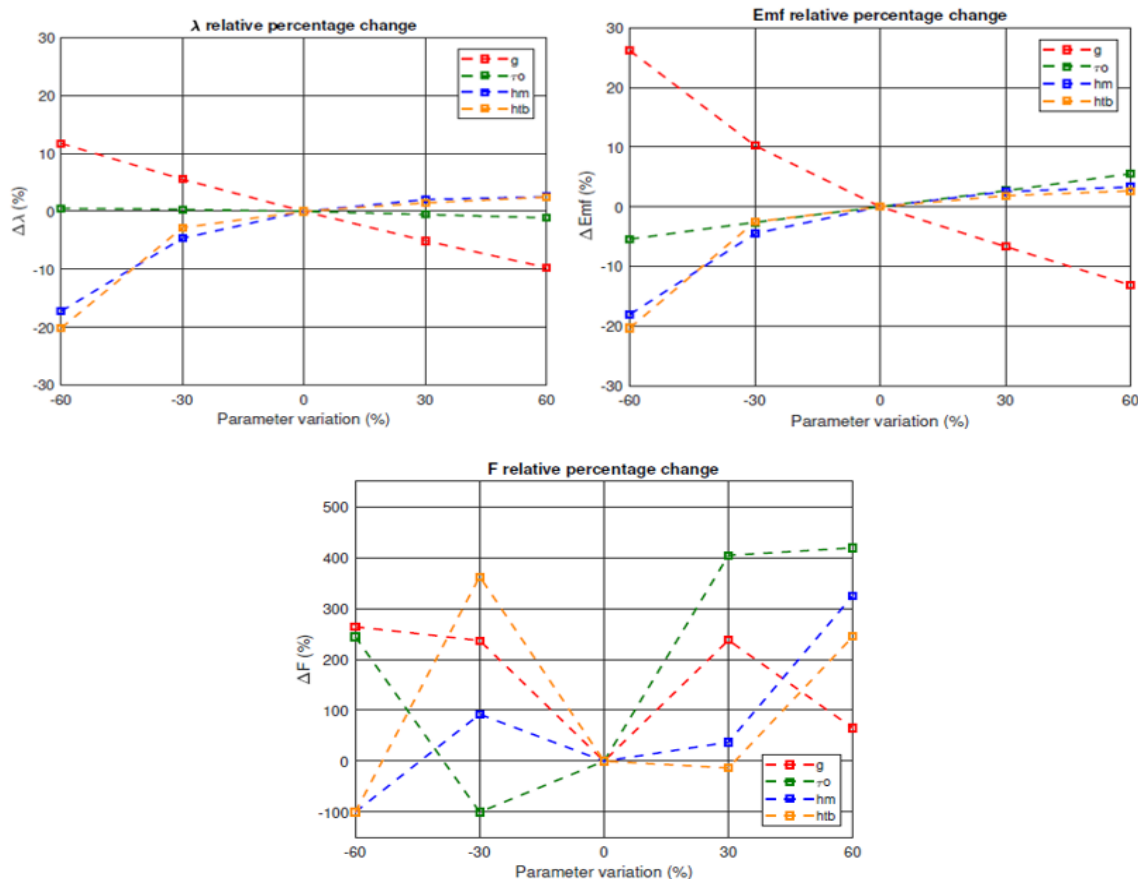
Figura 38: Mudança relativa percentual de densidade de fluxo magnética para os 10 parâmetros. a) Radial. b) Tangencial. c) Módulo.



Fonte: Autor.

Para obtenção dos gráficos de fluxo magnético, tensão elétrica e força elétrica foram utilizados as Equações (1), Equações (2) e Equações (3), além de que foram feitas as mesma considerações.

Figura 39: Mudança relativa percentual. a) Fluxo magnético. b) Tensão elétrica. c) Força elétrica.



Fonte: Autor.

Após obter as curvas, o aumento da força eletromotriz pode ser obtido aplicando a variação nos parâmetros. É fácil perceber que a força eletromotriz aumenta quando g diminui e quando os outros parâmetros (τ_o , h_m , h_{tb}) aumentam. Portanto, é necessário determinar quanto esses parâmetros precisam ser modificados. Para o entreferro (g), é conhecida a complexidade de fabricar uma máquina elétrica com um pequeno entreferro, mas é viável reduzir o entreferro de referência de 1 mm em 30%, obtendo um novo g de 0,7 mm. Para a altura dos ímãs (h_m) e a altura do tradutor (h_{tb}), não há muita diferença na força eletromotriz para aumentos de 30% até 60% na variação dos parâmetros, então o aumento de apenas 30% é mais desejável, pois esses parâmetros implicam diretamente no tamanho do gerador (quanto menor, melhor). Finalmente, para a abertura do slot (τ_o), uma diferença significativa pode ser observada na variação da força eletromotriz à medida que este parâmetro é incrementado, e a largura da abertura do slot não afeta o tamanho do gerador, assim o valor de 60% de variação é escolhido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

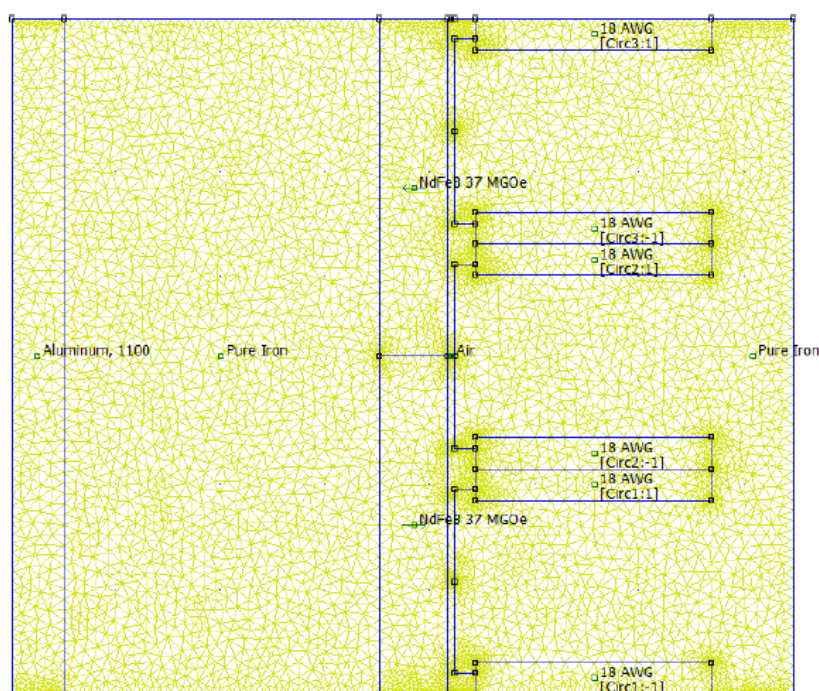
A nova máquina tem como base os novos valores para os quatros parâmetros descritos no capítulo anterior, temos que esses valores estão na .

Tabela 4: Novos valores de parâmetros da nova máquina otimizada. Fonte: Autor.

Dimensão	Valor	Descrição
g	0,7 mm	Entreferro
T _o	3,98 mm	abertura do slot
h _m	6,5 mm	altura dos ímãs
h _{tb}	30,29 mm	altura do tradutor

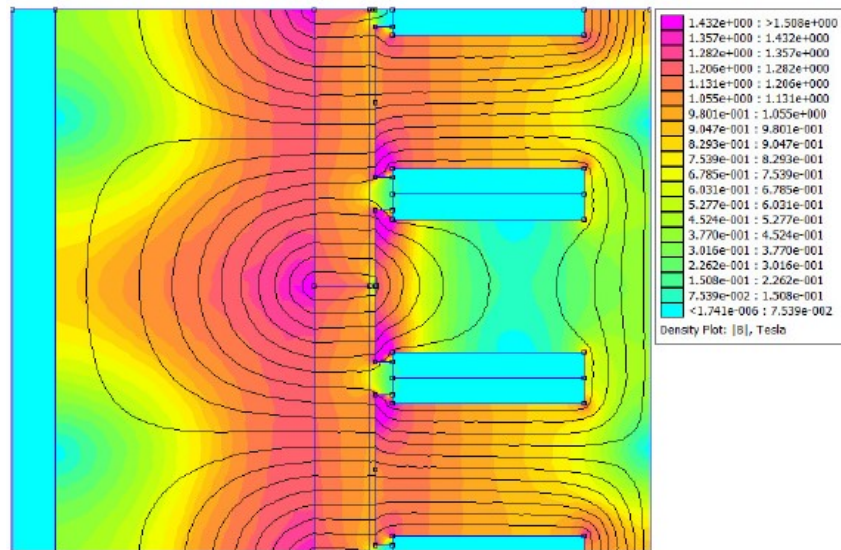
Ao reutilizar o mesmo procedimento do código, que consiste no MATLAB enviando ordens para o FEMM e recebendo os vetores como retorno, um novo desenho do trecho ativo pode ser criado, bem como um novo mapa de densidade de fluxo. Ambos podem ser vistos nas Figura 40 e , respectivamente.

Figura 40: Desenho do novo trecho ativo.



Fonte: Autor.

Figura 41: Mapa de densidade de fluxo do novo trecho ativo.



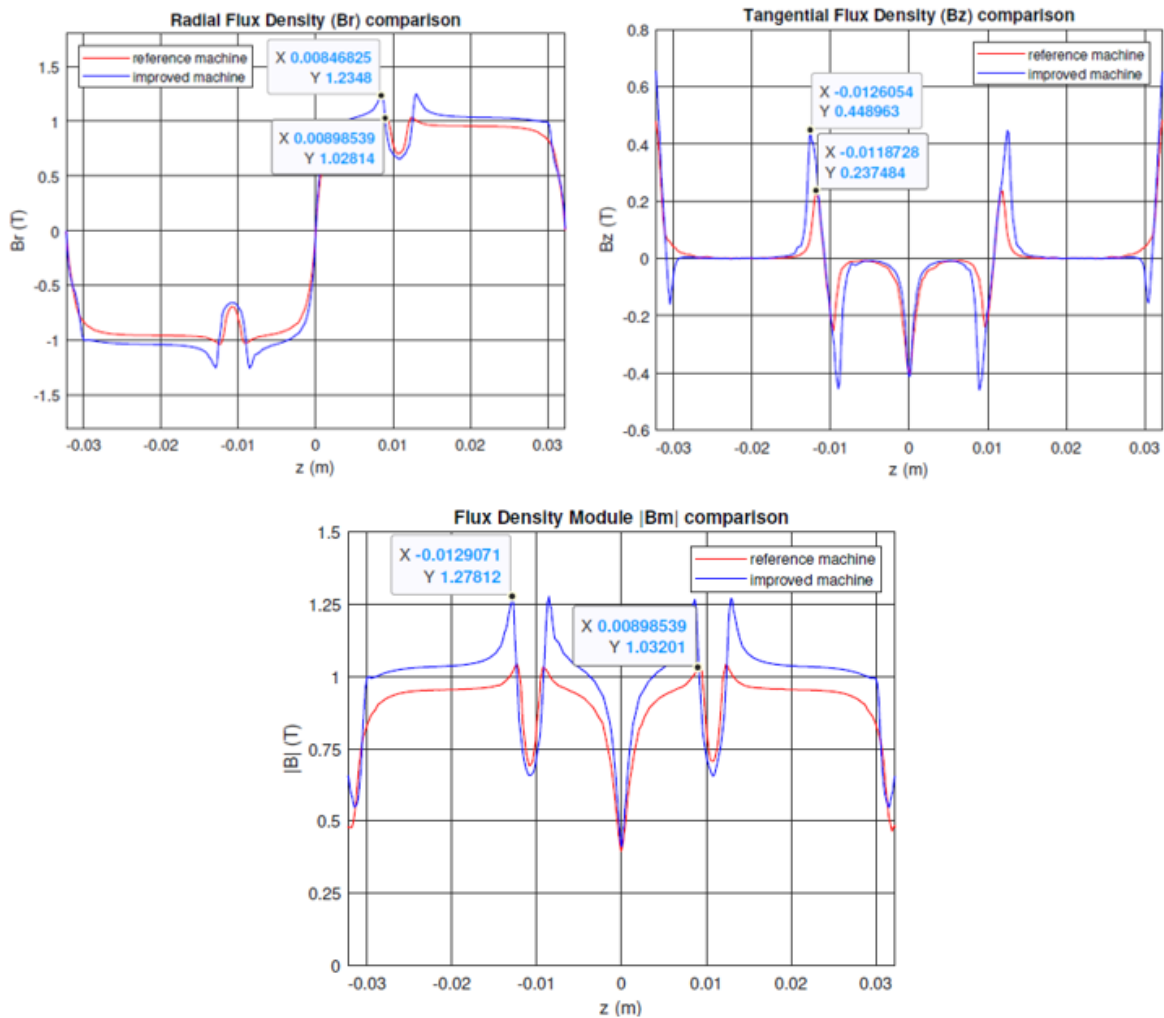
Fonte: Autor.

Os resultados da comparação entre as máquinas de referência e a nova máquina são comparadas a seguir. As variáveis comparadas são:

- Densidade de fluxo magnético;
- Fluxo magnético;
- Tensão elétrica (Força eletromotriz);
- Força elétrica.

Na máquina melhorada a densidade de fluxo magnética foi a mais afetada e resulta em um aumento significativo de amortecimento no gráfico de força. Vale lembrar que todas as figuras abaixo possuem como padrão, linhas azuis que representam a máquina melhorada e as linhas vermelhas que representam a máquina de referência projetada por Gysen et al., (2008).

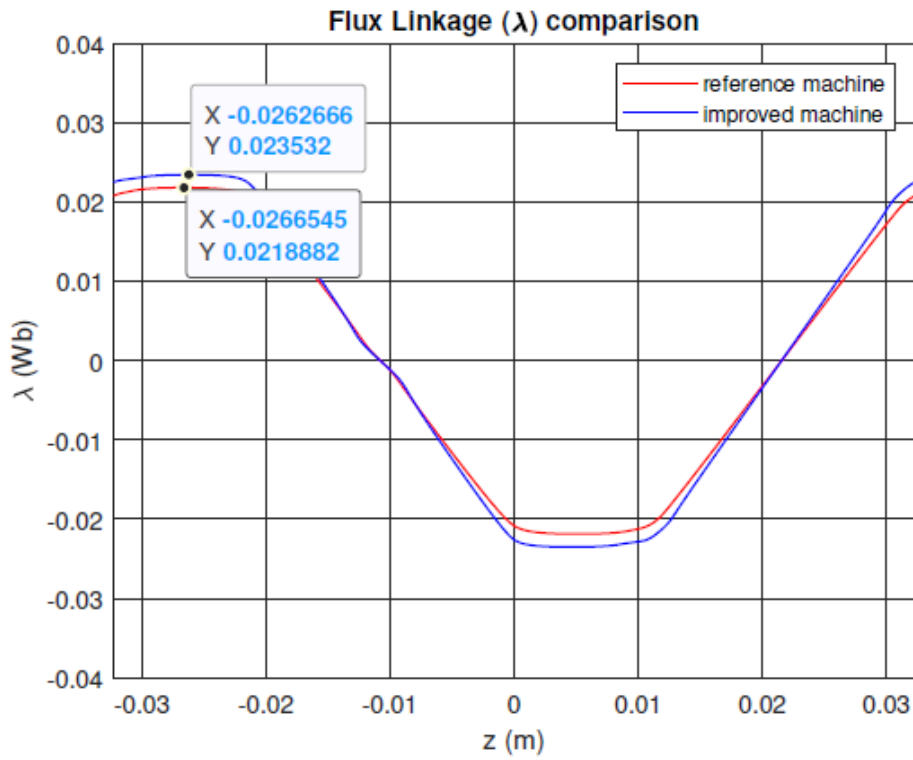
Figura 42: Comparação entre máquinas, no quesito densidade de fluxo magnético. a) Radial. b) tangencial. c) Módulo.



Fonte: Autor.

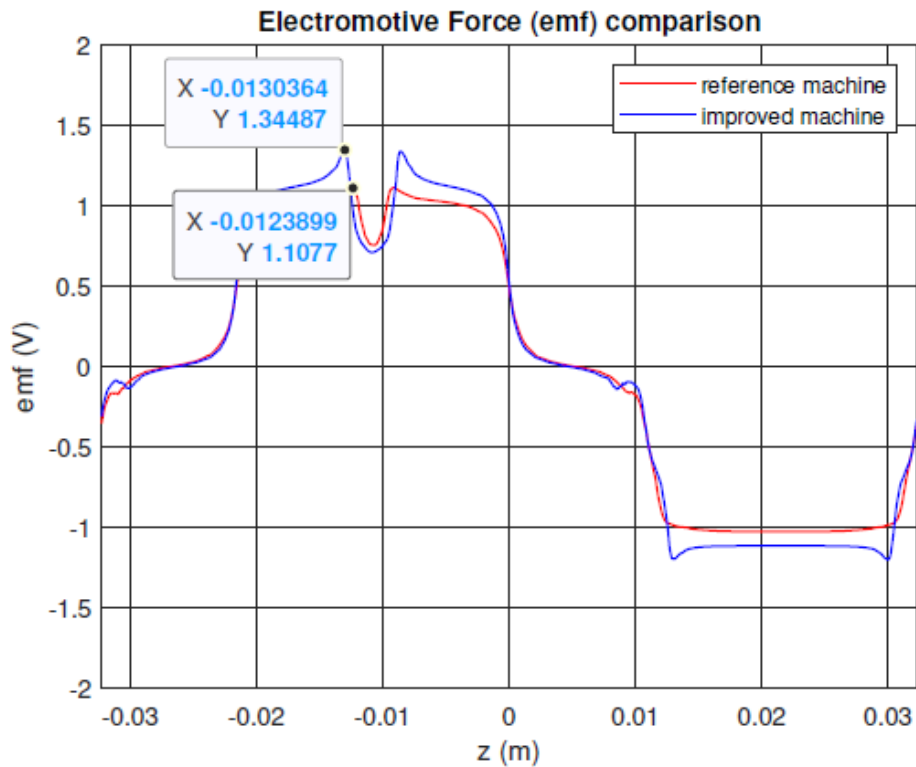
Embora o aumento no vínculo de fluxo tenha sido leve, a força eletromotriz foi incrementada de forma satisfatória, mostrando que as modificações nos parâmetros influenciaram positivamente os resultados.

Figura 43: Comparação da variável de fluxo entre as máquinas.



Fonte: Autor.

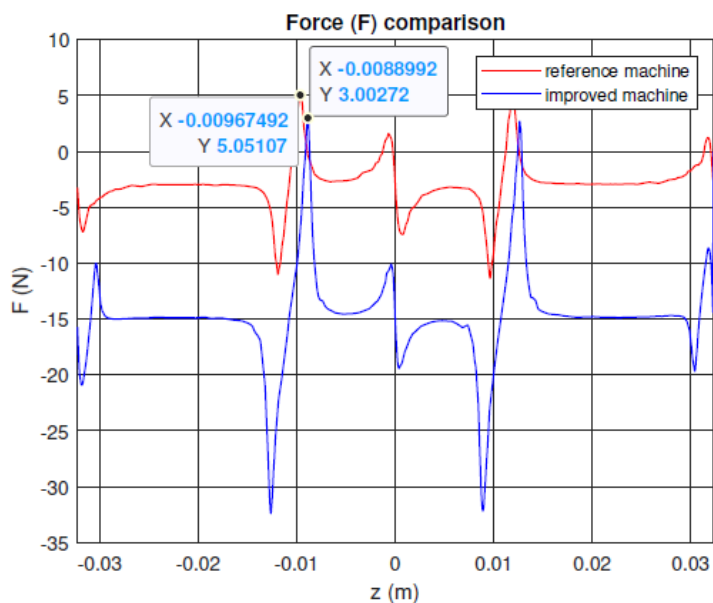
Figura 44: Comparação da variável de tensão elétrica entre as máquinas.



Fonte: Autor.

O gráfico de forças é mostrado na Figura 45, o resultado mostra a influência do aumento na densidade de fluxo tangencial na altura dos gráficos de força elétrica. Para todas as quantidades eletromagnéticas de interesse, observou-se um aumento considerável, ou seja, uma máquina melhor.

Figura 45: Comparação da variável de força elétrica entre as máquinas.



Fonte: Autor.

Os aumentos finais nos valores de pico em porcentagem, comparando a máquina original e a máquina aprimorada, estão listados na Tabela 5. Vale mencionar que a melhoria é alcançada sem comprometer a estrutura original de design da máquina vista na Figura 21.

Tabela 5: Aumento das quantidade eletromagnéticas importantes do gerador linear. Fonte: Autor.

Quantidade eletromagnética	Aumento percentual
B_r	20,10 %
B_t	89,05 %
$ B $	23,85 %
λ	7,51 %
EMF	21,41 %
F	68,22 %

Portanto, conhecendo a magnitude da força eletromotriz para a máquina aprimorada, é fácil ajustá-la para um valor de voltagem desejado. Por exemplo, em uma aplicação que requer um pico de força eletromotriz de 180 V, o parâmetro N (número de enrolamentos) pode ser incrementado para um valor que satisfaça esse problema, sem afetar os resultados de força, como pode ser visto na Equação (3). Assim, de acordo com as Equação (2) e Equação (1), a força eletromotriz é proporcional ao número de enrolamentos, resultando em um total de aproximadamente 133 enrolamentos para atingir o nível de tensão desejado. Conseqüentemente, o tamanho do cobre do estator pode ser escolhido com base na corrente de saída nominal do gerador.

Este estudo apresentou a análise de sensibilidade de parâmetros estruturais para um gerador síncrono linear de ímãs permanentes. Essa análise revelou que alguns parâmetros têm uma influência mais significativa do que outros nas quantidades elétricas. Com base no desenvolvimento em software MATLAB e FEMM, quatro parâmetros foram considerados mais sensíveis e capazes de influenciar as quantidades elétricas da parte ativa.

Ajustes nesses quatro parâmetros afetam o tamanho final do gerador, sem comprometer a estrutura da parte ativa. O entreferro foi reduzido em 30%, a largura da abertura do slot foi aumentada em 60%, e as alturas dos ímãs e do tradutor foram aumentadas em 30%. Conseqüentemente, o tamanho final do gerador otimizado é ligeiramente maior do que o original. Para a densidade de fluxo magnético, as curvas também foram semelhantes, com apenas um leve aumento em comparação com a máquina de referência, aproximadamente 7,51%. A força eletromotriz manteve a mesma forma de curva, mas com picos mais altos, estimados em um aumento de 21,41%. Embora a força de impulso se comporte de maneira semelhante à máquina não otimizada, houve uma disparidade significativa nos picos devido a grandes alterações nas densidades de fluxo na direção tangencial. Calculou-se que esse aumento é de aproximadamente 68,22%.

Finalmente, o design final com seções ativas otimizadas e mais compactas pode ser bem recebido na missão de reintroduzir a tecnologia de veículos híbridos, aliada à eficiência termomecânica superior à dos motores convencionais de biela e manivela.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados e discussões apresentados, é possível concluir que a utilização de gerador linear síncrono de ímãs permanentes em conjunto com um motor a pistão livre duplo no sistema motogerador é uma abordagem promissora para novos protótipos de veículos elétricos híbridos.

A máquina otimizada se mostrou apta para ser usada em projetos futuros, bem como na criação de protótipos em aplicações veiculares. Isso se deve, principalmente a grandes melhorias da máquina no geral sem afetar o seu peso ou tamanho. Isso faz com que não haja uma limitação em acoplá-la a novos motores.

As limitações encontradas no estudo, se deve essencialmente a pouca quantidade de bons documentos sobre o assunto, todos os documentos encontrados são de uma linguagem extremamente desafiadora. Logo, aliado a questão de uma pouca quantidade de referências, a alta sensibilidade das quantidades eletromagnéticas pode ter acarretado na não obtenção de bons resultados de força elétrica. Entretanto, o tema da força elétrica em máquinas deste tipo permite oportunidades futuras de novas pesquisas. Além disso, ao aproveitar a combinação dos resultados obtidos nesse trabalho com novas pesquisas acerca da força elétrica, será possível criar estratégias de controle para o sistema motogerador como um todo.

A otimização feita em cima máquina de referência garante uma melhoria na tecnologia de geradores lineares. Dessa forma, com a análise de sensibilidade no trecho ativo, novos pesquisadores podem desenvolver protótipos para aplicações similares.

Por fim, este trabalho reforça a importância da pesquisa e do desenvolvimento de soluções inovadoras na área da engenharia mecatrônica. A utilização de geradores lineares em sistema motogeradores são exemplos de como a aplicação de novas tecnologias pode trazer benefícios significativos para o setor veicular. Espera-se que este estudo inspire outros pesquisadores a explorarem e aprimorarem ainda mais essas tecnologias, impulsionando o progresso e a inovação na área, visto que se trata de uma tecnologia limpa que não polui o meio ambiente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, I. I.; IBRAHIM, T.; NOR, N. B. M. **Development and optimization of a moving-magnet tubular linear permanent magnet motor for use in a reciprocating compressor of household refrigerators.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, v. 77, p. 263–270, 2016. doi:10.1016/j.ijepes.2015.11.020.
- A. T. Hamada and M. F. Orhan, “**An overview of regenerative braking systems,**” J. Energy Storage, vol. 52, Aug. 2022, Art. no. 105033.
- BENTO, P. F. et al. **Modelo dinâmico e termodinâmico para motor linear de pistão livre.** Universidade Federal de Uberlândia, 2019. doi:10.14393/ufu.di.2019.339.
- BOLDEA, I. **Synchronous generators.** [S.I.]: CRC Press, 2015. doi:10.1201/b19310.
- BOLDEA, I. **Linear electric machines, drives, and MAGLEVs handbook.** [S.I.]: CRC press, 2017. doi:10.1201/b13756.
- BOSCH. A tecnologia de veículos híbridos. Disponível em: **Veículos híbridos: como funciona sua tecnologia?** | Bosch no Brasil acessado em 26 de out. 2023.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna.** São Paulo: Blucher, v. 1, 2012.
- COSTA, P. **Produção de hidrocarbonetos líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos,** 2006.
- DEVILLERS, E. et al. **A review of subdomain modeling techniques in electrical machines: performances and applications.** In: IEEE. Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on. [S.I.], 2016. p. 86–92. doi:10.1109/ICELMACH.2016.7732510.
- D.-D. Tran, M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, R. Barrero, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, “**Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies,**” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 119, Mar. 2020, Art. no. 109596.
- D. Peng, Y. Zhang, C.-L. Yin, and J.-W. Zhang, “**Combined control of a regenerative braking and antilock braking system for hybrid electric vehicles,**” Int. J. Automot. Technol., vol. 9, no. 6, pp. 749–757, Dec. 2008

Energy Research Office - EPE (Brazil), “**Brazilian Energy Balance: Summary Report 2021 - Reference year 2020**,” EPE, p. 77, 2021

Gysen, B. L. J., Lomonova, E. A., Paulides, J. J. H., & Vandenput, A. J. A. (2008). **Analytical and numerical techniques for solving laplace and poisson equations in a tubular permanent-magnet actuator: Part I. Semi-analytical framework.** IEEE Transactions on Magnetics, 44(7), 1751–1760.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.922416>.

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

H. Budde-Meiwes, J. Drillkens, B. Lunz, J. Muennix, S. Rothgang, J. Kowal, and D. U. Sauer, “**A review of current automotive battery technology and future prospects**,” Proc. Inst. Mech. Engineers, D, J. Automobile Eng., vol. 227, no. 5, pp. 761–776, May 2013.

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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.018>.

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

LEITE, GUSTAVO. **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR A PISTÃO LIVRE PARA CARROS HÍBRIDOS.** 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, [S. I.], 2021. Disponível em:
<https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5790>.

L. Zuo and P.-S. Zhang, “**Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions**,” J. Vib. Acoust., vol. 135, no. 1, pp. 1–16, Feb. 2013.

MIKALSEN, R. **An investigation into the free-piston engine concept and its potential for high efficiency and low emissions power generation.** Newcastle University, 2008.

MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P. **A review of free-piston engine history and applications.** Applied Thermal Engineering, Elsevier, v. 27, n. 14-15, p. 2339–2352, 2007.

M. Kandidayeni, J. P. Trovão, M. Soleymani, and L. Boulon, **“Towards health-aware energy management strategies in fuel cell hybrid electric vehicles: A review,”** *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 17, pp. 10021–10043, Feb. 2022.

M. K. Hasan, M. Mahmud, A. Ahasan Habib, S. Motakabber, and S. Islam, **“Review of electric vehicle energy storage and managementsystem: Standards, issues, and challenges,”** *Journal of Energy Storage*, vol. 41, no. July, p. 102940, 9 2021.

Q. Zhao, H. Zhang, and Y. Xin, **“Research on control strategy of hydraulic regenerative braking of electrohydraulic hybrid electric vehicles,”** *Math. Problems Eng.*, vol. 2021, pp. 1–9, Feb. 2021.

R. Baran and L. F. L. Legey, **“The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption,”** *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 5, pp. 907–917, 6 2013.

REVOREDO, T. **Modelagem e Gerenciamento de Potência de um Veículo Elétrico Híbrido de Célula a combustível.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

Rigamonti, M. (2020). **A comprehensive model for the simulation of free piston linear generators FPLG structure and features.**

Rodrigues, R. V. **Estudo e desenvolvimento numérico, do projeto de um gerador elétrico, acionado por motor a pistão livre.** Tese (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

S. M. Hosseini, M. Soleymani, S. Kelouwani and A. A. Amamou, **“Energy Recovery and Energy Harvesting in Electric and Fuel Cell Vehicles, a Review of Recent Advances,”** in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 83107-83135, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301329.

Singh, B., Jain, P., Mittal, A.P., et al., 2005. **Direct torque control: a practical approach to electric vehicle.** In: 2006 IEEE Power India Conference, New Delhi, 2005.

V. Krithika and C. Subramani, **“A comprehensive review on choice of hybrid vehicles and power converters, control strategies for hybrid electric vehicles,”** *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 5, pp. 1789–1812, Apr. 2018.

Verma, S., Mishra, S., Gaur, A., Chowdhury, S., Mohapatra, S., Dwivedi, G., & Verma, P. (2021). **A comprehensive review on energy storage in hybrid electric**

vehicle. In Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) (Vol. 8, Issue 5, pp. 621–637). Chang'an University.

<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.09.001>.

YAN, L. et al. **Electromagnetic linear machines with dual Halbach array: design and analysis.** [S.l.]: Springer, 2016. doi:10.1007/978-981-10-2309-5.

YUAN, C. et al. **Effect of hydrogen addition on the combustion and emission of a diesel free-piston engine.** International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, 2018. Doi:10.1016/j.ijhydene.2018.05.038.

Y. Gao, L. Chen, and M. Ehsani, “**Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV,**” SAE Trans., vol. 9, pp. 3184–3190, Jun. 1999.

Y. Wang, A. Biswas, R. Rodriguez, Z. Keshavarz-Motamed, and A. Emadi, “**Hybrid electric vehicle specific engines: State-of-the-art review,**” pp. 832–851, 11 2022.

ZOU, H. et al. **Experimental investigation and performance analysis of a direct-driven linear generator.** Energy Procedia, Elsevier, v. 142, p. 284-290, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.045.