

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA



JEYLTO ALVES DE SOUZA CRUVINEL

Método de Elementos Finitos e Processamento Paralelo na Otimização de Dispositivos
Eletromagnéticos através de Integração de Algoritmos Meta-Heurísticos

Uberlândia - MG

2024

JEYLTO ALVES DE SOUZA CRUVINEL

Método de Elementos Finitos e Processamento Paralelo na Otimização de Dispositivos
Eletromagnéticos através de Integração de Algoritmos Meta-Heurísticos

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

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: José Roberto Camacho, PhD

Uberlândia – MG

2024

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

C957 2024	Cruvinel, Jeylto Alves de Souza, 1995- Método de Elementos Finitos e Processamento Paralelo na Otimização de Dispositivos Eletromagnéticos através de Integração de Algoritmos Meta-Heurísticos [recurso eletrônico] / Jeylto Alves de Souza Cruvinel. - 2024. Orientador: José Roberto Camacho. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: null Inclui bibliografia. 1. Engenharia elétrica. I. Camacho, José Roberto, 1954- , (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título. CDU: 621.3
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

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

JEYLTO ALVES DE SOUZA CRUVINEL

Método de Elementos Finitos e Processamento Paralelo na Otimização de Dispositivos
Eletromagnéticos através de Integração de Algoritmos Meta-Heurísticos

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

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Uberlândia, 20 de setembro de 2024

Banca Examinadora:

Breno Brito Miranda – Doutor (UFTM)

Igor Peretta – Doutor (UFU)

Keiji Yamanaka – Doutor (UFU)

José Roberto Camacho – Orientador – Doutor (UFU)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 798 PPGEELT				
Data:	Vinte de setembro de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	16h00	Hora de encerramento:	18h30
Matrícula do Discente:	12222EEL009				
Nome do Discente:	Jeylto Alves de Souza Cruvinel				
Título do Trabalho:	Método de Elementos Finitos e Processamento Paralelo na Otimização de Dispositivos Eletromagnéticos através de Integração de Algoritmos Meta-Heurísticos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Elétricos de Potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: José Roberto Camacho. Título do projeto: Desenvolvimento de sistemas elétricos e híbridos para veículos. Agência financiadora: Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Número do processo na agência financiadora: 01.21.0144.00. Vigência do projeto: 03/12/2021 a 03/12/2024.				

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

Professores Doutores: Keiji Yamanaka (UFU), Igor Santos Peretta (UFU) Breno Brito Miranda (UFTM) e José Roberto Camacho, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. José Roberto Camacho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

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

APROVADO.

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

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



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Camacho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/09/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Breno Brito Miranda, Usuário Externo**, em 20/09/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor Santos Peretta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/09/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Keiji Yamanaka, Professor(a) do Magistério Superior**, em 20/09/2024, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5564872** e o código CRC **527DE328**.

Dedico este trabalho aos meus pais Jerônimo Alancardec Cruvinel e Maria Aparecida de Souza Cruvinel, as minhas irmãs Maria Laura Alves de Souza Cruvinel e Nelyken Alves de Souza Cruvinel, a Ana Letícia Alves Xavier e a todos os meus professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força e sabedoria nos momentos difíceis durante esta etapa da minha vida. Aos meus pais, Jerônimo Alancardec Cruvinel e Maria Aparecida de Souza Cruvinel, que sempre valorizaram a educação de seus três filhos, e às minhas irmãs, que constantemente me apoiam e ajudam na busca pelos meus sonhos e objetivos, meu profundo agradecimento.

Ao professor e amigo José Roberto Camacho, expresso minha gratidão pelo incentivo, motivação e orientação ao longo desta caminhada acadêmica.

A Ana Letícia Alves Xavier, meu sincero agradecimento pelo apoio incondicional nesta etapa da minha vida.

Ao meu querido amigo Francisco Wellington Martins da Silva, expresso minha profunda gratidão pela amizade e pelo companheirismo ao longo desta jornada.

Aos colegas e demais professores, sou grato pelo apoio e pelos bons momentos compartilhados durante esta jornada de pós-graduação. Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ao diretor e a todos os membros da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Por fim, agradeço o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), que foram essenciais para a realização deste trabalho.

“As coisas não mudam; nós mudamos.”
(Henry David Thoreau)

RESUMO

Esta dissertação explora a aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF) e do processamento paralelo na otimização de dispositivos eletromagnéticos através da integração de algoritmos Meta-Heurísticos. O estudo se concentra em duas estruturas principais: o reator de núcleo de ar monofásico e o reator trifásico de núcleo EI.

Diante da crescente preocupação com a sustentabilidade e a eficiência energética, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para a melhoria da qualidade de energia elétrica e para a redução de perdas no sistema. Nesse contexto, este trabalho foi motivado pela capacidade do MEF de fornecer resultados altamente precisos quando bem modelado, aproximando-se significativamente dos valores reais.

Os dispositivos estudados são fundamentais nesse cenário, pois desempenham um papel relevante na melhoria do fator de potência e na mitigação de harmônicos, contribuindo assim para sistemas mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, o uso de algoritmos de otimização, como o Enxame de Partículas (PSO) e os Algoritmos Genéticos (GA), permitiu encontrar soluções que, muitas vezes, superam aquelas obtidas por métodos analíticos tradicionais.

A dissertação apresenta uma aplicação prática do MEF, por meio da comparação entre o modelo axissimétrico de um reator de núcleo de ar e os dados obtidos em medições laboratoriais, bem como com simulações bidimensionais e tridimensionais.

Com o objetivo de potencializar o processo de otimização, a implementação de multiprocessamento em Python é detalhada, abordando os softwares utilizados e o modelo aplicado. Os resultados são discutidos em termos de gráficos que mostram a evolução dos parâmetros ao longo das gerações e os valores otimizados encontrados.

Os resultados obtidos validam o modelo das metodologias empregadas, oferecendo uma base sólida para pesquisas futuras voltadas à otimização de dispositivos eletromagnéticos. As conclusões destacam a importância da escolha adequada dos parâmetros de otimização e da estratégia de multiprocessamento, bem como as possibilidades de expansão do trabalho para outras configurações e aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: Algoritmos Meta-Heurísticos, Dispositivos Eletromagnéticos, Método de Elementos Finitos, Otimização, Processamento Paralelo.

ABSTRACT

This dissertation investigates the application of the Finite Element Method (FEM) and parallel processing in the optimization of electromagnetic devices through the integration of Meta-Heuristic algorithms. The study focuses on two main structures: the single-phase air-core reactor and the three-phase EI-core reactor.

Given the growing concern with sustainability and energy efficiency, the development of technologies that improve power quality and reduce system losses has become essential. In this context, the motivation for this work lies in the FEM's ability to deliver highly accurate results when properly modeled, closely approximating real-world values.

The devices analyzed play a key role in this scenario, as they contribute to power factor correction and harmonic mitigation, thus enabling more efficient and sustainable electrical systems.

Furthermore, the use of optimization algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithms (GA) enabled the identification of solutions that often outperform those obtained through traditional analytical methods.

The dissertation presents a practical application of FEM by comparing the axisymmetric model of an air-core reactor with laboratory measurements, as well as with 2D and 3D simulations.

To enhance the optimization process, the implementation of multiprocessing in Python is detailed, including the software used and the model applied. The results are discussed based on graphs showing the evolution of parameters over generations and the optimized values found.

The results validate the proposed model and methodologies, providing a solid foundation for future research aimed at the optimization of electromagnetic devices. The conclusions highlight the importance of choosing suitable optimization parameters and multiprocessing strategies, as well as the potential for expanding this work to other configurations and technological applications.

Keywords: Finite Element Method, Parallel Processing, Meta-Heuristic Algorithms, Optimization, Electromagnetic Devices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Possíveis caminhos para realizar a análise eletromagnética por elementos finitos.	46
Figura 2.2 - Condições de Borda Dirichlet e Neumann.	50
Figura 2.3 - Tipos de Elementos Finitos para problemas 2D e 3D.	52
Figura 3.1 - Classificação dos algoritmos Meta-Heurísticos.....	56
Figura 4.1 - Explicação da estrutura de Multithreading.	64
Figura 4.2 - Explicação da estrutura de Multiprocessing.	65
Figura 4.3 - Exemplo de funcionamento da classe Process.....	66
Figura 4.4 - Exemplo de funcionamento da classe Pool.....	67
Figura 4.5 - Ilustração de um ciclo de vida de um Processo Pool.	67
Figura 4.6 - Tipos de submissão de processos usando a classe Pool.	68
Figura 4.7 - Esquemático da Comunicação Integrada entre os softwares utilizados no modelo tridimensional.	70
Figura 4.8 - Estrutura de comunicação entre a linguagem Python e o software FEMM.....	72
Figura 5.1 - Reator de núcleo de ar monofásico.....	73
Figura 5.2 - Reator de núcleo de ar do tipo seco.	74
Figura 5.3 - Representação de um condutor em uma coordenada axissimétrica cilíndrica.....	75
Figura 5.4 - (a) Esquema das Dimensões do Reator de Núcleo de Ar e (b) Representação do reator em um sistema de coordenadas axissimétricas.	76
Figura 5.5 - Fluxograma do modelo de otimização proposto.....	80
Figura 5.6 - Estrutura e componentes do bloco Multiprocessing.	81
Figura 5.7 - Estrutura e componentes do bloco FEMM do reator de núcleo de ar monofásico.	82
Figura 5.8 - Reator trifásico do tipo EI.....	85
Figura 5.9 - Geometria do reator trifásico de núcleo EI. (a) vista frontal (b) vista lateral.	86
Figura 5.10 - Especificações da geometria das lâminas da empresa brasileira Tessin.....	87
Figura 5.11 - Densidades de fluxo magnético no núcleo do reator trifásico do tipo EI.	89
Figura 5.12 - Reator trifásico com a área da seção transversal da janela.	90
Figura 5.13 - Fluxograma do modelo de otimização proposto.....	91
Figura 5.14 - Estrutura e componentes do bloco FEMM.	92
Figura 5.15 - Curva de magnetização do aço elétrico M530-50A fornecido pela ArcelorMittal.	95
Figura 6.1 - Reator de núcleo de ar do tipo seco.	98

Figura 6.2 - Experimento realizado em laboratório para validação do modelo.	98
Figura 6.3 - Simulação da densidade de fluxo magnético do modelo de reator medido em laboratório utilizando o software Ansys Maxwell.....	100
Figura 6.4 - Simulação da densidade de fluxo magnético do modelo do reator medido em laboratório utilizando o software FEMM sobre o plano XY.....	101
Figura 6.5 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da função objetivo ao longo das gerações.	102
Figura 6.6 - Gráfico da evolução do melhor indivíduo com base na média da função objetivo ao longo das gerações.	103
Figura 6.7 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do volume ao longo das gerações.	103
Figura 6.8 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da indutância ao longo das gerações.	104
Figura 6.9 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do fator de qualidade ao longo das gerações.	104
Figura 6.10 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da densidade de corrente ao longo das gerações.....	105
Figura 6.11 - Simulação da densidade de fluxo magnético do reator da Tabela 6.5 usando o software FEMM.....	106
Figura 6.12 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da função objetivo ao longo das gerações.	107
Figura 6.13 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da média da função objetivo ao longo das gerações.....	107
Figura 6.14 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do volume ao longo das gerações.	108
Figura 6.15 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo das indutâncias ao longo das gerações.	108
Figura 6.16 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da potência reativa ao longo das gerações.	109
Figura 6.17 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da máxima densidade de fluxo magnético.	109
Figura 6.18 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do fator de utilização de janela.	110
Figura 6.19 - Simulação da densidade de fluxo magnético do dispositivo da Tabela 6.6.....	111

Figura 6.20 - Diagrama fasorial das correntes e tensões do reator trifásico do tipo EI obtido por meio do Método de elementos Finitos.....	112
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Comparação entre os diferentes métodos de processos.....	69
Tabela 5.1 - Restrições dos parâmetros de construção.....	83
Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados no PSO.	83
Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados pelo modelo.....	84
Tabela 5.4 - Restrições dos parâmetros de projeto.....	93
Tabela 5.5 - Dimensões das lâminas dos reatores trifásicos do tipo EI.	93
Tabela 5.6 - Valores Mínimos e Máximos para Normalização das Variáveis.	94
Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros do modelo no GA.	94
Tabela 5.8 - Parâmetros do modelo de otimização do reator trifásico.	94
Tabela 6.1 - Parâmetros construtivos do Reator de núcleo de ar estudado.	97
Tabela 6.2 - Resultados obtidos através da medição em laboratório.....	99
Tabela 6.3 - Resultados obtidos matematicamente.	100
Tabela 6.4 - Comparação entre os parâmetros medidos do reator de núcleo de ar e os parâmetros simulados.	101
Tabela 6.5 - Tabela com os parâmetros encontrados para o reator de menor volume.	105
Tabela 6.6 - Parâmetros encontrados para o reator trifásico com o menor volume de núcleo.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Algoritmo de Otimização de Enxame de Abelhas Artificiais
ACO	Otimização por Colônia de Formigas
ACR	Reatores de Núcleo de Ar
ACROA	Algoritmo de Otimização por Reação Química Artificial
BA	Algoritmo Inspirado em Morcegos
BBBC	Algoritmo de <i>Big-Bang Big-Crunch</i>
BBO	Otimizador Baseado em Biogeografia
BCPA	Algoritmo de Coleta de Pólen das Abelhas
BH	Algoritmo do Buraco Negro
BMO	Otimizador de Acasalamento de Aves
CBO	Otimização por Colisão de Corpos
CFO	Otimização por Força Central
COM	<i>Component Object Model</i>
CPU	Unidade Central de Processamento do Computador
CSO	Otimização por Espaço Curvado
CSS	Busca por Sistema Carregado
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DPO	Busca por Parceria de Golfinhos
ED	Evolução Diferencial
EMA	Algoritmo de Mercado de Troca
ES	Estratégia de evolução
FA	Algoritmo de Fogos de Artifício
FEMM	Finite Element Method on Magnetics
FIFO	<i>First in, First out</i>
GA	Algoritmos Genéticos
GbSA	Algoritmo de Busca Baseado na Galáxia
GCO	Algoritmo de Otimização de Consultoria em Grupo
GLSA	Busca Local Gravitacional
GP	Programação Genética
GPUs	Unidades de Processamento Gráfico
GSA	Algoritmo de Busca Gravitacional

GSO	Otimizador de Busca em Grupo
GUI	Interface Gráfica do Utilizador
HS	Algoritmo de Caça
HS	Busca de Harmonia
ICA	Algoritmo de Competição Imperialista
ISA	Algoritmo de Busca Interior
LCA	Algoritmo de Campeonato de Liga
MBA	Algoritmo de Explosão de Mina
MEF	Método de Elementos Finitos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PBIL	Aprendizagem Incremental Baseada em Probabilidade
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
RO	Algoritmo de Otimização por Raios
SA	Algoritmo de Recozimento Simulado
SBA	Algoritmo Baseado em Sociedade
SLC	Algoritmo de Competição de Liga de Futebol
SOA	Algoritmo de Otimização de Busca de Candidatos
SWOA	Algoritmo de Otimização de Pequeno Mundo
TLBO	Otimização Baseada no Ensino-Aprendizagem
TS	Algoritmo de Busca Tabu

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Alfanuméricos:

A	Comprimento da base da lâmina E [mm]
A_w	Área da seção transversal do fio [mm ²]
b	Base da seção transversal do condutor [mm]
B	Densidade de fluxo magnético [T]
B	Comprimento da altura da lâmina E [mm]
$B_{max_{femm}}$	Densidade de fluxo magnético máxima desejada [T]
$B_{max_{femm}}^{norm}$	Densidade de fluxo magnético máxima normalizada [pu]
$B_{A_{femm}}$	Densidade do fluxo magnético na fase primária [T]
$B_{B_{femm}}$	Densidade do fluxo magnético na fase secundária [T]
$B_{C_{femm}}$	Densidade do fluxo magnético na fase terciária [T]
c	Velocidade da luz no vácuo
c_1	Constante de aceleração
c_2	Constante de aceleração
C	Comprimento da largura da perna central lâmina E [mm]
D	Densidade de fluxo elétrico [C/M ²]
E	Campo elétrico [V/m]
E	Comprimento da largura de cada janela que compõe a lâmina E [mm]
ϵ_0	Permissividade do vácuo [F/m]
f	Frequência do sistema [Hz]
F	Comprimento da altura da lâmina I [mm]
g	Comprimento do entreferro [mm]
G	Comprimento da distância da base até a janela da lâmina E [mm]
G_{best}	A melhor posição global alcançada por qualquer partícula na população
h	Altura da seção transversal do condutor [mm]

H	Comprimento da distância da base até o centro do furo da lâmina E [mm]
I	Comprimento da distância entre os furos laterais da lâmina E [mm]
I_0	Corrente de referência ou corrente inicial [A]
id	Modelo de lâmina
J	Densidade de corrente elétrica [A/mm ²]
J_{femm}	Densidade de corrente [A/mm ²]
J_{max}	Densidade de corrente máxima desejada [A/mm ²]
Ku	Fator de preenchimento da janela
ku_{femm}	Fator de preenchimento da janela
Ku_{max}	Fator de preenchimento da janela máximo desejado
l	Comprimento do condutor do reator do núcleo de ar
L_0	Indutância desejada do reator [H]
$L_{A_{femm}}$	Indutância das bobinas na fase primária [H]
$L_{B_{femm}}$	Indutância das bobinas na fase secundária [H]
$L_{C_{femm}}$	Indutância das bobinas na fase terciária [H]
L_{femm}	Indutância Calculada por Métodos de Elementos Finitos [H]
$L_{A_{femm}}^{norm}$	Indutância normalizada da bobina primária
$L_{B_{femm}}^{norm}$	Indutância normalizada da bobina secundária
$L_{C_{femm}}^{norm}$	Indutância normalizada da bobina terciária
l_s	Largura da lateral do reator [mm]
N	Quantidade de condutores
N_c	Quantidade de condutores na perna central
N_l	Quantidade de condutores na perna lateral
nL	Quantidade de lâminas do núcleo
P_{best}	Melhor posição local alcançada pela partícula
$P_{B_{femm}}$	Penalidade máxima de densidade de fluxo magnético
P_J	Penalidade na densidade de corrente

$P_{Ku_{femm}}$	Penalidade máxima do fator de preenchimento da janela
P_{Lfemm}	Penalidade para indutância
P_Q	Penalidade do Fator de Qualidade
Q_{femm}	Fator de Qualidade
Q_{min}	Fator de Qualidade mínima desejada
R	Raio médio do reator de núcleo de ar [mm]
$rand$	Número Randômico
R_{calc}	Resistência calculada do reator [Ω]
R_{femm}	Representa a resistência do condutor obtida pelo método de elementos finitos [Ω]
R_L	Resistência do reator de núcleo de ar medido em laboratório [Ω]
r_p	Coeficiente de penalidade
s	Espaçamento entre os condutores
t	Tempo
$taxaM$	Taxa de Mutação
v	Velocidade da partícula
ν	Relutividade magnética
V	Volume do reator de núcleo de ar [m ³]
V_{femm}	Volume do dispositivo no <i>software</i> FEMM [m ³]
V_{femm}^{norm}	Volume normalizado
w	Coeficiente de inércia
W_a	Área da janela do núcleo EI [m ²]
W_L	Constante de peso da indutância na otimização
x	Posição atual da partícula na otimização
X_{femm}	Reatância indutiva do reator obtida pelo mesmo método
X_L	Reatância do reator de núcleo de ar medido em laboratório [Ω]
x_{max}	Valor máximo no conjunto de dados
x_{min}	Valor mínimo no conjunto de dados

Z_L	Impedância do reator de núcleo de ar medido em laboratório [Ω]
β	Parâmetro que controla a proximidade dos pais aos filhos
ϵ	Permissividade elétrica do meio [F/m]
μ	Permeabilidade magnética do meio [H/m]
μ_0	Permeabilidade do vácuo [H/m]
μ_r	Permeabilidade relativa
ρ	Densidade de carga elétrica
P_L	Penalização da indutância
σ	Condutividade do meio
ϕJ	Diâmetro dos furos nas lâminas E e I [mm]

OPERADORES

Div	Divergente
Rot	Rotacional
$Grad$	Gradiente
∂t	Derivada no tempo
$\partial x, \partial y, \partial z$	Derivadas no espaço
$\times$	Produto vetorial
$\cdot$	Produto escalar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	35
1.1	Objetivos.....	36
1.1.1	Objetivos Específicos	36
1.2	Revisão bibliográfica	37
1.2.1	Método de Elementos Finitos	37
1.2.2	Algoritmos Meta-Heurísticos	37
1.2.3	Processamento Paralelo	38
1.2.4	Reatores monofásicos de núcleo de ar	38
1.2.5	Reatores trifásicos de núcleo EI	38
1.2.6	Justificativas	39
1.3	Metodologia	40
1.3.1	Método de Elementos Finitos (MEF)	40
1.3.2	Implementação de Algoritmos Meta-Heurísticos	40
1.3.3	Integração com Processamento Paralelo	40
1.3.4	Procedimento de otimização	41
1.3.5	Validação do Modelo de Reator de núcleo de Ar	42
2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	43
2.1	Considerações Iniciais	43
2.2	Equações de Maxwell	43
2.3	Relação Constitutiva dos Materiais	44
2.3.1	Campo Magnético.....	45
2.3.2	Campo Elétrico	45
2.3.3	Densidade de Corrente.....	45
2.4	Detalhamento do Método de Elementos Finitos	46
2.4.2	Método Variacional	48
2.5	Condições de Borda	49
2.5.1	Condições de Borda Dirichlet.....	49
2.5.2	Condição de borda Neumann.....	50
2.5.3	Condições de Contorno Mistas de Robin	50
2.5.4	Condições de Contorno Periódicas	51
2.6	Passos para implementação do método dos elementos finitos	51
2.7	Domínio do Problema.....	52

2.7.1	Discretização do Domínio	52
2.7.2	Escolha das Funções de Interpolação	52
2.7.3	Formulação do Sistema de Equações Algébricas	53
2.7.4	Resolução das Equações Algébricas.....	53
2.8	Considerações Finais	53
3	ALGORITMOS META-HEURÍSTICOS	55
3.1	Considerações iniciais.....	55
3.2	Introdução	55
3.3	Métodos de Cálculo.....	56
3.3.1	Métodos Baseados em Evolução	56
3.3.2	Métodos Baseados em Enxame	57
3.3.3	Métodos Baseados em Física.....	57
3.3.4	Métodos Baseados em Comportamento Humano.....	57
3.4	Algoritmos genéticos (GA)	58
3.5	Etapas dos Algoritmos Genéticos	59
3.5.1	Inicialização da População	59
3.5.2	Avaliação	59
3.5.3	Seleção.....	60
3.5.4	Cruzamento.....	60
3.5.5	Mutação	60
3.6	Otimização por Enxame de Partículas (PSO)	60
3.7	Considerações Finais	61
4	PROCESSAMENTO PARALELO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS	63
4.1	Considerações Iniciais	63
4.2	Múltiplos <i>threads</i> (<i>Multithreading</i>) e Multiprocessamento (<i>Multiprocessing</i>)	63
4.2.1	Múltiplos <i>threads</i> (<i>Multithreading</i>).....	63
4.2.2	Multiprocessamento (<i>Multiprocessing</i>).....	64
4.3	Implementação de Multiprocessamento em Python.....	66
4.3.1	Classe <i>Process</i> (<i>Process Class</i>).....	66
4.3.2	Classe <i>Pool</i> (<i>Pool Class</i>)	66
4.4	Ciclo de vida de um processo usando a Classe <i>Pool</i>	67
4.6	Aspectos Computacionais	70
4.6.1	Softwares utilizados.....	70
4.7	Considerações Finais	72

5 ESTUDOS DE CASO	73
5.1 Considerações Iniciais	73
5.2 Estudo de caso 1 – Reator de núcleo de Ar tipo seco monofásico	73
5.2.1 Análise do reator núcleo de ar do tipo seco monofásico utilizando o método de elementos finitos (MEF).....	75
5.2.2 Formulação do Problema	75
5.2.3 Limites das Variáveis de Projeto	76
5.2.4 Restrições de igualdade	77
5.2.5 Restrições de desigualdade	77
5.2.6 Função Objetivo.....	79
5.2.8 Parâmetros e Critérios de Otimização	83
5.3 Estudo de Caso 2 – Reator Trifásicos do tipo EI	84
5.3.1 Introdução	84
5.3.2 Formulação do Problema	85
5.3.3 Geometria do Reator Trifásico de Núcleo EI	86
5.3.4 Limites das Variáveis de Projeto	87
5.3.5 Penalidade de Indutância	88
5.3.6 Penalidade de Densidade de Fluxo Magnético	88
5.3.7 Penalidade do Fator de Preenchimento da Janela.....	89
5.3.8 Normalização	90
5.3.9 Função Objetivo.....	90
5.3.10 Modelo de Otimização Proposto	91
5.3.11 Parâmetros e critérios de otimização	93
5.4 Configuração Computacional.....	95
5.5 Considerações Finais	95
6 RESULTADOS OBTIDOS	97
6.1 Considerações Iniciais	97
6.2 Validação do modelo axissimétrico	97
6.3 Resultados da otimização do reator de núcleo de ar	102
6.5 Considerações finais	112
7 DISCUSSÃO.....	115
8 CONCLUSÕES.....	117
8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	117
8.2 Publicações	118

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DAS LÂMINAS UTILIZADAS	125

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico nas áreas de engenharia elétrica e eletrônica tem impulsionado a necessidade de dispositivos eletromagnéticos cada vez mais eficientes e otimizados. Os reatores de núcleo de ar são dispositivos amplamente utilizados para a limitação de corrente de curto-circuito, controle de fluxo de carga, compensação de energia reativa e como elemento indutivo em filtros harmônicos sintonizados. Já os reatores trifásicos do tipo EI são empregados em filtros harmônicos, inversores de frequência, sistemas de compensação reativa, além de painéis de controle e diversos equipamentos elétricos. A otimização desses dispositivos é essencial para melhorar seu desempenho, reduzir custos e aumentar a eficiência energética.

A metodologia do Método de Elementos Finitos (MEF) tem se mostrado uma ferramenta poderosa na análise e simulação de dispositivos eletromagnéticos. O MEF permite a modelagem precisa de fenômenos complexos, proporcionando uma compreensão detalhada do comportamento dos dispositivos sob diferentes condições operacionais. No entanto, a complexidade computacional associada ao MEF pode ser um desafio, especialmente quando se trata de otimizações que exigem múltiplas iterações e grandes volumes de dados.

Para superar esses desafios, a integração de algoritmos Meta-Heurísticos, como a otimização por enxame de partículas (PSO) e os Algoritmos Genéticos (GA), tem se destacado como uma abordagem eficaz. Esses algoritmos são capazes de encontrar soluções ótimas ou quase ótimas em espaços de busca complexos, sendo especialmente úteis em problemas de otimização não-lineares e multidimensionais. Além disso, a implementação de processamento paralelo pode acelerar significativamente o tempo de computação, permitindo a execução de simulações mais rápidas e eficientes.

Esta dissertação tem como objetivo explorar a combinação do MEF com algoritmos Meta-Heurísticos e processamento paralelo para a otimização de dispositivos eletromagnéticos. Especificamente, o estudo se concentra na otimização de um reator de núcleo de ar monofásico e um reator trifásico de núcleo EI. A escolha desses dispositivos se deve à sua ampla aplicação industrial e à relevância de sua otimização para a melhoria da eficiência dos sistemas elétricos.

A otimização de dispositivos eletromagnéticos alinha-se diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (FRANCO et al., 2020). A melhoria da eficiência energética e a redução de perdas em sistemas elétricos contribuem para um uso mais sustentável dos recursos energéticos, promovendo o acesso universal à energia moderna, confiável e sustentável.

O trabalho é estruturado da seguinte forma: inicialmente, são apresentadas as fundamentações teóricas do MEF, incluindo as equações de Maxwell, a relação constitutiva dos materiais e a discretização do domínio. Em seguida, são discutidas as metodologias Galerkin e Variacional, bem como a implementação das condições de borda. Posteriormente, a dissertação aborda a aplicação prática do MEF, incluindo a validação de modelos e a otimização dos dispositivos utilizando PSO e GA. A implementação do processamento paralelo em Python é detalhada, destacando-se a sua estrutura lógica e a categorização das abordagens utilizadas.

Os resultados obtidos são analisados e discutidos em termos de eficiência computacional e precisão das simulações, demonstrando a eficácia da abordagem proposta. Finalmente, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, destacando os potenciais expansões e aplicações dos métodos desenvolvidos.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar uma metodologia que integra o Método de Elementos Finitos (MEF), algoritmos Meta-Heurísticos e processamento paralelo para a otimização de dispositivos eletromagnéticos, visando melhorar a eficiência, precisão e desempenho desses dispositivos

1.1.1 Objetivos Específicos

Este trabalho tem os seguintes itens específicos:

- Implementar a análise da indutância, densidade de corrente e fator de qualidade de reatores eletromagnéticos utilizando MEF, garantindo precisão na modelagem e simulação dos fenômenos eletromagnéticos.
- Desenvolver e adaptar algoritmos Meta-Heurísticos, como Algoritmos Genéticos (GA) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO), para a otimização de parâmetros dos dispositivos eletromagnéticos.
- Empregar o uso de processamento paralelo, através de uma biblioteca Python para distribuir as tarefas computacionais e melhorar o aproveitamento computacional para execução das simulações e otimizações.
- Validar a metodologia de representação axissimétrica desenvolvida comparando os resultados de simulação tridimensional e com dados experimentais de um reator de

núcleo de ar monofásico, assegurando confiabilidade do modelo axissimétrico no programa *Finite Element Method on Magnetism* (FEMM).

- Alinhar a pesquisa com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificamente ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), promovendo avanços sustentáveis na engenharia elétrica.
- Investigar possíveis aplicações futuras da metodologia desenvolvida em outros tipos de dispositivos eletromagnéticos, ampliando o escopo e impacto da pesquisa.

1.2 Revisão bibliográfica

Essa pesquisa está diretamente relacionada com as Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 e 12, por isso foi utilizado a referência do livro de Franco et al. (2020), que aborda a implementação desses objetivos em nível local. O restante da revisão bibliográfica se pautou nos seguintes itens do estado da arte.

1.2.1 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver problemas de engenharia com uma boa precisão matemática. Através da discretização do domínio em pequenos elementos, o MEF permite a aproximação de soluções para equações diferenciais parciais. Os livros de Boldea e Tutelea (2021) e de Cardoso (2017) oferecem uma visão aprofundada sobre a aplicação do MEF em máquinas elétricas e eletromagnetismo, respectivamente, detalhando desde os princípios fundamentais até a implementação prática.

1.2.2 Algoritmos Meta-Heurísticos

Os algoritmos Meta-Heurísticos, como os Algoritmos Genéticos (GA) e a Otimização por Enxame de Partículas (PSO), são estratégias robustas para a solução de problemas de otimização complexos. O livro clássico de Goldberg (1989) foi utilizado para obter conceitos importantes de Algoritmos Genéticos, enquanto Mirjalili e Lewis (2016) oferecem uma classificação abrangente dos algoritmos Meta-Heurísticos e sua comparação com um novo algoritmo heurístico proposto. Para realizar aplicação de técnicas específicas no algoritmo genético, foi utilizado seleção por torneio da referência de Goldberg e Deb (1991) e o

cruzamento binário simulado (SBX) da referência de Deb e Agarwal (1995), esses estudos forneceram conhecimentos necessários para realizar essa implementação. Já o algoritmo de otimização por Enxame de Partículas (PSO) é bem coberto nos trabalhos de Kennedy e Eberhart (1995) e Zhan et al. (2009), que abordam uma versão adaptativa dessa técnica.

1.2.3 Processamento Paralelo

O processamento paralelo é essencial para lidar com a crescente demanda por eficiência computacional em aplicações intensivas, como a otimização de dispositivos eletromagnéticos. O estudo de Cave, Smith e Johnson (2020) e de Kumar, Das e Chakrabarti (2023) fornecem uma base sólida sobre os sistemas de processamento paralelo e as técnicas de sincronização necessárias para sua implementação eficaz. A documentação da Python Software Foundation (2023) foi importante para a aplicação prática da biblioteca *Multiprocessing* em ambiente Python.

1.2.4 Reatores monofásicos de núcleo de ar

Os reatores de núcleo de ar são componentes importantes em sistemas de energia, oferecendo vantagens como baixa perda e alta eficiência. As referências de Caverly et al. (2017), Papp et al. (2014) fornecem alguns conceitos importantes sobre o design, a operação e a modelagem de reatores de núcleo de ar, com ênfase especial nos modelos axissimétricos que são relevantes para a otimização utilizando o MEF. A referência Hu e Palazzolo (2019) foi utilizada para complementar o estudo sobre as coordenadas axissimétricas.

1.2.5 Reatores trifásicos de núcleo EI

Em relação aos reatores trifásicos de núcleo EI foi utilizado como referência o trabalho de Kazimierczuk (2009) que discute o design desses reatores utilizando o método do produto da área, enquanto Yang e Wang (2017) exploram a estrutura de enrolamentos de compensação para reatores trifásicos acoplados. Além disso, os modelos de lâminas utilizados no método de elementos finitos para realizar a otimização são baseados nas especificações fornecidas pela Tessin (2024), uma empresa brasileira que fornece materiais de alta qualidade para reatores, motores e transformadores elétricos.

1.2.6 Justificativas

Atualmente existe uma crescente demanda por dispositivos eletromagnéticos eficientes que impulsionam a busca por métodos e técnicas que otimizem seu desempenho e que sejam cada vez mais sustentáveis. A otimização de reatores eletromagnéticos é crucial para várias aplicações industriais e de energia, impactando diretamente a eficiência energética, a estabilidade e a durabilidade dos sistemas elétricos.

A aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF) oferece uma abordagem robusta e precisa para a análise de dispositivos eletromagnéticos, diferenciando dos métodos analíticos que acabam não conseguindo representar muito bem alguns fenômenos que ocorrem no equipamento real. No entanto, a complexidade dos problemas reais muitas vezes resulta em elevados custos computacionais. A integração de algoritmos Meta-Heurísticos com o MEF permite a exploração eficiente de grandes espaços de solução, identificando configurações ótimas dos dispositivos com maior eficácia.

Além disso, o uso de processamento paralelo é essencial para reduzir o tempo de computação necessário para simulações complexas, tornando a otimização prática e viável para aplicações industriais. A combinação dessas técnicas proporciona uma metodologia poderosa para a otimização de dispositivos eletromagnéticos, oferecendo resultados precisos em um tempo reduzido.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver métodos otimizados e eficientes para o design e melhoria de dispositivos eletromagnéticos, contribuindo para avanços na engenharia elétrica e eletromagnética. A validação da metodologia proposta através da comparação com um reator de núcleo de ar real reforça a relevância e a aplicabilidade dos resultados, proporcionando um impacto positivo tanto no campo acadêmico quanto na indústria.

Adicionalmente, este projeto alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especificamente:

- ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura: A pesquisa promove a inovação na engenharia de dispositivos eletromagnéticos e fortalece a infraestrutura industrial, através do desenvolvimento de métodos avançados e eficientes.
- ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis: A otimização de dispositivos eletromagnéticos pode levar a um uso mais eficiente dos recursos e materiais, promovendo padrões de consumo e produção sustentáveis.

Assim, a dissertação não só avança o conhecimento técnico e científico, mas também contribui para objetivos globais de sustentabilidade e desenvolvimento.

1.3 Metodologia

1.3.1 Método de Elementos Finitos (MEF)

O MEF é a base para a análise e simulação dos dispositivos eletromagnéticos neste trabalho. A metodologia envolve a discretização do domínio do problema em pequenos elementos finitos, nos quais as equações diferenciais que governam o comportamento físico são aproximadas por equações algébricas. Para garantir a precisão e eficiência da simulação, foi utilizado o *software* FEMM no desenho das dimensões dos dispositivos para gerar as malhas e encontrar a solução das equações. Foi utilizado também o Ansys Maxwell para análise tridimensional do reator de núcleo de ar monofásico real, a fim de validar o modelo bidimensional axissimétrico.

1.3.2 Implementação de Algoritmos Meta-Heurísticos

Os algoritmos Meta-Heurísticos, como Algoritmos Genéticos (GA) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO) são empregados para a otimização dos parâmetros dos dispositivos eletromagnéticos. A implementação destes algoritmos é realizada em um ambiente de programação Python, permitindo a integração com o MEF utilizando a biblioteca em Python do próprio *software* FEMM. Os parâmetros de cada algoritmo são ajustados para garantir a convergência e eficiência do processo de otimização.

1.3.3 Integração com Processamento Paralelo

Para lidar com a alta demanda computacional das simulações e otimizações, o processamento paralelo é utilizado através da biblioteca *Multiprocessing* do Python para distribuir as tarefas computacionais entre múltiplos processadores. Isso reduz significativamente o tempo de execução das simulações e otimizações.

1.3.4 Procedimento de otimização

a) Definição do Problema:

O problema de otimização é definido com base nas especificações dos parâmetros dos reatores eletromagnéticos, incluindo as restrições e o objetivo de redução de volume dos equipamentos.

b) Construção dos dispositivos:

São colocadas as dimensões dos dispositivos no ambiente de programação *Python* e utiliza-se a biblioteca *PyFEMM* para realizar a comunicação da linguagem de programação com o *software* FEMM, que aplica tais dimensões.

c) Discretização do Domínio:

Utiliza-se o *software* FEMM para a geração da malha do domínio do problema, assegurando uma Discretização adequada.

d) Configuração do Solver MEF:

As propriedades do material e as condições de contorno são definidas no *software* FEMM, que então resolve as equações diferenciais para cada elemento finito.

e) Execução dos Algoritmos Meta-Heurísticos:

Os algoritmos Meta-Heurísticos são implementados para buscar a melhor configuração dos parâmetros dos dispositivos, com cada iteração avaliando a função objetivo através do solver de MEF.

f) Paralelização:

As tarefas computacionais são distribuídas entre múltiplos processadores utilizando técnicas de paralelização, otimizando a eficiência computacional.

1.3.5 Validação do Modelo de Reator de núcleo de Ar

A validação do modelo de reator de núcleo de ar é um passo fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por simulação. Essa etapa visa demonstrar que o modelo numérico desenvolvido representa de forma precisa o comportamento físico do sistema real, permitindo sua aplicação em estudos futuros.

Para isso, foi realizada uma comparação entre os resultados simulados e os dados experimentais através da medição em laboratório dos parâmetros de um reator de núcleo de ar real. Essas medições foram comparadas com uma simulação bidimensional usando coordenadas axissimétricas e a simulação tridimensional. Esta comparação permitiu verificar a precisão do modelo desenvolvido e validar os resultados obtidos. A análise focou em garantir que as simulações representassem com precisão o comportamento físico do reator, proporcionando confiança na metodologia aplicada para futuros estudos e aplicações.

2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

2.1 Considerações Iniciais

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma poderosa técnica numérica utilizada para resolver problemas complexos em diversas áreas da engenharia e das ciências aplicadas, como a mecânica dos sólidos, a transferência de calor, o eletromagnetismo e a dinâmica dos fluidos. Este método se destaca por sua capacidade de lidar com geometrias complexas, condições de contorno complicadas e materiais heterogêneos.

A abordagem do MEF consiste em discretizar o domínio contínuo do problema em subdomínios menores, chamados de elementos finitos. A partir dessa discretização, as equações diferenciais que governam o comportamento físico do sistema são transformadas em um sistema de equações algébricas que podem ser resolvidas numericamente. Este procedimento permite uma aproximação eficaz das soluções exatas, proporcionando resultados precisos e confiáveis.

Nas próximas seções deste capítulo, serão discutidos os fundamentos teóricos e as etapas de aplicação do MEF. Inicialmente, serão apresentadas as equações de Maxwell, que formam a base teórica para a modelagem de problemas eletromagnéticos, exploraremos os principais conceitos e técnicas do MEF, incluindo a discretização do domínio, o método dos resíduos (Galerkin) e o método variacional. Também serão discutidas as diferentes condições de contorno, como as condições de Dirichlet, Neumann, mistas e periódicas, que são essenciais para a definição e solução dos problemas.

Por fim, serão feitas considerações finais, destacando as vantagens e limitações do MEF, bem como suas possíveis aplicações em projetos de otimização de dispositivos eletromagnéticos. Esta discussão proporcionará uma visão abrangente do método, suas capacidades e sua relevância no contexto da engenharia moderna.

2.2 Equações de Maxwell

O campo eletromagnético é um campo físico produzido por cargas elétricas em movimento, que influenciam o comportamento de outras cargas elétricas (BOLDEA; TUTELEA, 2021). Ele pode ser visto como uma combinação dos campos elétrico e magnético. As equações de Maxwell reúnem as cargas elétricas, a produção de campo e a interação em um conjunto de equações (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

Onde E é o campo elétrico, B é a densidade de fluxo magnético, J é a densidade de corrente elétrica, ρ é a densidade de carga elétrica, ϵ_0 é a permissividade do vácuo e μ_0 é a permeabilidade do vácuo e t é o tempo.

Essas equações também são válidas para outros meios com constantes ϵ e μ . Para domínios livres de cargas elétricas ($\rho=0$) e sem corrente elétrica ($J=0$), obtêm-se as equações das ondas eletromagnéticas (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 B - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo, definida por (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.7)$$

As equações das ondas são úteis no projeto de antenas, guias de onda em telecomunicações e na investigação da compatibilidade eletromagnética de dispositivos elétricos.

2.3 Relação Constitutiva dos Materiais

As relações constitutivas estabelecem as propriedades elétrica e magnética dos materiais ao conectar os vetores de campo, como o campo elétrico E e a densidade de fluxo magnético B , com suas fontes associadas densidade de fluxo elétrico (D), campo magnético (H) e a densidade de corrente (J).

2.3.1 Campo Magnético

Para o campo magnético, a relação constitutiva é descrita pela equação (CARDOSO, 2017):

$$B = \mu H \quad (2.8)$$

Onde μ representa a permeabilidade magnética do meio, medida em henrys por metro (H/m). No vácuo ou ar, a permeabilidade magnética é $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, um valor relativamente baixo que demonstra a dificuldade de estabelecer um fluxo magnético no ar.

A permeabilidade magnética de um meio é frequentemente expressa como um múltiplo da permeabilidade magnética do vácuo, utilizando a permeabilidade relativa μ_r , definida como (CARDOSO, 2017):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.9)$$

Outra forma de expressar essa relação constitutiva é através da reluctividade magnética ν , medida em metros por henry (m/H), conforme a equação (CARDOSO, 2017):

$$H = \nu B \quad (2.10)$$

2.3.2 Campo Elétrico

A relação constitutiva que conectam o vetor de deslocamento elétrico D com o campo elétrico E são descritas por (CARDOSO, 2017):

$$D = \epsilon E \quad (2.11)$$

Onde ϵ é a permissividade elétrica do meio, medida em Farads por metro (F/m). No vácuo, a permissividade é $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ F/m, o valor mais baixo possível de permissividade elétrica.

A permissividade elétrica relativa ϵ_r do meio é definida pela relação (CARDOSO, 2017):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

2.3.3 Densidade de Corrente

As relações constitutivas que conectam a densidade de corrente J com o campo elétrico E são dadas por (CARDOSO, 2017):

$$J = \sigma E \quad (2.13)$$

Onde σ é a condutividade do meio, medida em Siemens por metro (S/m).

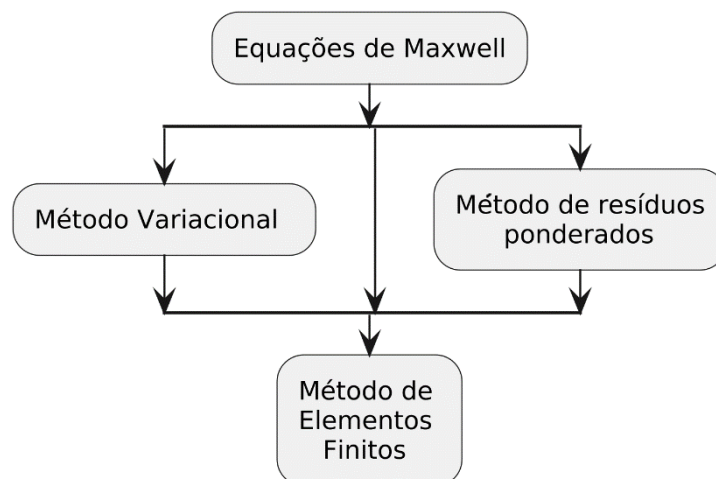
Essas relações constitutivas são essenciais para a análise e modelagem de problemas eletromagnéticos, pois fornecem a base para conectar os campos elétricos e magnéticos com as propriedades materiais dos meios em que se propagam.

2.4 Detalhamento do Método de Elementos Finitos

O MEF possui duas formulações matemáticas clássicas amplamente apresentadas na literatura atual. A primeira é baseada na minimização de uma funcional de energia, na qual se busca uma solução que minimize uma função integral de energia elétrica associada ao fenômeno, envolvendo variáveis de estado desconhecidas nos nós da malha de elementos finitos. A segunda formulação é baseada no método dos resíduos ponderados, no qual é necessário encontrar uma solução aproximada para a equação de Poisson, sujeita a condições de contorno bem definidas, através de técnicas numéricas.

Uma técnica bastante conhecida dentro do contexto dos métodos dos resíduos ponderados é a técnica de Galerkin, que, na maioria dos problemas, gera um sistema de equações lineares simétricas, facilitando sua resolução. Apesar de sua complexidade e de não estarem diretamente associadas a fenômenos físicos, essas técnicas numéricas são amplamente utilizadas na modelagem de problemas de engenharia.

Figura 2.1 - Possíveis caminhos para realizar a análise eletromagnética por elementos finitos.



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 2017).

Para simplificar a matemática, o sistema de equações diferenciais que descreve um fenômeno é escrito na forma operacional (BOLDEA; TUTLEA, 2021):

$$L\phi(P, t) = f(P, t) \quad (2.14)$$

Onde L é um operador genérico que simboliza o sistema de equações com derivadas parciais, ϕ é uma função espacial, P representa as coordenadas de um ponto, e t é o tempo.

O MEF resolve aproximadamente equações diferenciais parciais e integrais. Com este método, o domínio do campo é dividido em um número finito de elementos simples (triângulos, retângulos planos, tetraedros, prismas e paralelepípedos) e a solução do problema de campo é aproximada por funções simples.

A solução aproximada do campo magnético pode ser expressa como (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\phi^*(P, t) = \sum_j^N \phi_j v_j(P, t) \quad (2.15)$$

Onde v_j são interpolações ou expansões das funções básicas e ϕ_j são coeficientes que ainda precisam ser determinados. Fisicamente, ϕ_j representa o potencial magnético nos nós da malha de discretização.

O sistema de equações equivalente deve ser estável, no sentido de que os erros provenientes dos dados de entrada e aqueles dos cálculos intermediários não devem se acumular e produzir resultados ruins

2.4.1 Método dos Resíduos (Galerkin)

O método de Galerkin opera diretamente com as equações diferenciais. A solução exata ϕ , que satisfaz a Equação (2.14), é aproximada por uma função simples ϕ^* , que satisfaz a relação (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

$$L\phi^* - f = r \quad (2.16)$$

Quanto menor for r , melhor será a aproximação. Busca-se uma boa aproximação global em todo o domínio. O resíduo r é integrado sobre todo o domínio, após multiplicação por uma função de ponderação w_i e essa integral é forçada a ser nula (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$R_i = \int_D w_i (L\phi^* - f) d\tau = 0 \quad (2.17)$$

O método de resíduos mais utilizado é o método de Galerkin, onde as funções de ponderação são escolhidas iguais às funções de expansão v_j (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

$$R_i = \int_D \left(v_i \left(\sum_{j=1}^N \phi_j v_j \right) - v_j f \right) d\tau \quad (2.18)$$

Ao forçar todos os termos da Equação (2.17) a zero, obtém-se um sistema de equações matriciais (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$S \cdot \phi = T \quad (2.19)$$

Onde S é a matriz do sistema ou matriz de rigidez, pois o MEF foi inicialmente utilizado na engenharia mecânica, ϕ é a matriz coluna do potencial vetorial nos nós da malha e T é uma matriz coluna cujos termos dependem da função f (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$t_i = \int_D v_i f d\tau \quad (2.20)$$

Os elementos da matriz de rigidez S dependem das funções de interpolação v_j (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \int_D (v_i L v_j + v_j L v_i) d\tau \quad (2.21)$$

A matriz S é uma matriz esparsa. Além disso, se a Equação (2.18) for válida, a matriz S é simétrica (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\langle L\Phi, \phi \rangle = \langle \Phi, L\phi \rangle \quad (2.22)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = \int_D v_i L v_j d\tau \quad (2.23)$$

Nesse caso, o sistema algébrico de equações pelos métodos de Galerkin e Variacional são idênticos.

2.4.2 Método Variacional

Partindo novamente do sistema de equações diferenciais, um funcional $F(\phi)$ é definido de tal forma que seu mínimo em relação a ϕ é a solução do sistema (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$F(\Phi) = \frac{1}{2} L\langle \Phi, \Phi \rangle - \frac{1}{2} \langle \Phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \Phi \rangle \quad (2.24)$$

Para definir o funcional, o produto interno de duas funções é expresso como a integral de uma função multiplicada pelo conjugado complexo da segunda função (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\langle \Phi, \phi \rangle = \int_D \Phi \bar{\phi} d\tau \quad (2.25)$$

A função ϕ é substituída por ϕ^* na Equação (2.15). Os coeficientes ϕ_j são calculados zerando a derivada de F em relação aos mesmos (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\frac{\delta F}{\delta \phi_j} = 0; i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.26)$$

Para o método variacional, a condição (2.23) deve ser satisfeita. Nessas condições, a função que minimiza F é uma solução do sistema (2.14). A matriz de rigidez é sempre simétrica e o sistema de equações algébricas é idêntico ao do método de Galerkin. Quando as condições de contorno são não homogêneas, a Equação (2.23) não é satisfeita. Nesse caso, a definição do funcional deve considerar as não homogeneidades das condições de contorno (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$F(\Phi) = \frac{1}{2} \langle L\Phi, \Phi \rangle - \frac{1}{2} \langle L\Phi, \Psi \rangle + \frac{1}{2} \langle \Phi, L\Psi \rangle - \frac{1}{2} \langle \Phi, f \rangle - \frac{1}{2} \langle f, \Phi \rangle \quad (2.27)$$

Onde Ψ é qualquer função particular que satisfaz as condições de contorno não homogêneas.

2.5 Condições de Borda

As condições de borda são utilizadas para que as equações diferenciais e parciais aceitem somente uma única solução como correta se as condições iniciais de borda estiverem corretas. A seguir estão os principais tipos de bordas:

2.5.1 Condições de Borda Dirichlet

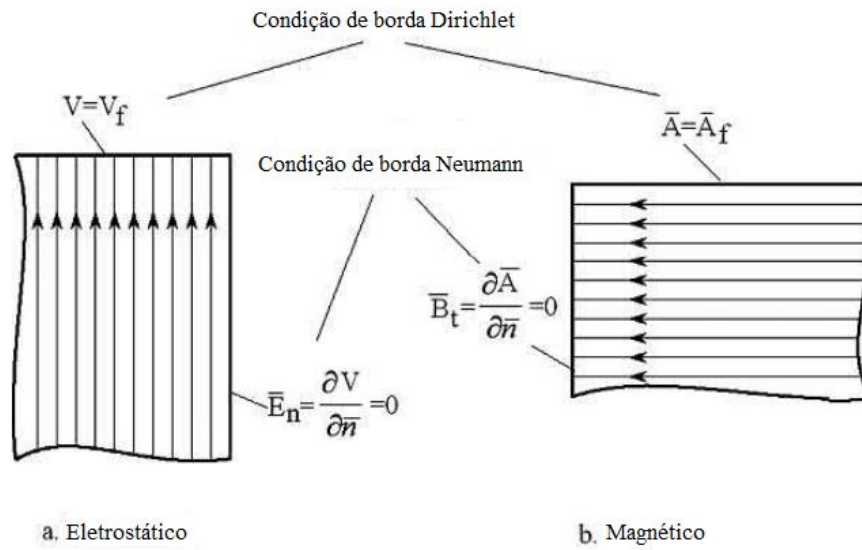
As condições de contorno de Dirichlet implicam que o potencial magnético do campo investigado é especificado ao longo do contorno (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

$$\Phi = \Phi_f \quad (2.28)$$

Onde Φ é o vetor potencial genérico.

Essa condição de contorno de Dirichlet estabelece que o valor do potencial magnético é conhecido e prescrito ao longo das fronteiras do domínio em estudo. Isso significa que o campo magnético é completamente determinado pelo vetor potencial Φ , que satisfaz a equação acima. Para esse campo magnético, as linhas de campo são tangentes à superfície, enquanto para um campo eletrostático, elas são normais a essa superfície (contorno), conforme é observado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Condições de Borda Dirichlet e Neumann.



Fonte: Adaptado de (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

2.5.2 Condição de borda Neumann

As condições de contorno de Neumann especificam a derivada do potencial de campo ao longo da normal à superfície do contorno. Se essa derivada for igual a zero, as condições de Neumann são chamadas de homogêneas (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (2.29)$$

Para esse campo magnético, as linhas de campo são normais à superfície, enquanto para um campo eletrostático, elas são tangentes à superfície de contorno conforme observado na Figura 2.2.

2.5.3 Condições de Contorno Mistas de Robin

Se o potencial magnético composto, Φ_g , for zero, temos novamente condições homogêneas. As condições de contorno de Robin permitem definir impedâncias de contorno através das quais o efeito dos campos fora do contorno é considerado (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = k\Phi = \Phi_g \quad (2.30)$$

Nesse caso, as condições de contorno de Robin combinam as condições de Dirichlet e Neumann, introduzindo um termo proporcional ao próprio potencial magnético Φ . Isso permite modelar situações em que há uma relação linear entre o potencial e sua derivada normal no contorno.

As condições de contorno de Robin são úteis quando se deseja considerar a influência de regiões externas ao domínio de interesse, através de uma impedância efetiva no contorno.

2.5.4 Condições de Contorno Periódicas

As condições de contorno periódicas permitem reduzir o esforço computacional pelo uso de simetria.

O potencial de campo nos dois contornos Γ_1 e Γ_2 é o mesmo para pontos homólogos (simetria par), ou tem valores iguais e opostos (simetria ímpar) (BOLDEA; TUTELEA, 2021):

$$\Phi(\Gamma_1) = \Phi(\Gamma_2) \quad (2.31)$$

As condições de simetria podem ser impostas apenas para contornos idênticos, ou seja, aqueles que podem ser sobrepostos por translação ou rotação (BOLDEA; TUTELEA, 2021).

A forma dos contornos pode ser bastante intrincada o que permite a utilização de condições de contorno simétricas mesmo que uma parte da geometria se mova.

Essas condições de contorno periódicas são úteis quando se deseja aproveitar a simetria do problema para reduzir o domínio computacional e, conseqüentemente, o esforço de cálculo.

Elas são aplicadas quando existem regiões idênticas no domínio que podem ser tratadas de forma simétrica.

2.6 Passos para implementação do método dos elementos finitos

O MEF é realizado em uma sequência de etapas que ajudam a encontrar uma solução para o problema.

2.7 Domínio do Problema

2.7.1 Discretização do Domínio

O domínio do campo investigado é dividido em N elementos. Se o domínio for 1D, a curva respectiva é dividida em segmentos lineares. Para problemas 2D, o domínio é uma superfície e cada subdomínio é um polígono, em geral, um triângulo ou um retângulo.

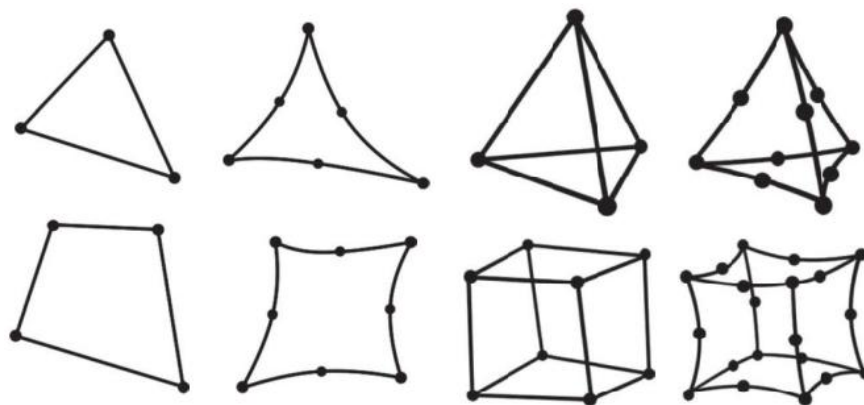
Finalmente, para problemas 3D, o domínio volumétrico é dividido em tetraedros e prismas com bases triangulares e paralelepípedicas.

A precisão deste método depende fortemente do número de elementos, N , e de como a malha foi construída.

Essa discretização do domínio em elementos simples, como segmentos, triângulos, tetraedros etc., é a base do MEF. A escolha adequada do tipo e do número de elementos é fundamental para obter uma aproximação precisa da solução do problema eletromagnético.

A qualidade da malha de elementos finitos é um fator crucial que impacta diretamente a acurácia dos resultados obtidos. Portanto, a construção cuidadosa da malha é uma etapa essencial na aplicação do MEF.

Figura 2.3 - Tipos de Elementos Finitos para problemas 2D e 3D.



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 2017).

2.7.2 Escolha das Funções de Interpolação

As funções de interpolação buscam estimar a função desconhecida em cada subdivisão do domínio. A estrutura geral da interpolação é expressa pela Equação (2.15), na qual P

representa as coordenadas de um ponto em uma subdivisão. Normalmente, são empregados polinômios de grau um e dois como funções de interpolação.

2.7.3 Formulação do Sistema de Equações Algébricas

Os métodos de resíduos ou variacionais resultam no sistema de equações algébricas da Equação (2.19), onde o vetor desconhecido se refere ao potencial escalar ou vetorial nos nós da malha.

2.7.4 Resolução das Equações Algébricas

Quando o material no domínio do campo é linear, os coeficientes das equações algébricas são constantes, e o método de Gauss-Seidel é frequentemente usado para resolver as equações algébricas. Se o material for não linear, os coeficientes na matriz de rigidez não serão mais constantes, e o método de Newton-Raphson é frequentemente usado para resolver as equações algébricas (CARDOSO, 2017).

Essa sequência de etapas - escolha das funções de interpolação, formulação do sistema de equações algébricas e resolução desse sistema - é fundamental no Método dos Elementos Finitos. A seleção adequada das funções de interpolação e a solução eficiente do sistema de equações são cruciais para obter resultados precisos na modelagem de problemas eletromagnéticos.

2.8 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada uma visão abrangente do MEF, incluindo as Equações de Maxwell e as relações constitutivas dos materiais. Foram detalhados os fundamentos teóricos do método variacional e do método dos resíduos ponderados, destacando suas aplicações e importância na solução de problemas eletromagnéticos.

O MEF, com suas diversas abordagens e técnicas, provou ser uma ferramenta poderosa e versátil na modelagem e análise de dispositivos eletromagnéticos. Compreender essas técnicas é essencial para a aplicação eficiente do MEF em problemas práticos, garantindo a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

No próximo capítulo, serão abordados os algoritmos Meta-Heurísticos que serão utilizados em conjunto com o MEF neste trabalho para a otimização de dispositivos

eletromagnéticos. A integração dessas técnicas avançadas de otimização com o MEF visa melhorar ainda mais o desempenho e a eficiência dos dispositivos analisados, proporcionando soluções inovadoras e eficazes para os desafios encontrados na área.

3 ALGORITMOS META-HEURÍSTICOS

3.1 Considerações iniciais

Na busca contínua por soluções otimizadas em diversos campos da engenharia, os algoritmos de otimização têm desempenhado um papel fundamental. Entre esses algoritmos, os Meta-Heurísticos se destacam pela sua capacidade de fornecer soluções eficientes para problemas complexos, onde métodos tradicionais de otimização frequentemente falham devido à alta dimensionalidade, não linearidade e presença de múltiplos ótimos locais.

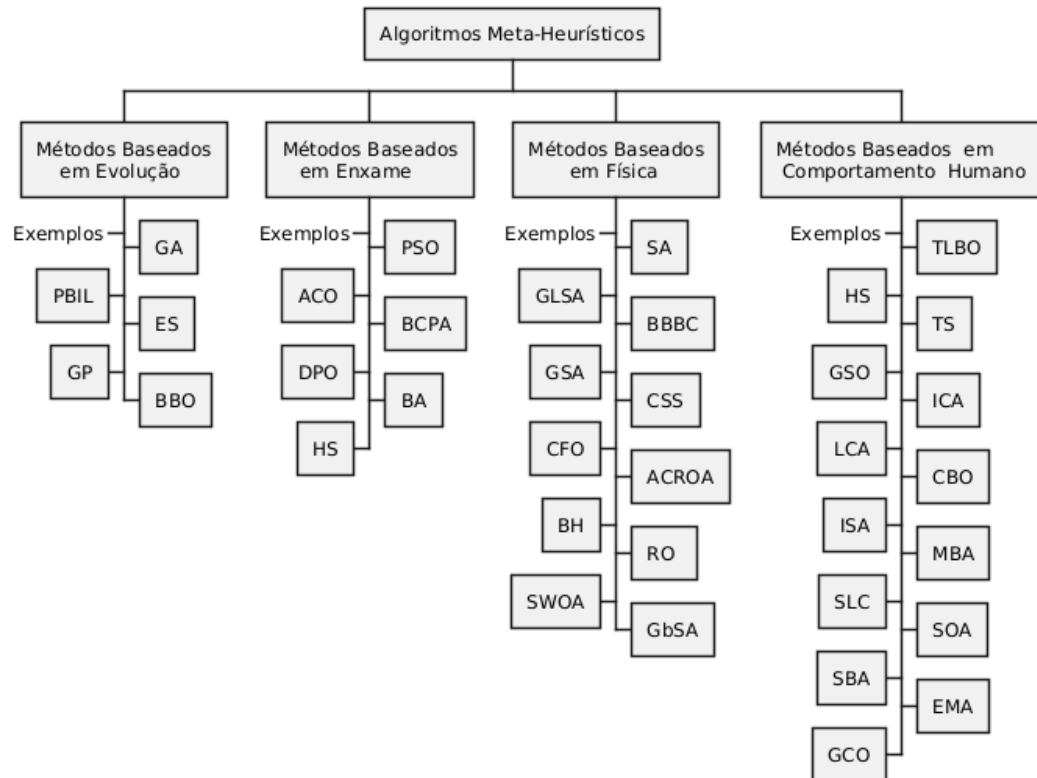
Os algoritmos Meta-Heurísticos são métodos de busca que se baseiam em processos naturais ou comportamentais para explorar o espaço de soluções de maneira inteligente e eficaz. Elas não garantem encontrar a solução ótima global, mas são projetadas para encontrar boas soluções em um tempo computacional razoável. Essa abordagem é particularmente útil em problemas onde a função objetivo não possui uma forma analítica simples ou derivadas fáceis de calcular.

3.2 Introdução

Os algoritmos de otimização Meta-Heurísticos estão se tornando cada vez mais populares em aplicações de engenharia devido a diversas vantagens: (1) eles se baseiam em conceitos relativamente simples e são fáceis de implementar; (2) não requerem informações de gradiente; (3) podem superar ótimos locais; (4) podem ser utilizados em uma ampla gama de problemas cobrindo diferentes disciplinas (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

Os algoritmos Meta-Heurísticos inspirados na natureza resolvem problemas de otimização imitando fenômenos biológicos ou físicos. Eles podem ser agrupados em três categorias principais: métodos baseados em evolução, métodos baseados em física e métodos baseados em enxame (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

Figura 3.1 - Classificação dos algoritmos Meta-Heurísticos.



Fonte: Autor (2024).

3.3 Métodos de Cálculo

3.3.1 Métodos Baseados em Evolução

Os métodos baseados em evolução são inspirados pelas leis da evolução natural. O processo de busca começa com uma população gerada aleatoriamente, que é evoluída ao longo de gerações subsequentes. O ponto forte desses métodos é que os melhores indivíduos são sempre combinados para formar a próxima geração de indivíduos, permitindo que a população seja otimizada ao longo das gerações. O método mais popular inspirado na evolução é o Algoritmo Genético (GA), que simula a Teoria da Evolução Natural. Outros algoritmos populares incluem Estratégia de Evolução (ES), Aprendizagem Incremental Baseada em Probabilidade (PBIL), Programação Genética (GP), Evolução Diferencial (ED) e Otimizador Baseado em Biogeografia (BBO) (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

3.3.2 Métodos Baseados em Enxame

A terceira categoria inclui técnicas baseadas em enxame, que imitam o comportamento social de grupos de animais. O algoritmo mais popular é a Otimização por Enxame de Partículas (PSO), originalmente desenvolvido por Kennedy e Eberhart, inspirado no comportamento social do bando de aves. Outro algoritmo popular é a Otimização por Colônia de Formigas (ACO), inspirado pelo comportamento social das formigas em uma colônia. Outras técnicas baseadas em enxame incluem o Algoritmo de Coleta de Pólen das Abelhas (BCPA), a Busca por Parceria de Golfinhos (DPO), o Algoritmo Inspirado em Morcegos (BA), o Algoritmo de Caça (HS), o Otimizador de Acasalamento de Aves (BMO), o Algoritmo de Otimização de Enxame de Abelhas Artificiais (ABC), entre outros (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

3.3.3 Métodos Baseados em Física

Os métodos baseados em física imitam as regras físicas do universo. Os algoritmos mais populares incluem o Recozimento Simulado (SA), a Busca Local Gravitacional (GLSA), o Algoritmo de *Big-Bang Big-Crunch* (BBBC), o Algoritmo de Busca Gravitacional (GSA), a Busca por Sistema Carregado (CSS), a Otimização por Força Central (CFO), o Algoritmo de Otimização por Reação Química Artificial (ACROA), o Algoritmo do Buraco Negro (BH), a Otimização por Raios (RO), o Algoritmo de Otimização de Pequeno Mundo (SWOA), o Algoritmo de Busca Baseado na Galáxia (GbSA) e a Otimização por Espaço Curvado (CSO) (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

3.3.4 Métodos Baseados em Comportamento Humano

Além dos métodos inspirados na natureza, há também métodos inspirados em comportamentos humanos, como a Otimização Baseada no Ensino-Aprendizagem (TLBO), a Busca de Harmonia (HS), a Busca Tabu (TS), o Otimizador de Busca em Grupo (GSO), o Algoritmo de Competição Imperialista (ICA), o Algoritmo de Campeonato de Liga (LCA), o Algoritmo de Fogos de Artifício (FA), a Otimização por Colisão de Corpos (CBO), o Algoritmo de Busca Interior (ISA), o Algoritmo de Explosão de Mina (MBA), o Algoritmo de Competição de Liga de Futebol (SLC), o Algoritmo de Otimização de Busca de Candidatos (SOA), o Algoritmo Baseado em Sociedade (SBA), o Algoritmo de Mercado de Troca (EMA) e o Algoritmo de Otimização de Consultoria em Grupo (GCO) (MIRJALILI; LEWIS, 2016).

Neste trabalho, foram utilizados dois algoritmos Meta-Heurísticos amplamente consolidados: a Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e o Algoritmo Genético (GA). O objetivo é trabalhar o modelo de otimização a ser utilizado nos dispositivos eletromagnéticos, pois os algoritmos Meta-Heurísticos, quando devidamente parametrizados, podem alcançar resultados satisfatórios. A utilização desses métodos permite explorar e otimizar soluções de maneira eficiente, aproveitando as vantagens específicas de cada abordagem para resolver problemas complexos de otimização.

3.4 Algoritmos genéticos (GA)

Os algoritmos genéticos baseiam-se em conceitos derivados da teoria da seleção natural para encontrar as melhores soluções para o problema estudado e é utilizado principalmente para otimização. Assim, são capazes de convergir para soluções ótimas com base em diferentes variáveis que tem influência no projeto do modelo analisado.

Os algoritmos genéticos são algoritmos que são fundamentados em alguns processos naturais de evolução, tais como cruzamento, mutação e seleção natural (GOLDBERG, 1989).

Através desses modelos matemáticos, o GA realiza a busca do ponto de ótimo global dentro dos parâmetros escolhidos.

Nesse processo de iteração o GA é diferente de outros métodos, pois consegue aproveitar as soluções já encontradas ao mesmo tempo que explora outras possibilidades.

Os algoritmos genéticos buscam a otimização global de um sistema através do modelo do processo evolutivo encontrado na natureza. O elemento chave do algoritmo genético é um vetor conhecido como cromossomo que representa o gene de cada indivíduo. Uma população é formada por todo um conjunto de cromossomos e é projetada com base em evoluir rumo a determinada aptidão. As primeiras gerações da população são desenvolvidas de forma aleatória de modo que em seguida são aplicadas em operadores matemáticos para criar uma geração seguinte a partir da geração atualmente usada. Os de melhor aptidão tendem a ficar nas populações, enquanto os piores tendem a ser descartados. Assim esse processo se repete diversas vezes de forma que os cromossomos de maior aptidão são sempre movidos para a próxima geração, continuando o processo até encontrar o grau de aptidão desejado. A mutação no processo de otimização tem um papel fundamental na exploração do espaço de soluções, permitindo que o algoritmo busque novos caminhos e evite ficar preso em mínimos ou máximos locais. Por outro lado, o cruzamento é responsável pelo aprofundamento, refinando as soluções já encontradas e explorando com mais precisão as regiões mais promissoras do espaço de busca.

Os algoritmos genéticos são uma ferramenta baseada na seleção natural da biologia para encontrar soluções complexas. Os principais componentes de um algoritmo genético são a inicialização da população, a avaliação, a seleção, o cruzamento, mutação e elitismo.

3.5 Etapas dos Algoritmos Genéticos

3.5.1 Inicialização da População

A inicialização da população pode ser feita por três categorias de técnicas de inicialização de população, baseadas em aleatoriedade, composicionalidade e generalidade (KAZIMIPOUR; LI; QIN, 2014). Consiste em gerar uma população inicial de maneira aleatória, cada solução é representada por um vetor, onde cada elemento do vetor corresponde a uma variável do problema, conforme a Equação (3.1).

$$X_{j,i} = rand[0,1](X_H - X_L) + X_L \quad (3.1)$$

Onde $rand [0,1]$ é um número aleatório (pseudo-aleatório) que gera valores entre 0 e 1 (distribuição uniforme) e $X_L = [X_{1,L}, X_{2,L}, \dots, X_{D,L}]$ e $X_H = [X_{1,H}, X_{2,H}, \dots, X_{D,H}]$ representam, respectivamente, os limites inferior e superior do espaço de busca para cada variável $X_{j,i}$, considerando os índices i e j

3.5.2 Avaliação

No contexto de algoritmos genéticos, o processo de avaliação refere-se à etapa em que cada indivíduo da população é avaliado com base em sua aptidão ou desempenho em relação ao problema que está sendo resolvido. A avaliação é fundamental para determinar quais indivíduos são mais adequados para a reprodução e, portanto, têm maior probabilidade de passar suas características para a próxima geração.

Durante a avaliação, cada indivíduo é submetido a uma função de aptidão que atribui um valor numérico representando o quão bem ele se sai na resolução do problema. Com base nessa avaliação, os indivíduos são classificados e selecionados para reprodução, de acordo com o princípio de "sobrevivência do mais apto".

Em resumo, o processo de avaliação em algoritmos genéticos é essencial para guiar a evolução da população, permitindo que os melhores indivíduos sejam preservados e utilizados na geração de descendentes para as gerações futuras.

3.5.3 Seleção

A seleção é o processo que são escolhidos os melhores indivíduos através da avaliação de sua aptidão. Nesse artigo o processo de seleção será através do método do torneio (GOLDBERG; DEB, 1991).

3.5.4 Cruzamento

O cruzamento é o processo no qual dois ou mais indivíduos são combinados para criar indivíduos. Isso simula a recombinação genética na natureza e pode gerar soluções promissoras a partir das características dos pais. Existem vários métodos de cruzamento, neste trabalho foi utilizado o método *Simulated Binary Crossover* (SBX) (DEB; AGARWAL, 1995).

$$\begin{aligned} Filho_1 &= 0,5 \left[((1 + \beta) \cdot x_1 + (1 - \beta) \cdot x_2) \right] \\ Filho_2 &= 0,5 \left[((1 - \beta) \cdot x_1 + (1 + \beta) \cdot x_2) \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Onde β é um parâmetro que controla a proximidade dos filhos aos pais. Geralmente, o valor de β é escolhido aleatoriamente entre 0 e 1, com uma distribuição específica, por exemplo, uniforme ou seguindo uma distribuição normal.

3.5.5 Mutação

A equação matemática empregada para representar a mutação em algoritmos genéticos neste artigo é (GOLDBERG, 1989):

$$filhos[i,j] = \begin{cases} rand(minimo[j], maximo[j]), & \text{se } rand[0,1] < taxaM \\ filhos[i,j], & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde $filhos[i,j]$ é a matriz de indivíduos a serem mutados, i é o índice do indivíduo na matriz, j é o índice do gene no indivíduo, $taxaM$ é a taxa de mutação e $rand$ é uma função aleatória uniforme que gera um número aleatório no intervalo escolhido [mínimo, máximo].

3.6 Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

A Otimização por Enxame de Partículas (PSO) é uma técnica de computação evolutiva amplamente aplicada a vários problemas de otimização em diferentes domínios. Proposta em 1995 por Kennedy e Eberhart (KENNEDY; EBERHART, 1995), a inspiração para o algoritmo PSO baseia-se no comportamento social de animais, como pássaros e peixes. O algoritmo

emprega um conjunto de partículas para guiar sua busca. Cada partícula tem uma velocidade e é influenciada pelas soluções encontradas local e globalmente. Em cada iteração, as partículas atualizam suas posições em relação tanto ao indivíduo quanto à população inteira, buscando soluções promissoras. Dado seu conceito simples e eficácia, o PSO se tornou um otimizador popular e tem sido amplamente aplicado na resolução de problemas práticos (ZHAN et al., 2009).

Existem diversas maneiras de usar o PSO; neste trabalho, as atualizações das velocidades e posições das partículas seguem as equações padrão do PSO. A atualização da velocidade é determinada pela Equação (3.4).

$$v_i = wv_i + c_1rand_1(P_{best_i} - x_i) + c_2rand_2(G_{best_i} - x_i) \quad (3.4)$$

Onde v_i é a velocidade da partícula i na próxima iteração, w é o coeficiente de inércia, c_1 e c_2 são constantes de aceleração, $rand_1$ e $rand_2$ são valores aleatórios uniformemente distribuídos entre 0 e 1, P_{best_i} é a melhor posição local alcançada pela partícula, G_{best_i} é a melhor posição global alcançada por qualquer partícula na população, e x_i é a posição atual da partícula.

O valor da posição correspondente é então atualizado por:

$$x_i = x_i + v_i \quad (3.5)$$

Onde x_i e v_i são, respectivamente, a posição e a velocidade da partícula i na próxima iteração.

Essas atualizações permitem que as partículas explorem o espaço de busca de maneira ordenada e adaptativa, buscando soluções cada vez melhores ao longo das iterações do algoritmo PSO.

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo, exploramos os algoritmos Meta-Heurísticos, abordando métodos baseados em evolução, física, enxame e comportamento humano. Destacamos a aplicação dos Algoritmos Genéticos (GA) e da Otimização por Enxame de Partículas (PSO), evidenciando sua eficácia na otimização de problemas complexos.

Concluimos que esses algoritmos são ferramentas valiosas para explorar soluções em problemas difíceis, oferecendo flexibilidade e eficiência. No próximo capítulo, discutiremos o

processamento paralelo e sua aplicação para melhorar a performance dos algoritmos Meta-Heurísticos.

4 PROCESSAMENTO PARALELO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

4.1 Considerações Iniciais

Processamento paralelo é uma técnica de computação na qual várias operações são executadas simultaneamente, utilizando múltiplos processadores para dividir e realizar tarefas complexas. Isso é feito para aumentar a velocidade de execução e a eficiência computacional. Em sistemas de processamento paralelo, tarefas são divididas em subtarefas menores que podem ser processadas simultaneamente em diferentes unidades de processamento (CAVE; SMITH; JOHNSON, 2020). O objetivo é reduzir o tempo total de execução, distribuindo a carga de trabalho entre vários núcleos da Unidade Central de Processamento do Computador (CPU).

Neste trabalho, o processamento paralelo foi utilizado devido à grande quantidade de simulações dos dispositivos eletromagnéticos necessárias à convergência dos algoritmos Meta-Heurísticos. Essa abordagem visa otimizar o desempenho computacional, uma vez que o processamento das grandes matrizes envolvidas nessas simulações demanda um alto poder computacional.

A utilização do paralelismo permitiu utilizar melhor o processamento computacional durante a execução das simulações de elementos finitos, reduzindo o tempo total necessário para a aplicação dos algoritmos Meta-Heurísticos. No entanto, neste trabalho, não foi realizada uma análise quantitativa da redução de tempo obtida.

4.2 Múltiplos *threads* (*Multithreading*) e Multiprocessamento (*Multiprocessing*)

Para realizar o processamento paralelo neste trabalho, utilizou-se a linguagem Python, que permite a implementação através das abordagens de *Multiprocessing* e *Multithreading*.

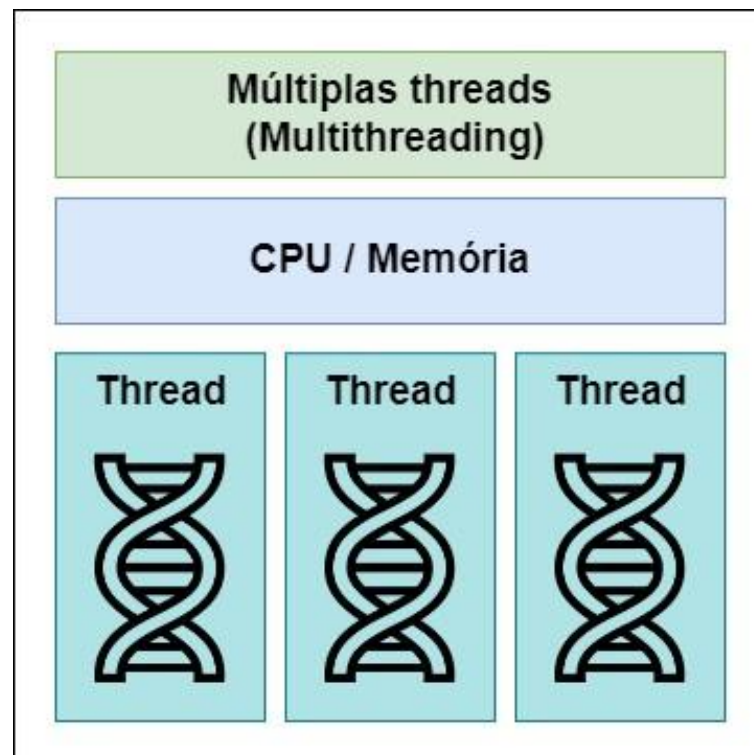
Multithreading e *Multiprocessing* são duas técnicas distintas para alcançar a execução paralela em sistemas de computação, diferenciando-se na forma como gerenciam e utilizam os recursos do sistema.

4.2.1 Múltiplos *threads* (*Multithreading*)

Os *Threads* são a menor unidade de processamento que pode ser gerenciada de forma independente por um sistema operacional. Eles permitem a execução de múltiplas tarefas dentro

de um único processo, compartilhando o mesmo espaço de memória e recursos do processo pai. Isso facilita a comunicação rápida e eficiente entre as tarefas, mas também pode levar a problemas de sincronização e concorrência (KUMAR; DAS; CHAKRABARTI, 2023). Para ilustrar melhor essa diferença, as abordagens de *multithreading* e *multiprocessing* são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 - Explicação da estrutura de *Multithreading*.

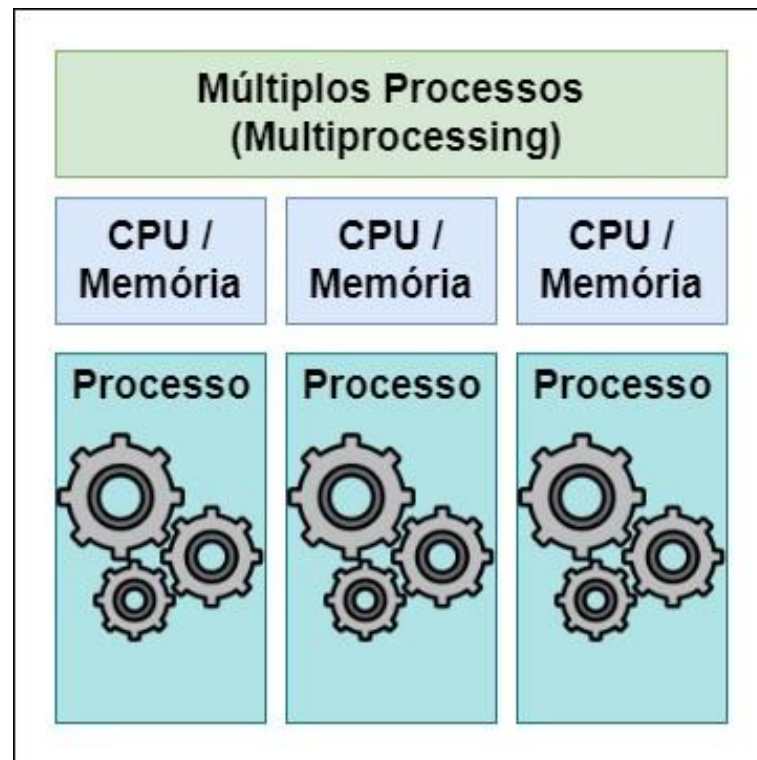


Fonte: Autor (2024).

4.2.2 Multiprocessamento (*Multiprocessing*)

Envolve a execução de múltiplos processos independentes, cada um com seu próprio espaço de memória. Isso proporciona um isolamento maior entre os processos, reduzindo o risco de interferência e problemas de concorrência. No entanto, a comunicação entre processos é mais complexa e pode ser mais lenta devido ao isolamento.

Figura 4.2 - Explicação da estrutura de *Multiprocessing*.



Autor (2024).

Desta forma, o *multiprocessing* utiliza duas ou mais CPUs para aumentar o poder de computação, enquanto o *multithreading* usa um único processo com múltiplos segmentos de código para aumentar o poder de computação.

Assim, a escolha entre *multithreading* e *multiprocessing* depende das necessidades específicas da aplicação e dos recursos disponíveis no sistema. *Multithreading* é geralmente preferido para tarefas que requerem comunicação frequente e rápida entre *threads*, enquanto *multiprocessing* é mais adequado para tarefas que podem ser executadas de forma independente e que se beneficiam do isolamento entre processos.

Neste trabalho, adotou-se o processamento paralelo do tipo *Multiprocessing* devido aos cálculos numéricos serem realizados através do *software* de elementos finitos FEMM. Este *software* foi desenvolvido para executar tarefas de maneira única e independente, garantindo o isolamento entre os processos, o que é um ambiente mais propício a utilização do tipo *Multiprocessing*.

4.3 Implementação de Multiprocessamento em Python

Uma maneira de obter Multiprocessamento baseado em processos em Python é utilizando o módulo *Multiprocessing* (PYTHON Software Foundation, 2023). Este módulo permite a criação de múltiplos processos, cada um com seu próprio interpretador Python, garantindo isolamento e eficiência na execução de tarefas.

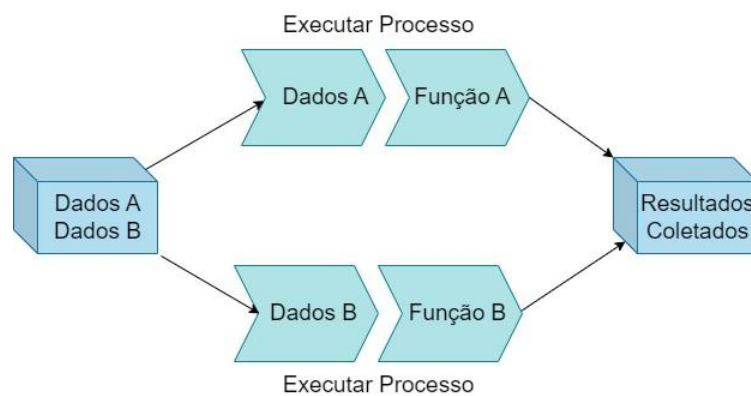
A biblioteca *multiprocessing* do Python oferece duas abordagens principais para implementar o paralelismo baseado em processos:

- Usando a classe *Process*,
- Usando a classe *Pool*.

4.3.1 Classe *Process* (*Process Class*)

Quando há um conjunto de tarefas heterogêneas a serem executadas em paralelo, utiliza-se a classe *Process*. Esta abordagem é usada para paralelismo baseado em funções diferentes, onde cada função executa uma tarefa específica. Cada processo precisa ser criado explicitamente, o que significa que sua gestão é feita pelo usuário ou pelo programa.

Figura 4.3 - Exemplo de funcionamento da classe *Process*.



Fonte: Autor (2024).

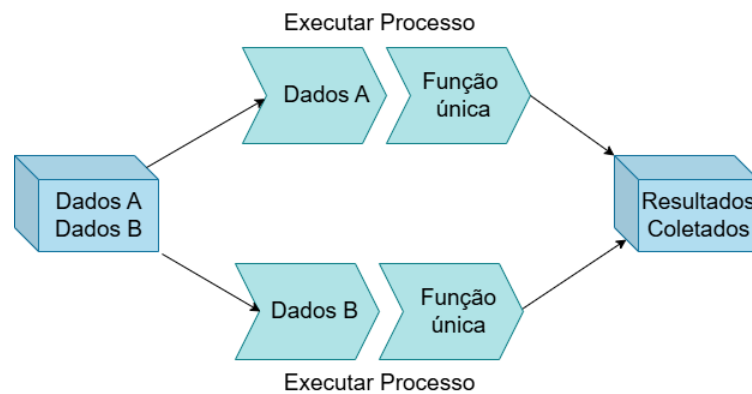
4.3.2 Classe *Pool* (*Pool Class*)

Um *Pool* de processos é um padrão de programação utilizado para gerenciar automaticamente um conjunto de processos de trabalho. A classe *Pool* distribui as tarefas para os processadores disponíveis utilizando um método de organização *FIFO* (*First In, First Out*).

Quando há um conjunto de tarefas homogêneas para uma mesma função a serem executadas em paralelo, a classe *Pool* é ideal. Ela é usada para paralelismo baseado em dados, onde a mesma função é executada em vários valores de entrada, com cada valor de entrada sendo atribuído a um processo.

A classe *Pool* mapeia diferentes processadores para diferentes entradas, coleta a saída de todos os processadores e fornece um resultado combinado.

Figura 4.4 - Exemplo de funcionamento da classe *Pool*.



Fonte: Autor (2024).

4.4 Ciclo de vida de um processo usando a Classe *Pool*

Para compreender as diferentes maneiras de implementar multiprocessamento utilizando a classe *Pool*, é essencial primeiro entender o ciclo de vida de um processo de *Pool* ao longo de sua execução.

Figura 4.5 - Ilustração de um ciclo de vida de um Processo *Pool*.



Fonte: Autor (2024).

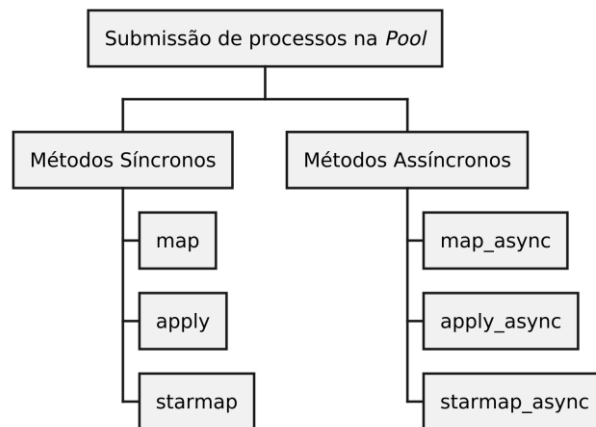
a) Passo 1: Criar uma Instância de *Pool*

Para criar um *Pool* de múltiplos processos, é necessário instanciar a classe *multiprocessing.Pool*. Essa instância pode ser configurada especificando argumentos no construtor da classe *Pool*.

b) Passo 2: Submeter um Processo ao *Pool*

Uma vez que uma instância de *Pool* é inicializada, as tarefas podem ser submetidas ao *Pool* utilizando duas abordagens: realizar tarefas de forma síncrona ou de forma assíncrona, com ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Tipos de submissão de processos usando a classe *Pool*.



Fonte: Autor (2024).

Desta forma, quando as tarefas são emitidas de forma síncrona, o chamador é bloqueado até que todas as tarefas sejam executadas ou terminadas. Os métodos para emitir tarefas de forma síncrona são: *map*, *apply* e *starmap*.

Contudo, quando as tarefas são emitidas de forma assíncrona, o chamador não é bloqueado até que todas as tarefas sejam executadas ou terminadas. Isso permite que o chamador continue com outras atividades enquanto as tarefas são executadas. Nesses casos, o chamador retorna imediatamente e fornece um mecanismo para obter os resultados após a conclusão de todas as tarefas. Os métodos para emitir tarefas de forma assíncrona são: *map_async*, *apply_async* e *starmap_async*.

A Tabela 4.1 abaixo resume os diferentes métodos para submeter uma tarefa a um pool de multiprocessamento. Ela também destaca as principais características de cada função.

Tabela 4.1 - Comparação entre os diferentes métodos de processos.

Função	Bloqueio	Concorrência	Multi-argumentos	Resultados Ordenados
map	Sim	Sim	não	sim
map_async	Não	Sim	Não	Sim
apply	Sim	Não	Sim	não
apply_async	Não	Sim	Sim	Não
starmap	Sim	Sim	Sim	Sim
Starmap_async	Não	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autor (2024).

c) Passo 3: Esperar

Após submeter tarefas de forma assíncrona, pode ser preciso esperar pelos resultados. O método *Result.get()* é utilizado para recuperar os resultados das tarefas assíncronas. Este método bloqueia o chamador até que o resultado esteja disponível.

d) Passo 4: Encerrar

Após todas as tarefas terem sido submetidas ao *Pool*, é importante fechar o *Pool* para liberar os recursos. O método *close()* impede que novas tarefas sejam submetidas ao *Pool*, mas permite que as tarefas já em andamento sejam concluídas.

Ao seguir esses passos, pode-se efetivamente gerenciar o ciclo de vida de um processo de multiprocessamento utilizando a classe *Pool*, garantindo a execução eficiente e ordenada das tarefas.

Compreender e aplicar corretamente o ciclo de vida dos processos em multiprocessamento não só otimiza a utilização de recursos computacionais, mas também maximiza a eficiência e a produtividade das aplicações paralelas.

4.5 Linguagem de Programação Utilizada

A linguagem de programação Python foi escolhida para implementar os algoritmos Meta-Heurísticos e estabelecer a integração com os *softwares* de elementos finitos (FEMM e

Ansys). Diversas bibliotecas foram utilizadas, como *Numpy* para cálculos matemáticos, *Multiprocessing* para processamento paralelo, *Matplotlib* para plotagem de gráficos, *pyFEMM* para conexão com o *software* FEMM, e *pywin32* para conexão com o Ansys Maxwell por meio da tecnologia COM (*Component Object Model*). Essas abordagens proporcionaram uma plataforma flexível e eficiente para a montagem e execução dos modelos propostos.

4.6 Aspectos Computacionais

4.6.1 Softwares utilizados

No desenvolvimento deste trabalho, foram empregados dois *softwares* para realizar as simulações e implementar os algoritmos. Destacamos:

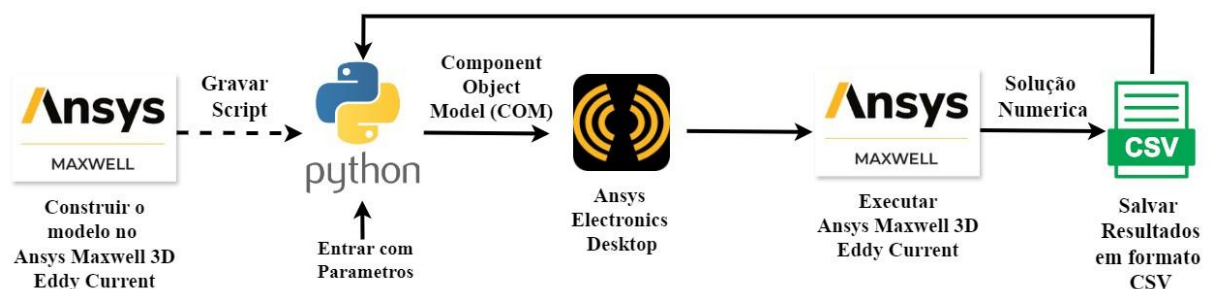
a) Ansys Maxwell

O Ansys Maxwell é um *software* proprietário amplamente utilizado para simulação eletromagnética. Neste trabalho, ele foi empregado por meio da licença concedida pelo programa ROTA 2030 - VOLTUBUS – Sistema de Transporte Público com Veículos Elétricos – Inteligência Artificial no Gerenciamento e Controle da Energia Elétrica, no qual o autor esteve diretamente envolvido.

A utilização do Ansys Maxwell foi essencial para a simulação tridimensional do reator de núcleo de ar, desempenhando um papel fundamental na análise e modelagem do dispositivo. Esse *software* permitiu realizar comparações detalhadas entre os valores medidos em laboratório e os resultados obtidos através de simulações em coordenadas axissimétricas.

No modelo tridimensional foi realizada a implementação do esquemático da Figura 4.7.

Figura 4.7 - Esquemático da Comunicação Integrada entre os *softwares* utilizados no modelo tridimensional.



Fonte: Autor (2024).

Nessa arquitetura, primeiramente é construído o modelo de reator de núcleo de ar no Ansys Maxwell e o código correspondente é registrado em linguagem Python.

No código de programação, a biblioteca *Pywin32* é empregada para estabelecer a comunicação (COM) com o *software* Ansys Maxwell. Nesse processo, os cálculos dos parâmetros de entrada do reator são realizados e os resultados são armazenados em um formato CSV (*Comma-Separated Values*), um tipo de arquivo de texto simples que organiza dados de maneira tabular, com cada linha representando uma entrada e os valores separados por vírgulas.

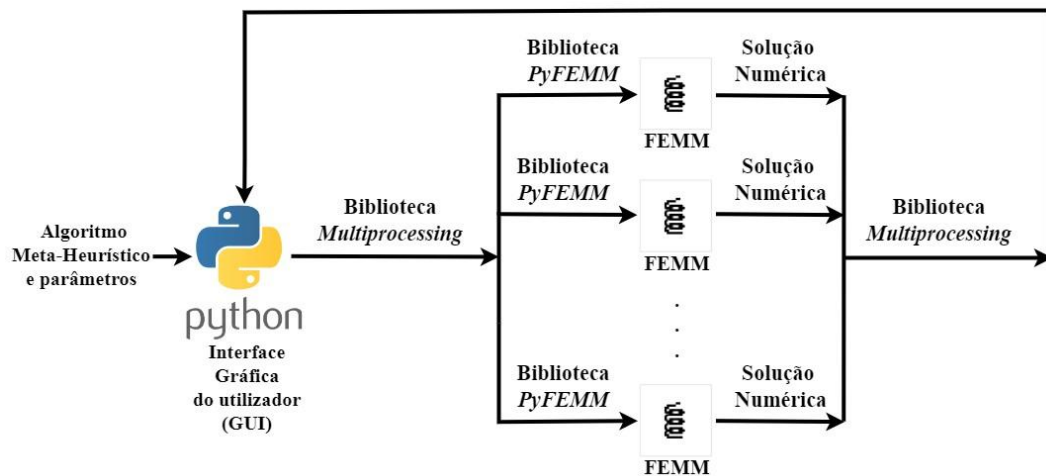
Assim, para que o seja feita a simulação numérica do reator de estudo, é emitido o comando para que o *software* Ansys Maxwell leia os valores dos parâmetros e crie o reator com formato específico. Após o processamento, o arquivo contendo informações sobre os parâmetros desejados é salvo em um arquivo CSV. Este arquivo é então lido e retorna para o processamento na linguagem Python.

b) *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*

O FEMM é um *software* FOSS (*Free and Open-Source Software*). Ele é um programa gratuito e de código aberto para análise eletromagnética baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo amplamente utilizado para simulações bidimensionais (2D) e axissimétricas de campos magnéticos, elétricos e térmicos.

Neste trabalho, foi empregado para realizar simulações bidimensionais utilizando coordenadas cilíndricas axissimétricas para reator de núcleo de ar, o FEMM proporcionou uma abordagem robusta na análise do comportamento do reator. A comunicação entre o python e o *software* FEMM foi feita através da biblioteca *pyFEMM* (PYTHON Software Foundation, 2024), conforme ilustrada na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Estrutura de comunicação entre a linguagem Python e o *software* FEMM.



Fonte: Autor (2024).

Neste modelo, os parâmetros desejados são incorporados no código em Python, o qual realiza cálculos e define as variáveis de entrada para a construção dos reatores. Utilizando a biblioteca *Multiprocessing*, múltiplos reatores são criados em processamento paralelo no *software* FEMM. Assim o *software* de Elementos Finitos executa os cálculos e fornece os valores das indutâncias, fatores de qualidade e densidades de corrente de cada simulação, os quais são então processados novamente no Python. Esse procedimento é repetido várias vezes até que o critério de parada seja satisfeito.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordados os conceitos de processamento paralelo, distinguindo entre Múltiplas *Threads* e Multiprocessamento. Foi demonstrada a diferença entre a classe *Process* e a classe *Pool*, assim como o ciclo de vida de um Processo *Pool* e seus tipos de processos síncronos e assíncronos.

Também foram apresentadas a linguagem utilizada, Python, e os *softwares* Ansys Maxwell e FEMM, bem como sua integração com o Python.

No próximo capítulo, serão abordados os resultados obtidos das simulações do modelo de otimização de um reator de núcleo de ar monofásico e da otimização de um reator trifásico do tipo EI.

5 ESTUDOS DE CASO

5.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior, foi realizada uma abordagem sobre processamento paralelo implementado na linguagem python. Nesse capítulo serão apresentados os estudos de caso de otimização de cada dos dispositivos estudados, incluindo a formulação do problema, restrições, função objetivo, critérios e parâmetros de otimização.

Além disso, será detalhado o modelo de otimização do reator de núcleo de ar monofásico usando Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e o modelo de otimização do reator trifásico de núcleo EI usando Algoritmos Genéticos (GA).

5.2 Estudo de caso 1 – Reator de núcleo de Ar tipo seco monofásico

Os reatores de núcleo de ar do tipo seco são dispositivos amplamente utilizados em sistemas de média e alta tensão para diversas aplicações, como limitação de corrente de falta, controle de fluxo de carga, compensação reativa (reatores shunt) e como parte indutiva de filtros harmônicos sintonizados (CAVERLY et al., 2017).

Os Reatores de Núcleo de Ar (ACR) superam outros tipos de reatores em várias áreas, incluindo eficiência, perda de energia reduzida, vida útil prolongada, resistência à corrosão e economia de custos.

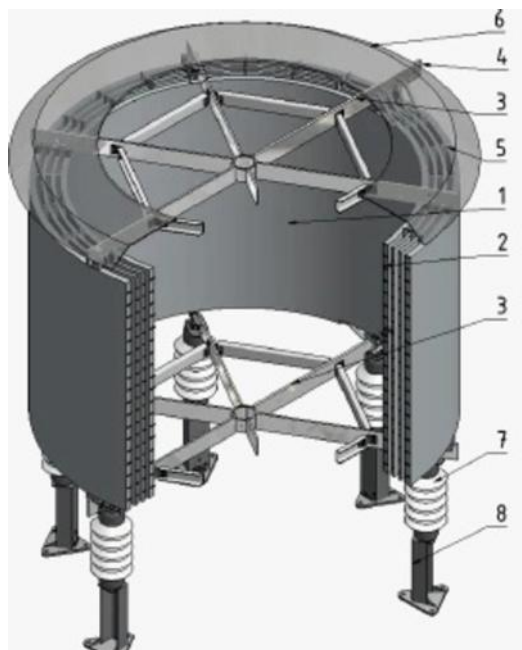
Figura 5.1 - Reator de núcleo de ar monofásico.



Fonte: Autor (2024).

Uma vantagem dos reatores de núcleo de ar seco em relação aos reatores tradicionais imersos em líquido é a menor capacitância, o que resulta em menores sobretensões transitórias durante a comutação (PAPP et al., 2014). Na Figura 5.2 está ilustrado um reator de núcleo de ar e todos os seus principais componentes.

Figura 5.2 - Reator de núcleo de ar do tipo seco.



Fonte: (PAPP et al., 2014).

Esses reatores são compostos basicamente por um núcleo de ar (1) com um enrolamento (2) ao redor, que pode consistir em um ou mais condutores concêntricos, geralmente feitos de alumínio devido ao seu menor custo em relação ao cobre, além de seu baixo peso específico, resultando em um menor custo de investimento do enrolamento para um nível comparável de perdas (PAPP et al., 2014).

Esses condutores possuem conexões inferiores e superiores chamadas de cruzetas ou aranhas (3) que são conectados eletricamente por terminais (4) aos condutores.

Em alguns tipos de reatores trifásicos, os enrolamentos cilíndricos concêntricos individuais são separados por espaçadores (5) feitos de poliéster ou de fibra de vidro, que formam dutos de ar necessários para o resfriamento do enrolamento (PAPP et al., 2014).

Em alguns casos, esses reatores indutivos possuem um teto protetor (6) para aumentar a proteção do equipamento em relação às intempéries.

A montagem do reator é feita em cima de isoladores (7) e pedestais (8) que são escolhidos de acordo com o sistema de montagem no local de instalação.

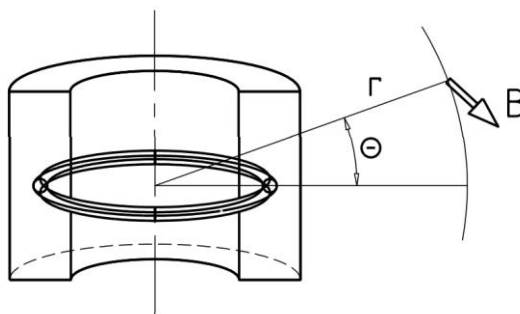
5.2.1 Análise do reator núcleo de ar do tipo seco monofásico utilizando o método de elementos finitos (MEF)

O MEF possibilita cálculos mais precisos, além de fenômenos cujos efeitos são calculados e que são impossíveis de serem visualizados nos cálculos analíticos tradicionais, isto porque o MEF é calculado baseado no mapeamento dos potenciais magnéticos ao longo do espaço do domínio em duas ou três dimensões.

A técnica de MEF é dividida em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Para realizar a análise do reator de núcleo de ar utilizando o método de elementos finitos, será utilizado as coordenadas cilíndricas axissimétricas para representação 2D e coordenadas cartesianas para representação no formato 3D. O modelo de coordenadas axissimétricas é um modo de representar um desenho tridimensional através de um plano que é simétrico a um eixo vertical (HU; PALAZZOLO, 2019), de modo que esse plano represente todos os planos rotacionados simetricamente ao redor do eixo central, economizando recursos computacionais sem sacrificar a precisão, um exemplo desse modelo está mostrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Representação de um condutor em uma coordenada axissimétrica cilíndrica.



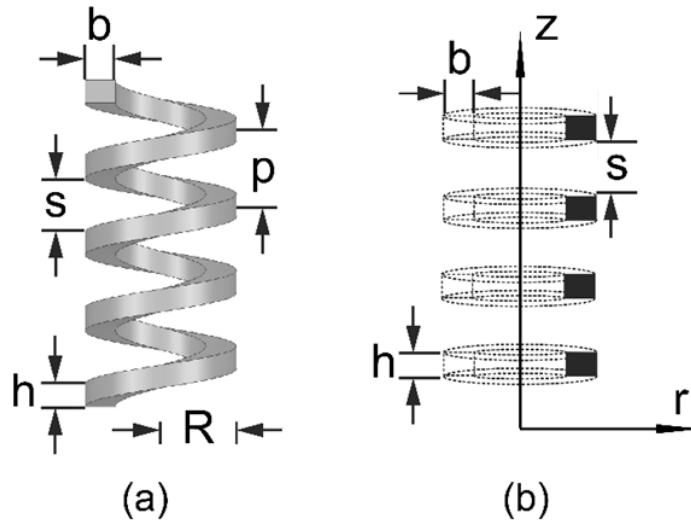
Fonte: Reproduzido de (PAPP et al., 2014).

5.2.2 Formulação do Problema

Nesse modelo, quatro variáveis independentes serão a entrada do processo de otimização. As variáveis são a altura (h) e a base (b) da seção transversal do condutor, o raio médio de cada bobina (R) e a quantidade de condutores (N). Enquanto o Volume (V_{femm}), a densidade de Corrente (J_{femm}) e o Fator de Qualidade (Q_{femm}) serão as variáveis de saída do *software* de MEF. Dentre essas variáveis de projeto, a base, altura, raio médio são considerados

variáveis contínuas, enquanto a quantidade de condutores é considerada como um valor discreto. Para facilitar a visualização, essas variáveis estão representadas na Figura 5.4.

Figura 5.4 - (a) Esquema das Dimensões do Reator de Núcleo de Ar e (b) Representação do reator em um sistema de coordenadas axissimétricas.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 5.4, a variável p representa a distância entre os centros dos condutores, enquanto s indica a distância entre os próprios condutores. Os componentes essenciais da otimização de projeto serão discutidos a seguir, abrangendo parâmetros, restrições, limites e a função objetivo.

5.2.3 Limites das Variáveis de Projeto

Para que nosso modelo atinja os parâmetros desejados, é crucial aplicar certas restrições de projeto, garantindo que as variáveis de entrada (h , b , R e N) estejam dentro de um intervalo com valores máximos e mínimos. Os limites das variáveis de projeto são dados pelas seguintes inequações:

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (5.1)$$

$$b_{min} \leq b \leq b_{max} \quad (5.2)$$

$$R_{min} \leq R \leq R_{max} \quad (5.3)$$

$$N_{min} \leq N \leq N_{max} \quad (5.4)$$

Aqui, os rótulos " max " e " min " indicam os valores superiores e inferiores de cada variável, respectivamente. Estas inequações estabelecem os limites permissíveis para as

variáveis de design do nosso projeto, garantindo que permaneçam dentro de margens de valores aceitáveis.

5.2.4 Restrições de igualdade

Para que nosso modelo atinja os parâmetros desejados, é crucial aplicar certas restrições de projeto. Essas restrições podem ser divididas em duas categorias principais: restrições de igualdade e restrições de desigualdade.

- **Restrição de indutância**

Nesse modelo, busca-se igualar indutância calculada pelo MEF (L_{femm}) à indutância desejada do reator (L_0). Esta comparação é expressa pela equação:

$$L_{femm} = L_0 \quad (5.5)$$

Onde L_{femm} é a indutância calculada pelo *software* FEMM e L_0 é o valor de referência desejado para o dispositivo eletromagnético.

Essa igualdade serve para garantir que a indutância calculada pelo *software* FEMM está de acordo com os valores esperados ou conhecidos.

Para garantir que a Equação (5.5) seja cumprida, empregamos a técnica de penalização (DEB, 2017) da Equação (5.6). Isso permite que o algoritmo otimize os parâmetros conforme necessário.

$$P_L = \left((L_{femm} - L_0) w_L \right)^2 \quad (5.6)$$

Aqui, P_L representa a penalização da indutância e w_L é uma constante de peso que ajusta a importância da indutância na otimização. Um aspecto importante na aplicação da Equação (5.6) é a escolha de w_L , pois isso garante um equilíbrio adequado na ponderação da indutância na equação de penalização.

5.2.5 Restrições de desigualdade

Neste modelo, consideramos duas restrições de desigualdade: a densidade de corrente e o fator de qualidade.

- **Restrição de densidade de corrente**

É essencial manter a densidade de corrente do condutor (J_{femm}) abaixo de um valor máximo (J_{max}). Uma vez que essa variável define a corrente máxima que o condutor pode suportar sem se danificar ou operar com falha. A restrição é definida pela Equação (5.7).

$$J_{femm} \leq J_{max} \quad (5.7)$$

A fim de se determinar a densidade de corrente J_{femm} nas simulações realizadas com o *software* FEMM, utiliza-se a seguinte expressão:

$$J_{femm} = \frac{I_0}{hb} \quad (5.8)$$

Onde J_{femm} é a densidade de corrente calculada pelo *software* FEMM, I_0 é a corrente de referência ou corrente inicial, h é a altura do condutor e b é a base do condutor.

Para garantir que a densidade de corrente não exceda os limites desejados, aplicamos uma penalização, conforme demonstrado na Equação (5.9).

$$P_J = \max(0, (J_{femm} - J_{max}))^2 \quad (5.9)$$

Aqui, P_J representa a penalidade na densidade de corrente. Esta penalização garante que a densidade de corrente permaneça dentro dos limites estabelecidos, contribuindo para a integridade do sistema.

- **Restrição do Fator de Qualidade**

A restrição do fator de qualidade é um parâmetro importante para a otimização do reator. É desejado alcançar o fator de qualidade (Q_{femm}) superior ao valor mínimo (Q_{min}), pois este parâmetro desempenha um papel fundamental na eficiência do reator. A restrição é expressa na Equação (5.10).

$$Q_{min} \leq Q_{femm} \quad (5.10)$$

Para garantir que nosso sistema atenda a esse requisito, aplicamos uma penalização, conforme ilustrado na Equação (5.11).

$$P_Q = \min(0, Q_{femm} - Q_{min})^2 \quad (5.11)$$

Onde P_Q representa a penalização no fator de qualidade, Q_{femm} é o fator de qualidade do reator e Q_{min} é o fator de qualidade mínimo exigido para o projeto. Esta penalização assegura que o fator de qualidade permaneça dentro dos limites especificados, contribuindo para a eficácia do sistema.

O valor de Q_{femm} é calculado pela Equação (5.12), onde R_{femm} representa a resistência do condutor obtida pelo método de elementos finitos e X_{femm} é a reatância indutiva do reator obtida pelo mesmo método.

$$Q_{femm} = \frac{X_{femm}}{R_{femm}} \quad (5.12)$$

5.2.6 Função Objetivo

As restrições mencionadas facilitam a busca de uma solução dentro de parâmetros específicos. No modelo estudado, o objetivo é minimizar o volume do reator, sujeito a restrições como indutância, densidade de corrente e fator de qualidade. A função objetivo ϕ , na Equação (5.13), é composta por duas partes: o volume do dispositivo e penalidades associadas a três critérios. A primeira penalidade garante a indutância desejada, a segunda aborda a máxima densidade de corrente, e a terceira trata de alcançar o mínimo fator de qualidade.

$$\phi = V + r_p(P_L + P_Q + P_I) \quad (5.13)$$

O coeficiente de penalidade r_p controla o impacto das penalidades na função objetivo, permitindo um equilíbrio entre buscar uma solução ótima e atender às restrições (DEB, 2017). Para encontrar o volume V na Equação (5.13), é necessário determinar o comprimento do condutor l (ZHANG, 2017), que é dado pela Equação (5.14):

$$l = N \sqrt{\left(\pi \frac{R}{2}\right)^2 + (p)^2} \quad (5.14)$$

Multiplicando o comprimento l pela área transversal do condutor ($h \times b$) e sabendo que o *pitch* p é a soma ($h + s$), o volume V obtido é:

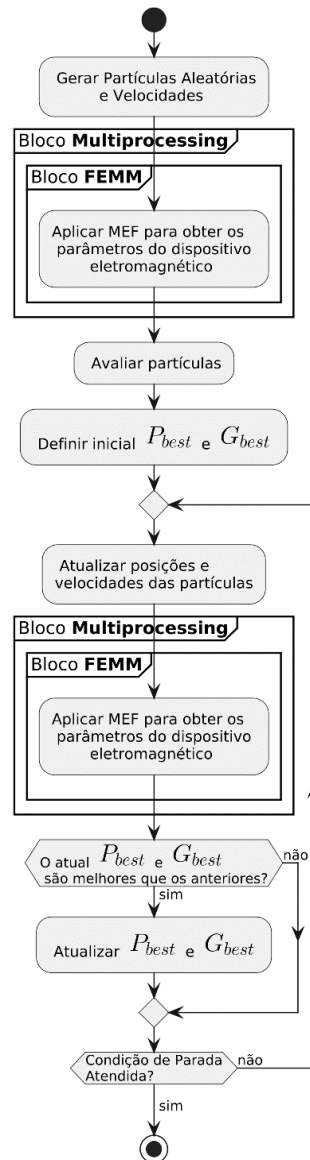
$$V = Nbh\sqrt{(2\pi R)^2 + (h + s)^2} \quad (5.15)$$

Onde V representa o volume de alumínio nos condutores, h e b representam a base e a altura da área transversal dos condutores do reator, respectivamente, R representa o raio do reator, N representa o número de espiras no reator, e s representa o espaçamento entre os condutores.

5.2.7 Modelo de otimização com PSO

O desenvolvimento do fluxograma apresentado na Figura 5.5 utiliza o algoritmo PSO aplicado ao *software* FEMM.

Figura 5.5 - Fluxograma do modelo de otimização proposto.



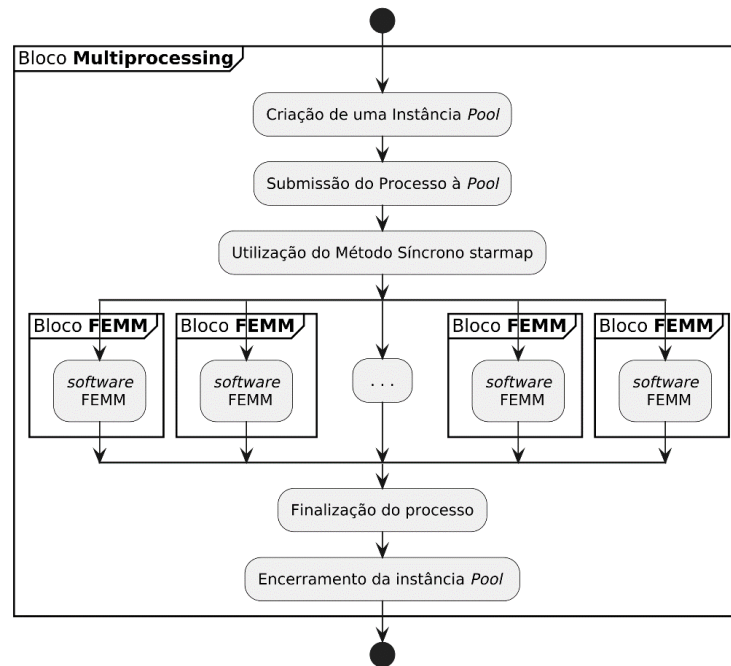
Fonte: Autor (2024).

A primeira etapa no fluxograma do código fornecido é a geração aleatória de partículas e suas velocidades. Em seguida, no bloco FEMM, o MEF é aplicado para obter os parâmetros do dispositivo eletromagnético. As partículas são avaliadas com base na Equação (5.13). Inicialmente, P_{best} e G_{best} são definidos.

O processo iterativo começa com a atualização das posições e velocidades das partículas usando as Equações (3.4) e (3.5). No bloco de *Multiprocessing*, o processamento paralelo do MEF é novamente aplicado para obter os parâmetros que serão avaliados na função objetivo.

Se os valores atuais de P_{best} e G_{best} forem melhores que os anteriores, eles são atualizados. Caso contrário, permanecem os mesmos. As iterações continuam até que a condição de parada seja atendida, momento em que o processo é finalizado. O número de gerações é o critério de parada escolhido para a otimização do reator de núcleo de ar monofásico. A Figura 5.6 detalha o bloco de multiprocessing onde o processamento paralelo é utilizado.

Figura 5.6 - Estrutura e componentes do bloco Multiprocessing.



Fonte: Autor (2024).

No bloco de Multiprocessing, primeiro é criada uma instância *Pool*, que é responsável por gerenciar a comunicação com os processadores. Em seguida, um processo é submetido à *Pool*, podendo seguir o método assíncrono ou síncrono. Nesse trabalho, os processos devem ser síncronos, pois os vetores das partículas de entrada precisam manter a ordem dos vetores de saída, os quais serão utilizados na avaliação da função objetivo.

Além disso, o método síncrono deve suportar múltiplas variáveis de entrada e saída, já que o sistema trabalha com quatro variáveis de entrada no bloco FEMM (h , b , R , N), além de

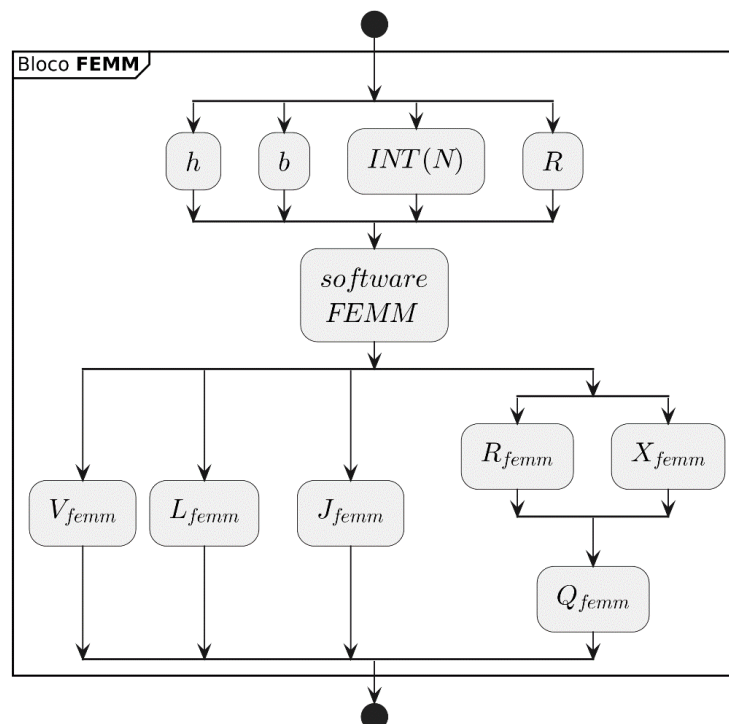
outros parâmetros numéricos de saída do *software* FEMM. Observando as comparações da Tabela 4.1, podemos identificar que o método que atende a esses requisitos é o método *starmap*.

Assim após criada a *Pool*, os processos são submetidos utilizando o método *starmap*, permitindo que várias análises no *software* FEMM sejam geradas em paralelo. Os valores resultantes dessas análises são armazenados em uma matriz bidimensional, onde cada linha representa uma partícula diferente e as colunas representam os valores dos parâmetros construtivos de suas respectivas partículas.

Esse processo é realizado até que todas as partículas do processo de otimização sejam avaliadas. Após a finalização, todos os valores retornam obedecendo a mesma ordem de entrada e a *Pool* é finalizada.

A Figura 5.7 detalha o bloco FEMM, onde o MEF é aplicado através do *software* FEMM.

Figura 5.7 - Estrutura e componentes do bloco FEMM do reator de núcleo de ar monofásico.



Fonte: (2024).

No bloco FEMM, inicialmente são inseridas as variáveis de design do reator de núcleo de ar, que são h , b , N e R . A variável N precisa ser convertida em número inteiro, pois o número de condutores no FEMM precisa ser discreto. Essas variáveis são inseridas como

parâmetros construtivos no *software* FEMM, onde os reatores são simulados. Os valores de saída obtidos são V_{femm} , L_{femm} , J_{femm} e Q_{femm}

Esses valores, são então encaminhados para o bloco *Multiprocessing*, onde são ordenados e retornam sequenciados para serem avaliados pela função objetivo.

5.2.8 Parâmetros e Critérios de Otimização

Para definir os limites das restrições e alcançar uma solução mais próxima da desejada no método de otimização, os valores limites são fornecidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Restrições dos parâmetros de construção.

Parâmetros	Valor Mínimo	Valor Máximo
h	1 cm	4 cm
b	1 cm	4 cm
R	5 cm	50 cm
N	1 espira	100 espiras
Espaçamento	5 mm	

Fonte: Autor (2024).

Para esta simulação, os seguintes valores de parâmetros foram adotados conforme especificado na Tabela 5.2, sendo obtidos empiricamente por meio de observações realizadas durante os testes preliminares do algoritmo PSO.

Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados no PSO.

Parâmetros	Valor
Número de Partículas	250
Gerações	100
Peso de Inércia (w)	0,4
Peso Cognitivo (c_1)	1,5
Peso Social (c_2)	1,5
Peso de Indutância (W_L)	10^6
Coefficiente de Penalidade (r_p)	100

Fonte: Autor (2024).

Com o uso desses parâmetros, busca-se obter os valores correspondentes de indutância, fator de qualidade e densidade de corrente, conforme indicado na Tabela 5.3. Os materiais utilizados para esta simulação foram o ar e alumínio que são encontrados na biblioteca do *software* FEMM.

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados pelo modelo.

Parâmetros	Valor
Indutância desejada (L_0)	100 μH
Fator de qualidade mínimo (Q_{min})	20
Densidade de corrente máxima (J_{max})	2 A/mm ²
Frequência (f)	60 Hz

Fonte: Autor (2024).

Os parâmetros de construção correspondem às restrições físicas que delimitam a modelagem do dispositivo no *software* baseado no Método dos Elementos Finitos, representando os limites estruturais e geométricos do sistema. Os parâmetros utilizados no PSO referem-se às variáveis internas utilizadas no processo de otimização. Já os parâmetros do modelo dizem respeito às variáveis de saída que se deseja obter como resultado da simulação, sendo os alvos a serem otimizados no processo.

5.3 Estudo de Caso 2 – Reator Trifásicos do tipo EI

Este estudo propõe uma abordagem para otimizar o volume de reatores trifásicos tipo EI, utilizando o MEF em duas dimensões e o algoritmo genético. O objetivo é minimizar o volume desses reatores, mantendo suas características e desempenho elétrico. O MEF é empregado para realizar cálculos precisos das propriedades eletromagnéticas do reator, enquanto o algoritmo genético é usado para explorar de forma eficiente o espaço de soluções em busca do ótimo global. Esta abordagem combina a precisão do MEF com a capacidade do algoritmo genético de lidar com problemas complexos de otimização, proporcionando uma estratégia robusta para a otimização do volume de reatores trifásicos tipo EI.

5.3.1 Introdução

Um reator trifásico é um dispositivo utilizado para armazenar energia eletromagnética e não possui partes cinéticas. Esses dispositivos são principalmente usados em filtros

harmônicos, inversores de frequência, equipamentos de compensação reativa e em painéis de controle de máquinas e equipamentos.

O reator tipo EI é essencialmente composto por um núcleo de ferro separado em duas partes em formatos “E” e “I” rodeado por ar e uma bobina, que pode ser composta por um conjunto de N condutores concêntricos. Normalmente, esses condutores são feitos de cobre, devido à sua alta condutividade elétrica e resistência à corrosão. Isso resulta em um menor investimento na bobina para um nível comparável de perdas.

Normalmente, os indutores são volumosos e são projetados para suprimir harmônicos e reduzir a ondulação de corrente no sistema de conversão de energia. Portanto, um bom projeto pode não apenas reduzir o tamanho, mas também melhorar o desempenho do sistema (KAZIMIERCZUK, 2009). Desta forma a otimização do volume de um reator trifásico com núcleo magnético tipo EI é uma área de pesquisa importante, pois permite a modelagem precisa do reator e a otimização eficiente de seu volume, levando a um design mais eficiente e econômico. Na Figura 5.8 é apresentado um reator trifásico do tipo EI.

Figura 5.8 - Reator trifásico do tipo EI.



Fonte: Autor (2024).

5.3.2 Formulação do Problema

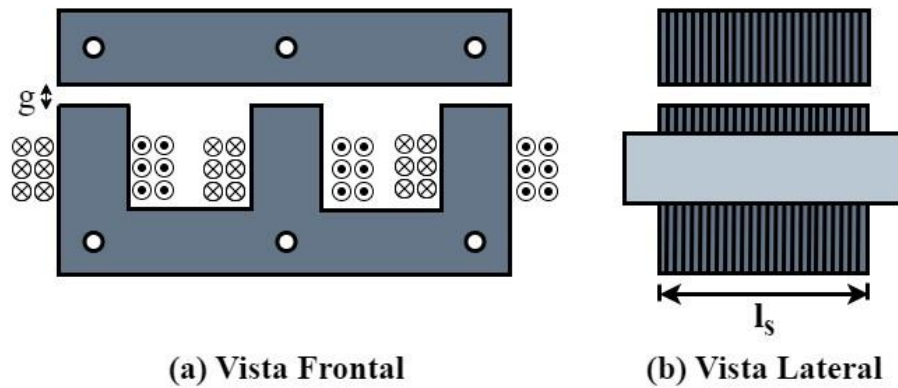
Neste modelo, cinco variáveis são usadas como entrada para o processo de otimização do reator trifásico tipo EI. Essas variáveis incluem o modelo de lâmina escolhido (id), o entreferro (g), o número de voltas na perna lateral (N_l), o número de voltas na perna central

(N_c) e o número de lâminas de aço silício (nL). As variáveis de saída do *software* de MEF incluem o volume do reator trifásico tipo EI (V_{femm}), bem como várias características elétricas, como a indutância das bobinas nas fases primária, secundária e terciária (L_{Afemm} , L_{Bfemm} e L_{Cfemm}), a densidade do fluxo magnético nas fases primária, secundária e terciária (B_{Afemm} , B_{Bfemm} e B_{Cfemm}), e o fator de preenchimento da janela (ku_{femm}). Dentre essas variáveis de projeto, o número de voltas e o número de lâminas de aço silício são tratados como valores discretos, enquanto os outros são considerados valores contínuos.

5.3.3 Geometria do Reator Trifásico de Núcleo EI

Este tipo de reator é composto por um núcleo e três enrolamentos. O núcleo é formado pelo empilhamento de dois tipos de lâminas: as lâminas inferiores, onde os enrolamentos são colocados, têm formato de “E”, enquanto as lâminas superiores têm formato de “I” e existe um espaçamento entre essas duas lâminas. A Figura 5.9 apresenta a configuração comum de um reator trifásico de núcleo EI.

Figura 5.9 - Geometria do reator trifásico de núcleo EI. (a) vista frontal (b) vista lateral.



Fonte: Autor (2024).

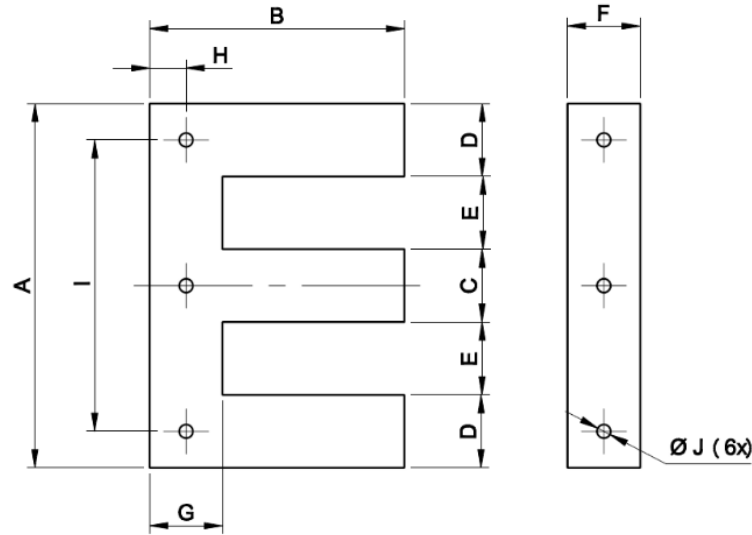
Onde g é o comprimento do entreferro e l_s é a largura lateral do reator que é calculada usando a Equação (5.16).

$$l_s = \frac{nL \cdot esp}{f_{em}} \quad (5.16)$$

Onde esp é a espessura da lâmina e f_{em} é o fator de empilhamento das lâminas.

Geralmente, essas lâminas são produzidas em tamanhos padronizados pela indústria para facilitar sua escolha e fabricação. Neste trabalho, serão utilizadas lâminas da empresa brasileira Tessin (TESSIN, 2024), cujas dimensões são apresentadas na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Especificações da geometria das lâminas da empresa brasileira Tessin.



Fonte: (TESSIN, 2024).

Onde A é o comprimento da base da lâmina E (mm), B é o comprimento da altura da lâmina E (mm), C é o comprimento da largura da perna central lâmina E (mm), E é o comprimento da largura de cada janela que compõe a lâmina E (mm), F é o comprimento da altura da lâmina I (mm), G é o comprimento da distância da base até a janela da lâmina E (mm), H é comprimento da distância da base até o centro do furo da lâmina E (mm), I é o comprimento da distância entre os furos laterais da lâmina E (mm) e ϕJ é o diâmetro dos furos nas lâminas E e I (mm).

Os componentes essenciais da otimização do projeto serão discutidos a seguir, abrangendo os parâmetros, restrições, limites e a função objetivo.

5.3.4 Limites das Variáveis de Projeto

As variáveis de projeto neste estudo são limitadas pelas seguintes desigualdades:

$$g_{min} \leq g \leq g_{max} \quad (5.17)$$

$$l_{cmin} \leq l_c \leq l_{cmax} \quad (5.18)$$

$$N_{min} \leq N \leq N_{max} \quad (5.19)$$

$$N_{bmin} \leq N_b \leq N_{bmax} \quad (5.20)$$

Os rótulos "*max*" e "*min*" indicam os limites superior e inferior, respectivamente, para cada variável de projeto.

Este estudo emprega penalidades para garantir que as características do reator cumpram os requisitos estabelecidos. Essas penalidades são essenciais para aproximar as características do reator dos valores desejados durante o processo de otimização.

5.3.5 Penalidade de Indutância

A penalidade para indutância, denotada por $P_{L_{femm}}$, é calculada pela Equação (5.21):

$$P_{L_{femm}} = \left| L_{A_{femm}}^{norm} - 1 \right| + \left| L_{B_{femm}}^{norm} - 1 \right| + \left| L_{C_{femm}}^{norm} - 1 \right| \quad (5.21)$$

Onde $L_{A_{femm}}^{norm}$, $L_{B_{femm}}^{norm}$, and $L_{C_{femm}}^{norm}$ são as indutâncias normalizadas obtidas pelo MEF das bobinas primária, secundária e terciária, respectivamente.

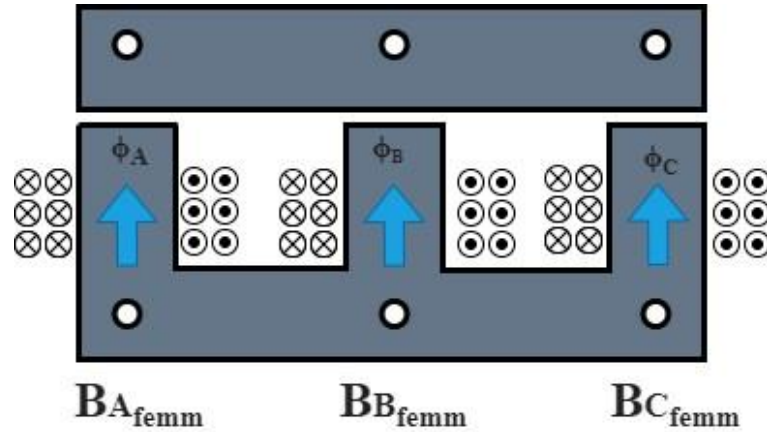
5.3.6 Penalidade de Densidade de Fluxo Magnético

Para aplicar a restrição de densidade de fluxo magnético, é necessário determinar o valor máximo ($B_{max_{femm}}$) analisando as três bobinas (KAZIMIERCZUK, 2009):

$$B_{max_{femm}} = \max (|B_{A_{femm}}|, |B_{B_{femm}}|, |B_{C_{femm}}|) \quad (5.22)$$

Onde $B_{A_{femm}}$, $B_{B_{femm}}$ e $B_{C_{femm}}$ são os módulos das densidades de fluxo magnético normalizadas obtidas pelo FEM das bobinas primária, secundária e terciária, respectivamente na Figura 5.11.

Figura 5.11 - Densidades de fluxo magnético no núcleo do reator trifásico do tipo EI.



Fonte: Autor (2024).

Desta forma, a penalidade máxima de densidade de fluxo magnético, denotada por $P_{B_{femm}}$, é calculada pela Equação (5.23):

$$P_{B_{femm}} = \max(0, B_{max_{femm}}^{norm} - 1) \quad (5.23)$$

Onde $B_{max_{femm}}^{norm}$ é a densidade de fluxo magnético máxima normalizada obtida pelo *software* FEMM. As densidades de fluxo magnético estão representadas na Figura 5.11.

5.3.7 Penalidade do Fator de Preenchimento da Janela

Para aplicar essa penalidade, é necessário calcular o fator de preenchimento da janela do reator trifásico analisado no MEF (Ku_{femm}), que é dado pela Equação (5.24) (YANG; WANG, 2017):

$$ku_{femm} = \frac{(N_l + N_c)A_w}{W_A} \quad (5.24)$$

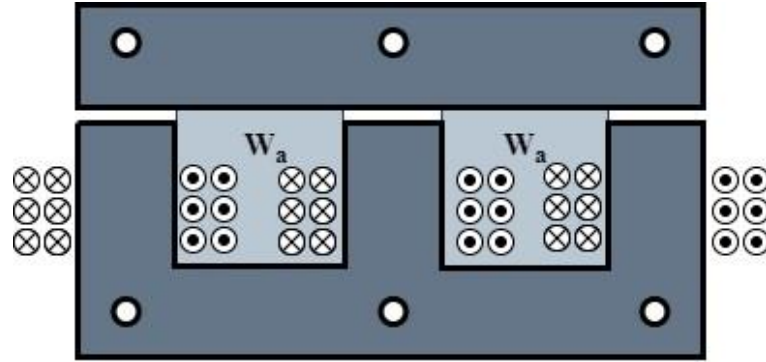
Onde A_w significa a área da seção transversal do fio, e W_A representa uma das áreas da janela do núcleo em E. O valor de A_w é calculado usando a seguinte equação (YANG; WANG, 2017):

$$A_w = \pi r^2 \quad (5.25)$$

Onde r é o raio do condutor nu utilizado.

A Figura 5.26 ilustra a área da seção transversal da janela (W_a) e os condutores do reator trifásico do tipo EI.

Figura 5.12 - Reator trifásico com a área da seção transversal da janela.



Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, a penalidade máxima do fator de preenchimento da janela, denotada por $P_{ku_{femm}}$, é calculada pela Equação (5.26):

$$P_{ku_{femm}} = \max(0, ku_{femm} - ku_{max}) \quad (5.26)$$

Onde ku_{max} é o fator de preenchimento da janela máximo desejado.

5.3.8 Normalização

Para evitar problemas de convergência da função objetivo foi realizada o processo de normalização que garante uma escala uniforme, estabilidade numérica, facilidade de interpretação, convergência eficiente e redução da sensibilidade a valores extremos durante processos de otimização. A equação para normalização de um valor é dada por (CABELLO-SOLORZANO et al., 2023):

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5.27)$$

Onde x é o valor analisado, x_{min} é o valor mínimo no conjunto de dados e x_{max} é o valor máximo no conjunto de dados.

5.3.9 Função Objetivo

Neste projeto de otimização do volume do reator trifásico tipo EI, será considerada apenas a função objetivo de minimização do volume. No entanto, para alcançar esse objetivo, é necessário considerar um conjunto de restrições definidas anteriormente. Nesse contexto, a função penalidade ϕ é definida como:

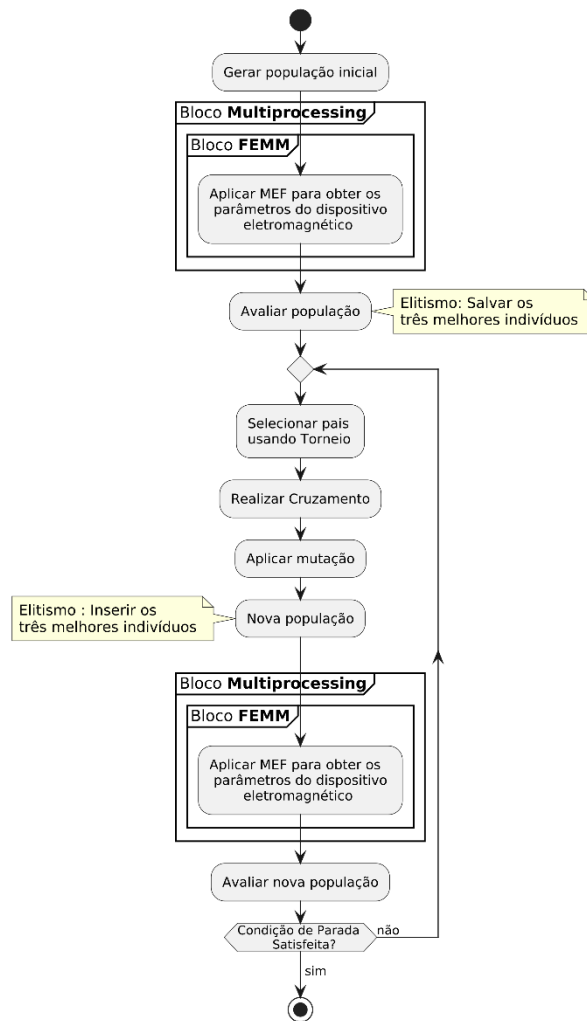
$$\phi = V_{femm}^{norm} + r_p \cdot (P_{Lfemm} + P_{Bfemm} + P_{kufemm}) \quad (5.28)$$

Onde V_{femm}^{norm} é o volume normalizado e r_p é o coeficiente de penalidade que controla o impacto da função de penalidade na função objetivo, permitindo um equilíbrio entre buscar uma solução ótima e satisfazer as restrições.

5.3.10 Modelo de Otimização Proposto

O fluxograma apresentado na Figura 5.13 utiliza o algoritmo dos Algoritmos Genéticos aplicado ao MEF.

Figura 5.13 - Fluxograma do modelo de otimização proposto.



Fonte: Autor (2024).

A primeira etapa no fluxograma do código fornecido é a geração da população inicial. Em seguida, no bloco FEMM, o MEF é aplicado para obter os parâmetros do dispositivo

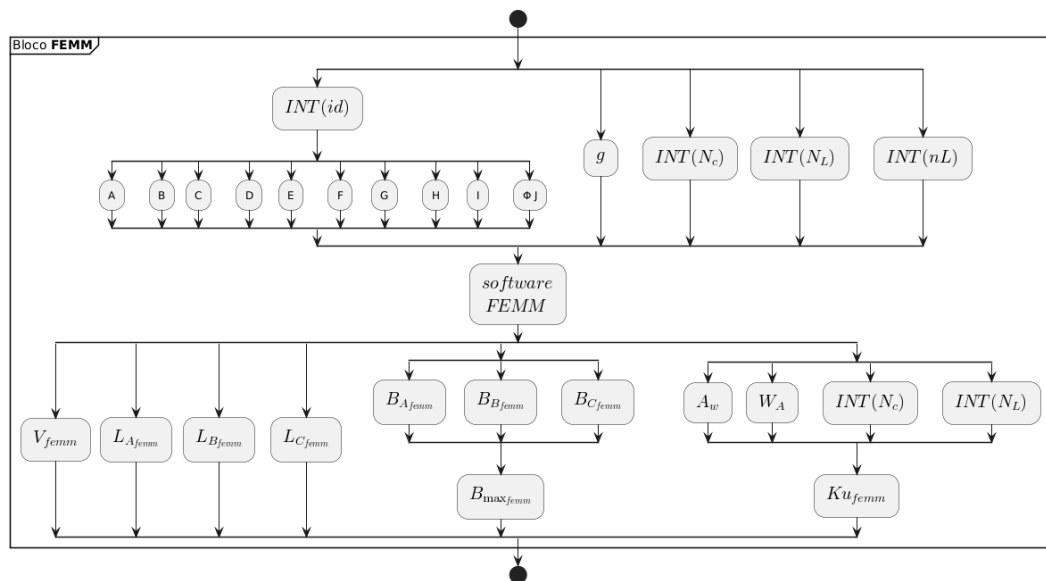
eletromagnético. A população inicial é então avaliada e os três melhores indivíduos são armazenados.

O processo iterativo começa com a seleção dos pais usando o método de torneio. Posteriormente, realiza-se o *crossover* para gerar descendentes, aos quais é aplicada a mutação, resultando em uma nova população. Em seguida, aplica-se o elitismo, substituindo os três melhores valores da geração anterior na nova população. O processamento paralelo do MEF é novamente utilizado para obter os parâmetros do dispositivo eletromagnético.

A nova população é avaliada e as iterações continuam até que a condição de parada seja atendida. Uma vez satisfeita a condição de parada, o processo é finalizado. A Figura 5.6 detalha o bloco de multiprocessamento, explicando como o processamento paralelo é utilizado.

Na Figura 5.14, está ilustrado o bloco FEMM para a otimização do reator trifásico do tipo EI.

Figura 5.14 - Estrutura e componentes do bloco FEMM.



Fonte: Autor (2021).

Os valores gerados de id , N_c , N_L e nL entram no bloco FEMM, sendo transformados em valores inteiros, pois precisam ser discretos enquanto g permanece com o mesmo valor contínuo. O id de entrada é o índice das medidas do núcleo utilizadas como entrada para o MEF, associadas às medidas A , B , C , D , E , F , G , H , I e ϕJ da Figura 5.10. Com essas entradas, aplica-se o MEF ao modelo gerado, obtendo-se os valores do volume do dispositivo (V_{femm}), as indutâncias ($L_{A_{femm}}$, $L_{B_{femm}}$ e $L_{C_{femm}}$), a densidade de fluxo magnético máxima ($B_{max_{femm}}$), e o fator de preenchimento da janela (Ku_{femm}).

5.3.11 Parâmetros e critérios de otimização

Para definir os limites de restrição de entrada para a otimização do reator trifásico tipo EI, os valores dos limites são fornecidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Restrições dos parâmetros de projeto.

Parâmetros	Valores Mínimos	Valores Máximos
Índice das lâminas (id)	0	8
Entreferro (g)	0 mm	2 mm
Número de Voltas na Perna Central (N_C)	300	1200
Número de Voltas na Perna Lateral (N_L)	300	1200
Número de Lâminas (nL)	50	300

Fonte: Autor (2024).

Conforme apresentado na Tabela 5.4, as lâminas são representadas por índices que correspondem às suas respectivas dimensões. Tais dimensões foram obtidas a partir do catálogo do fabricante brasileiro Tessin, estando detalhadas no Anexo A deste trabalho e organizadas na Tabela 5.5. O material utilizado foi o M530-50 A, com lâminas de 0,5 mm de espessura e um fator de empilhamento de 0,97.

Tabela 5.5 - Dimensões das lâminas dos reatores trifásicos do tipo EI.

id	PRODUTO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	ØJ
0	EI 6HS-250 TF	125	87,5	25	25	25	25	25	12,5	100	7
1	EI 6HS-300 TF	150	105	30	30	30	30	30	15	120	9
2	EI 6HS-400 TF	200	140	40	40	40	40	40	20	160	11
3	EI 6HS-500 TF	250	175	50	50	50	50	50	25	200	11
4	EI 6HS-600 TF	300	210	60	60	60	60	60	30	240	13
5	EI 6HS-700 TF	350	245	70	70	70	70	70	35	280	13
6	EI 6HS-800 TF	400	280	80	80	80	80	80	40	320	15
7	EI 6HS-900 TF	450	315	90	90	90	90	90	45	360	20
8	EI 6HS-1000 TF	500	350	100	100	100	100	100	50	400	20

Fonte: Adaptado de (TESSIN, 2024).

A Tabela 5.6 apresenta os valores mínimos e máximos utilizados para a normalização das variáveis no processo de otimização do reator trifásico tipo EI. Esses valores foram determinados com base nos limites dos parâmetros de projeto. O valor do fator de preenchimento da janela não foi normalizado, pois varia naturalmente entre 0 e 1

Tabela 5.6 - Valores Mínimos e Máximos para Normalização das Variáveis.

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
Volume (V_{femm}^{norm})	$2,759434 \cdot 10^{-4} m^3$	$2,908997 \cdot 10^{-2} m^3$
Indutâncias ($L_{Afemm}, L_{Bfemm}, L_{Cfemm}$)	0 H	0,298490 H
Densidade de Fluxo Magnético ($B_{maxfemm}$)	0 T	1,5 T

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 5.13 apresenta os valores dos parâmetros utilizados no GA do modelo, definidos com base em observações empíricas.

Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros do modelo no GA.

Parâmetros	Valores
Tamanho da População	50
Número de Gerações	100
Taxa de Cruzamento	0,95
Taxa de Mutação	0,10
Tamanho do Torneio	3
Tamanho do Elitismo	3

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 5.14. apresenta os valores dos principais parâmetros utilizados no modelo de otimização do reator trifásico. Esses parâmetros incluem a densidade máxima de fluxo magnético, a frequência de operação, as correntes nas três fases, o fator de preenchimento da janela máximo, a indutância magnética desejada por fase e o coeficiente de penalidade.

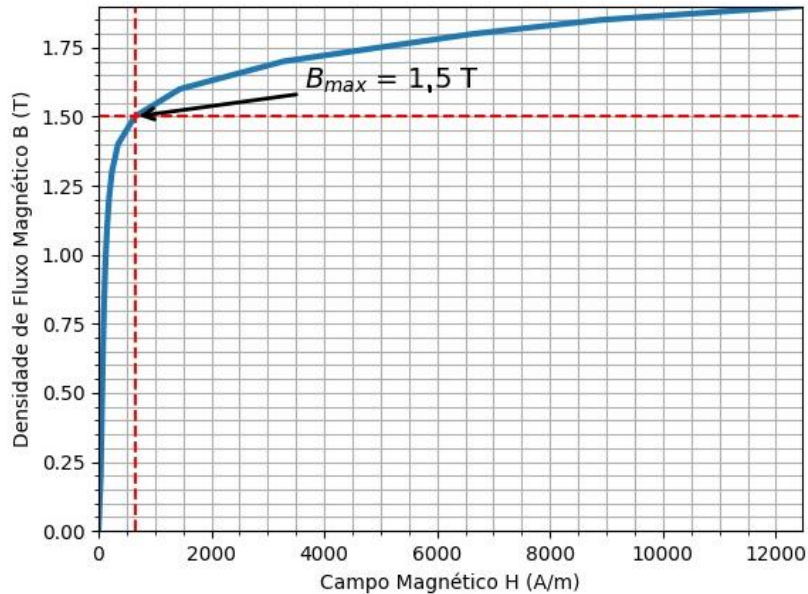
Tabela 5.8 - Parâmetros do modelo de otimização do reator trifásico.

Parâmetros	Valores
Densidade de fluxo magnético máximo desejado (B_{max})	1,5 T
Frequência (f)	60 Hz
Corrente na fase (I_a)	-0,798047-1,382258j A
Corrente na fase (I_b)	1,596094+0j A
Corrente na fase (I_c)	-0,798047+1,382258j A
Fator de ocupação de janela máximo desejado (ku_{max})	0,3
Indutância magnética desejada em cada fase (L_0)	0,298490 H
Coeficiente de penalidade (r_p)	100
Tensão (V_0)	127 V

Fonte: Autor (2024).

O material utilizado para o núcleo do reator trifásico foi o aço elétrico M530-50A, cujas propriedades magnéticas estão apresentadas na Figura 5.15.

Figura 5.15 - Curva de magnetização do aço elétrico M530-50A fornecido pela ArcelorMittal.



Fonte: Autor (2024).

5.4 Configuração Computacional

As simulações do Estudo de Caso 1 foram executadas em uma estação de trabalho com processador AMD EPYC 7F72 de 24 núcleos (48 threads) operando a 3,2 GHz, placa gráfica NVIDIA RTX A6000 e 512 GB de memória RAM. Enquanto as simulações do Estudo de Caso 2, foram realizadas em um sistema com processador Intel® Core™ i7-4790 (3,60 GHz, 8 threads), acompanhado de uma GPU NVIDIA GeForce GT 710 e 8 GB de memória RAM.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordadas a metodologia dos algoritmos Meta-Heurísticos, o uso de processamento paralelo e a aplicação do método dos elementos finitos, integrados à análise de dois estudos de caso: um reator com núcleo de ar e um reator do tipo EI.

No capítulo seguinte, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações do modelo de otimização do reator monofásico com núcleo de ar, bem como da otimização do reator trifásico com núcleo do tipo EI.

6 RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior, foram apresentadas as metodologias empregadas nesse estudo, bem como os principais parâmetros utilizados nas simulações.

Neste capítulo, será apresentada a validação do modelo axissimétrico do reator de núcleo de ar do tipo seco por meio da medição de um dispositivo real em laboratório e a comparação com a simulação 2D axissimétrica e a simulação 3D do dispositivo. Os resultados serão comparados entre si. Além disso, serão apresentados os resultados das simulações, incluindo os gráficos de desempenho ao longo das gerações e os parâmetros otimizados obtidos para cada dispositivo analisado.

6.2 Validação do modelo axissimétrico

Para validar o modelo axissimétrico 2D utilizado neste trabalho, foram realizadas medições práticas em laboratório e os resultados obtidos foram comparados com os valores calculados por meio de simulações computacionais utilizando os *softwares* Ansys e FEMM.

O objeto de estudo foi um reator monofásico de núcleo de ar do tipo seco, cujos parâmetros construtivos estão listados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros construtivos do Reator de núcleo de ar estudado.

Parâmetro	Valor
Altura da seção transversal do condutor (h)	3,2 mm
Base da seção transversal do condutor (b)	22,2 mm
Raio médio (R)	100 mm
Quantidade de condutores(N)	32
Espaçamento	5 mm
Corrente Nominal	200 A
Densidade de Corrente	2,82 A/mm ²
Volume	1,43×10 ⁻³ m ³
Indutância	100 µH

Fonte: Autor (2024).

Para a realização dos experimentos em laboratório, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte Controlada AC California Instruments CSW5550;
- Analisador de qualidade Fluke 435 série II;
- Cabos conectores.

O reator utilizado na medição e a montagem experimental podem ser visualizadas nas Figuras 6.1 e 6.2, respectivamente.

Figura 6.1 - Reator de núcleo de ar do tipo seco.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6.2 - Experimento realizado em laboratório para validação do modelo.



Fonte: Autor (2024).

A partir da fonte controlada, foi aplicada uma tensão de 0,93 V a uma frequência de 60 Hz nos terminais do indutor. A tensão, corrente e fator de potência do sistema foram medidos com o analisador de qualidade Fluke. Os resultados obtidos no experimento laboratorial estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos através da medição em laboratório.

Parâmetro	Valor
Tensão RMS (V_L)	0,93V
Corrente RMS (I_L)	22,076 A
Fator de Potência (FP)	0,21
Frequência (f)	60 Hz

Fonte: Autor (2024).

Com base nesses dados experimentais, foi possível calcular os seguintes parâmetros do sistema, utilizando as seguintes equações:

- Impedância (Z_L)

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} \quad (6.1)$$

Onde Z_L é a impedância calculada do reator estudado em laboratório, V_L e I_L são os valores em RMS da tensão e corrente medidas em laboratório.

- Resistência (R_L):

$$R_L = Z_L \cdot FP \quad (6.2)$$

Onde R_L é a resistência calculada do reator.

- Reatância (X_L):

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2} \quad (6.3)$$

Onde X_L é reatância indutiva calculada do reator.

- Indutância (L_L):

$$L_L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (6.4)$$

Onde f é a frequência do sistema. Os resultados desses cálculos estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Resultados obtidos matematicamente.

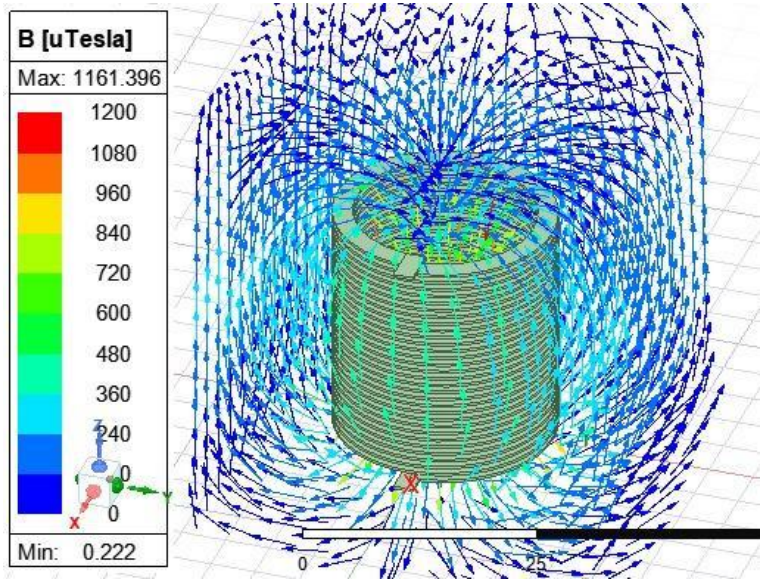
Parâmetro	Valor
Z_L	42,13 mΩ
X_L	41,1906 mΩ
L_L	109,261 μH
R_L	8,85 mΩ

Fonte: Autor (2024).

É importante notar que a indutância nominal deste equipamento é de 100 μH, enquanto a indutância medida experimentalmente foi de 109,261 μH. Essa diferença pode ser atribuída a variações construtivas e tolerâncias do componente, bem como a possíveis erros de medição.

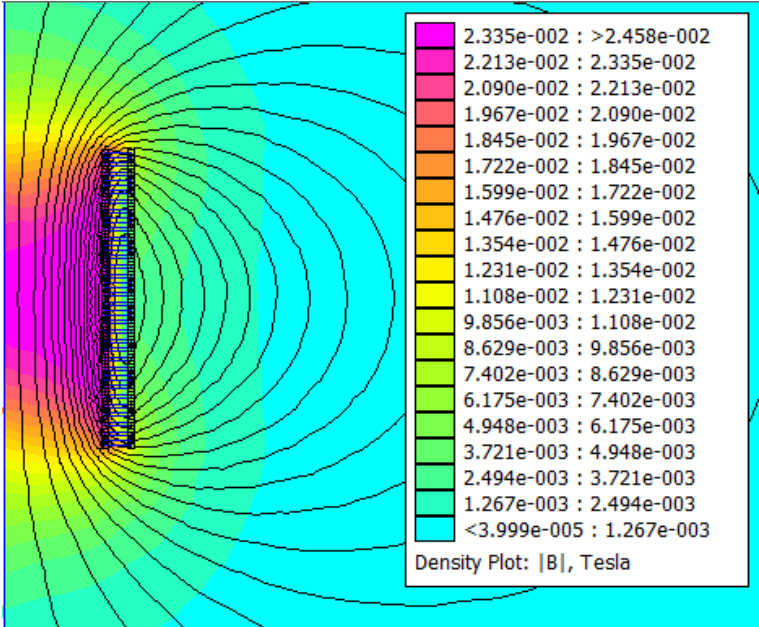
As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam a distribuição da densidade de fluxo magnético do reator de núcleo de ar, obtida pelas simulações.

Figura 6.3 - Simulação da densidade de fluxo magnético do modelo de reator medido em laboratório utilizando o software Ansys Maxwell.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6.4 - Simulação da densidade de fluxo magnético do modelo do reator medido em laboratório utilizando o software FEMM sobre o plano XY.



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 6.4 apresenta uma comparação detalhada entre os parâmetros medidos experimentalmente e os parâmetros simulados pelos *softwares* Ansys Maxwell e FEMM.

Tabela 6.4 - Comparação entre os parâmetros medidos do reator de núcleo de ar e os parâmetros simulados.

Parâmetro	Medido em laboratório	Simulação FEMM	Simulação Ansys	Diferença entre Medido e FEMM (%)	Diferença entre medido e Ansys (%)
Indutância	109,26 μH	102,83 μH	107,81 μH	5,88	1,33
Reatância	41,19 m Ω	38,76 m Ω	40,64 m Ω	5,88	1,33
Resistência	8,85 m Ω	8,74 m Ω	8,40 m Ω	1,24	5,08
Impedância	42,13 m Ω	39,74 m Ω	41,50 m Ω	5,67	1,50
Fator de Qualidade	4,66	4,44	4,83	4,72	3,65

Fonte: Autor (2024).

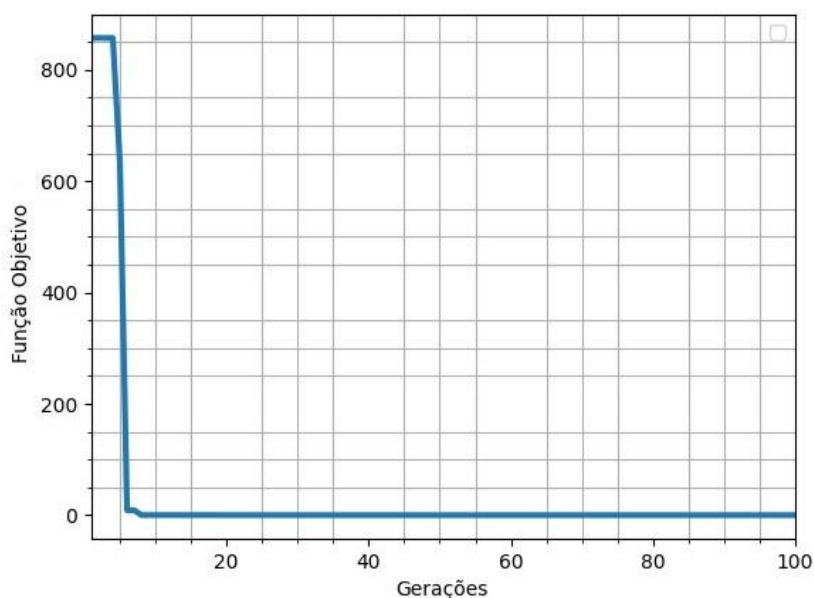
Essa comparação entre os resultados experimentais e simulados demonstra a boa concordância entre eles, validando o modelo axissimétrico 2D utilizado neste trabalho. Observa-se que a discrepância entre os valores medidos em laboratório e os obtidos por meio

do FEMM foi mais significativa. Isso pode ser atribuído ao fato de o modelo axissimétrico representar cada espira como perfeitamente fechada ao redor do eixo z, desconsiderando as interações tridimensionais presentes na geometria real. Por outro lado, um modelo tridimensional é capaz de capturar com maior precisão essas interações espaciais, o que pode resultar em maior fidelidade aos dados experimentais.

6.3 Resultados da otimização do reator de núcleo de ar

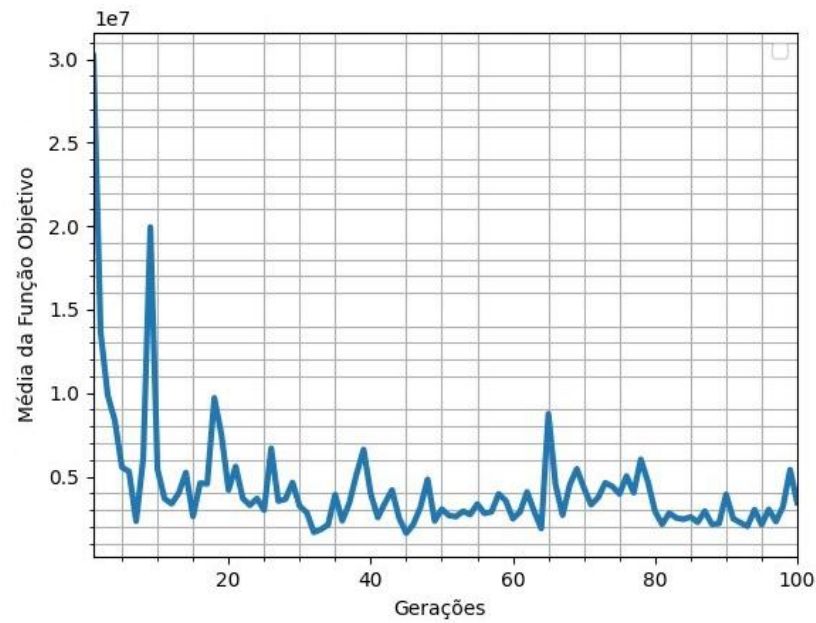
Usando os parâmetros descritos nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, o processo de otimização resultou nos gráficos apresentados nas Figuras 6.5 a 6.10.

Figura 6.5 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da função objetivo ao longo das gerações.



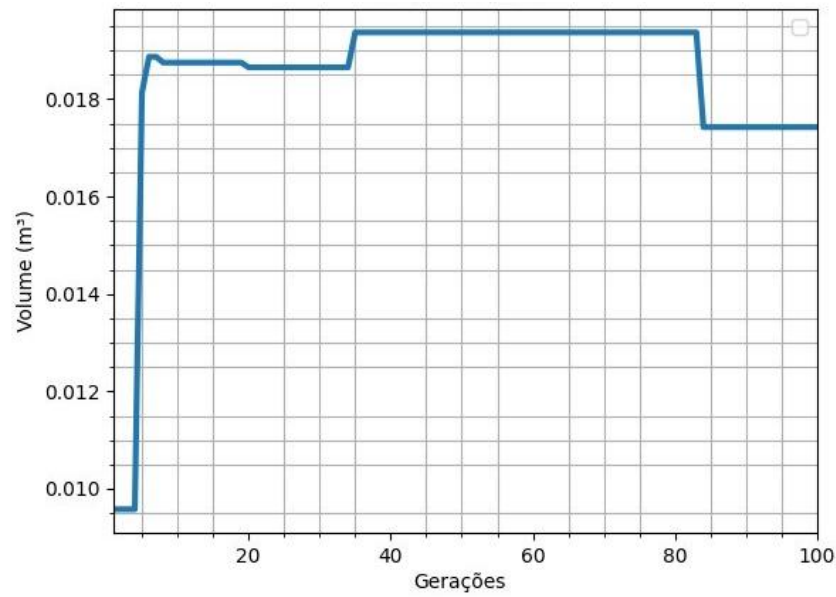
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.6 - Gráfico da evolução do melhor indivíduo com base na média da função objetivo ao longo das gerações.



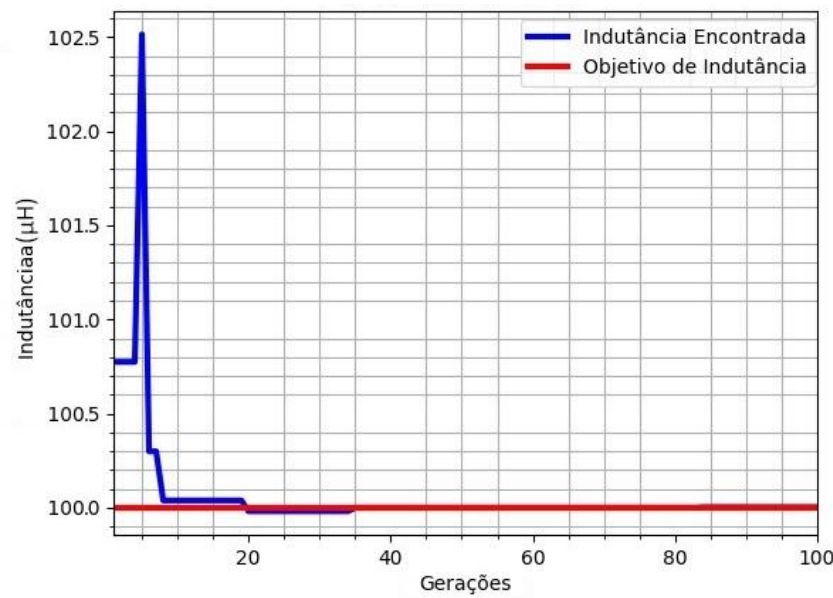
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.7 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do volume ao longo das gerações.



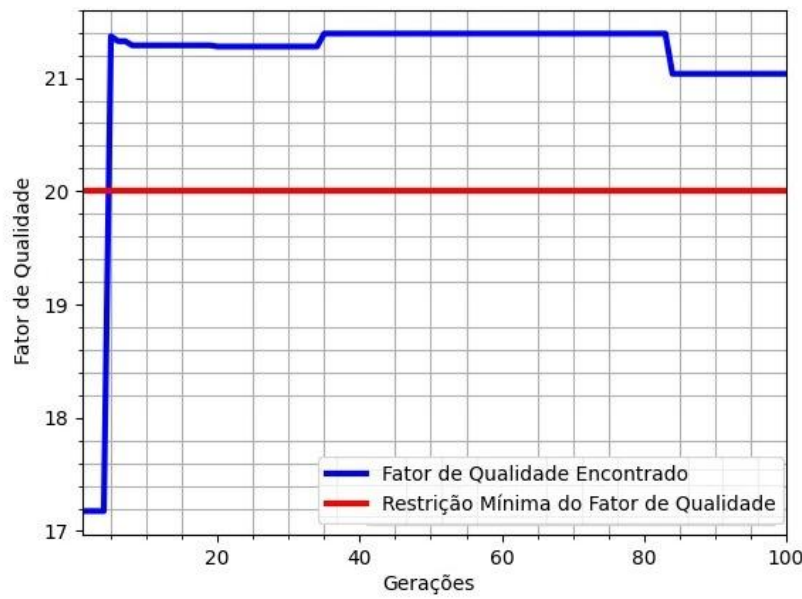
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.8 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da indutância ao longo das gerações.



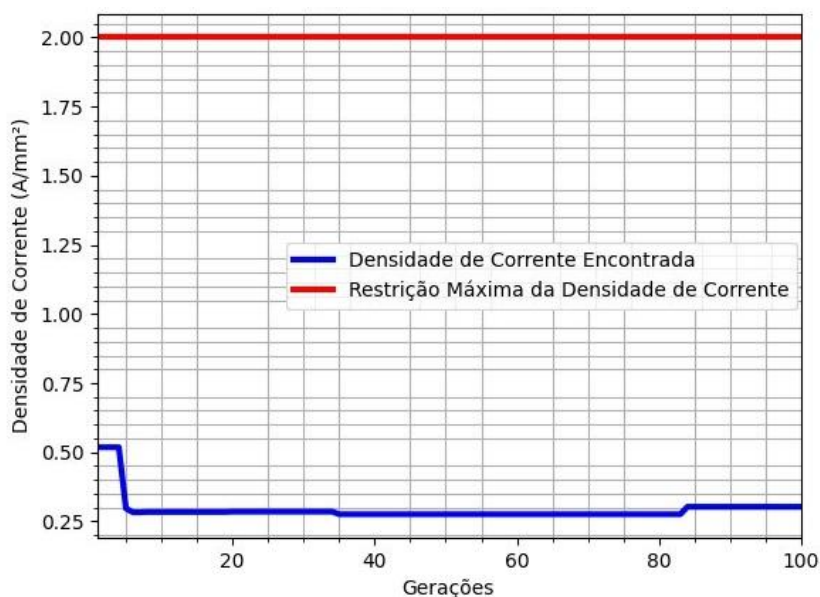
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.9 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do fator de qualidade ao longo das gerações.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6.10 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da densidade de corrente ao longo das gerações.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar os gráficos, observamos que o algoritmo convergiu para os parâmetros desejados até a 12ª geração. Nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, observamos que a indutância se aproximou significativamente de $100 \mu H$, o fator de qualidade excedeu 20 e a densidade de corrente permaneceu abaixo de 2, conforme especificado anteriormente. Os valores detalhados dos parâmetros encontrados são apresentados na Tabela 6.5.

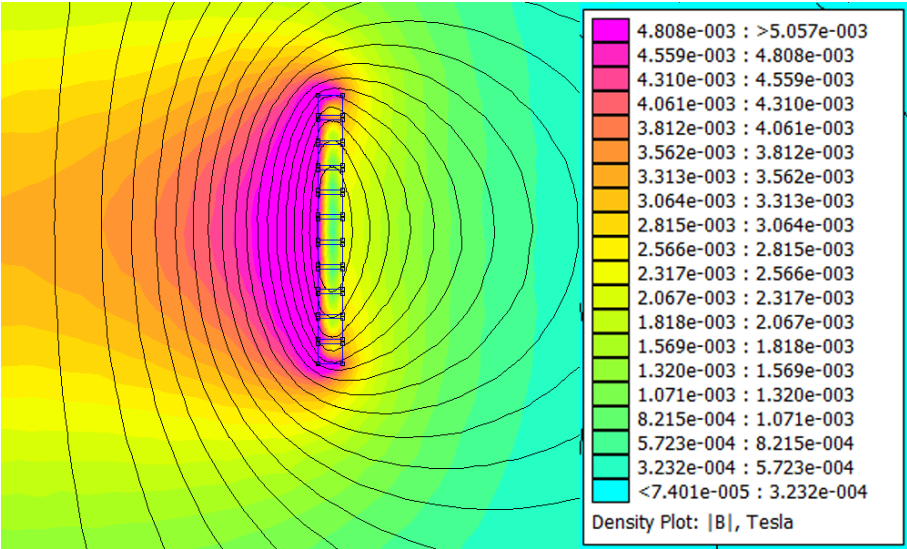
Tabela 6.5 - Tabela com os parâmetros encontrados para o reator de menor volume.

Parâmetros	Reator com volume mínimo
ϕ	0,017879
V_{femm}	0,017424 m³
L_{femm}	100,002131 μH
Q_{femm}	21,036159
J_{femm}	0,302813 A/mm²
H	2,347385 cm
B	2,813654 cm
R	38,167172 cm
N	11 espiras

Fonte: Autor (2024).

Assim, com base nos resultados da Tabela 6.5, foi possível criar a representação visual da simulação do reator de núcleo de ar na Figura 6.11.

Figura 6.11 - Simulação da densidade de fluxo magnético do reator da Tabela 6.5 usando o *software* FEMM.



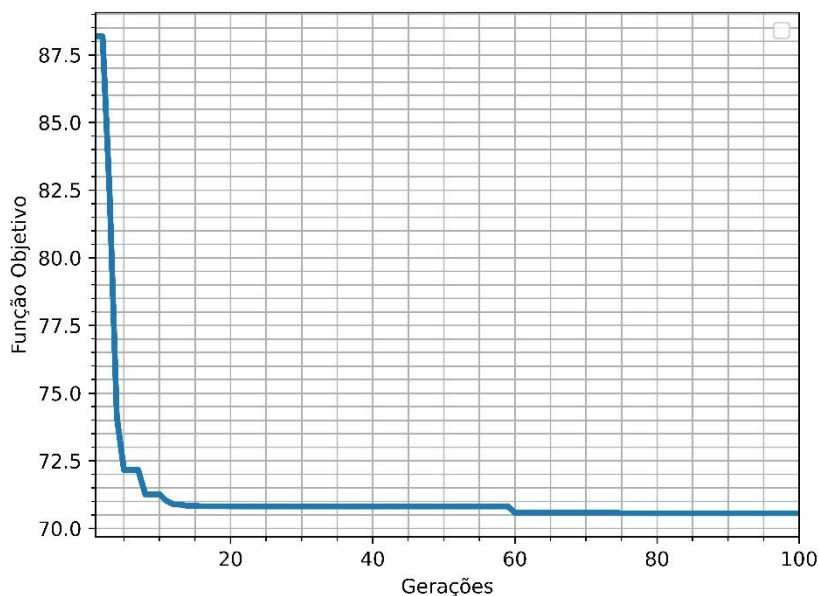
Fonte: Autor (2024).

Foram simulados 25.000 reatores utilizando o método dos elementos finitos, e a execução levou 23 horas e 14 minutos. O código do modelo está em Python, e o *software* FEMM foi utilizado para processamento paralelo com 48 núcleos. Neste trabalho, a pesquisa utilizou as bibliotecas *PyFEMM*, *Multiprocessing*, *NumPy* e *Matplotlib*.

6.4 Resultados da otimização do reator trifásico do tipo EI

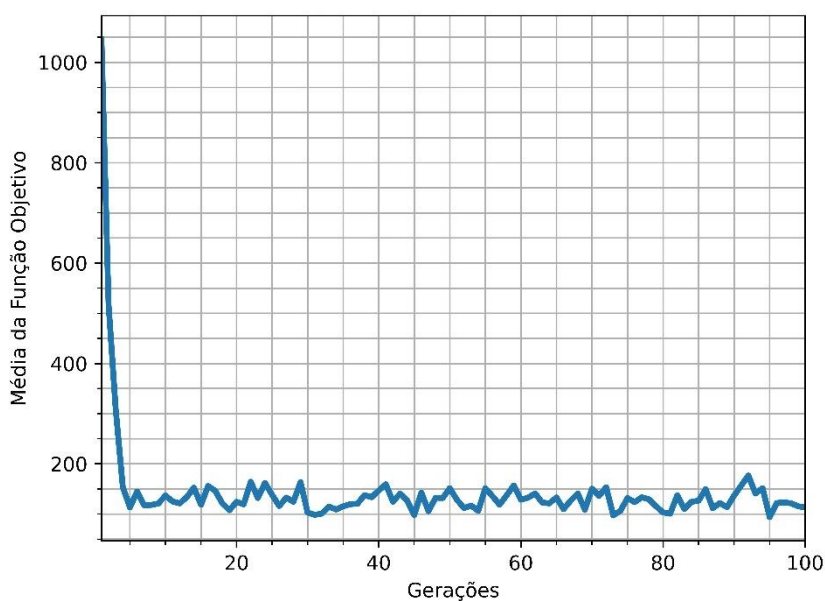
Utilizando os parâmetros descritos nas Tabelas 5.4 a 5.8, o processo de otimização resultou nos gráficos apresentados nas Figuras 6.12 a 6.18.

Figura 6.12 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da função objetivo ao longo das gerações.



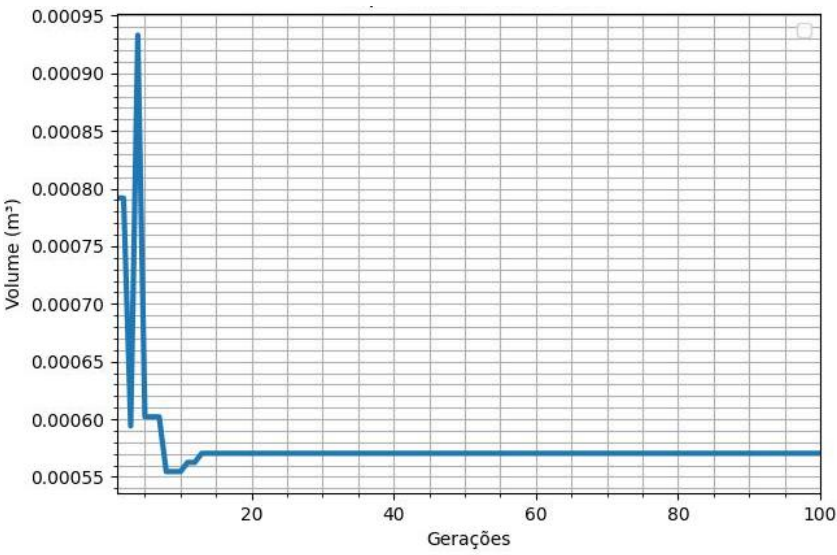
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.13 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da média da função objetivo ao longo das gerações.



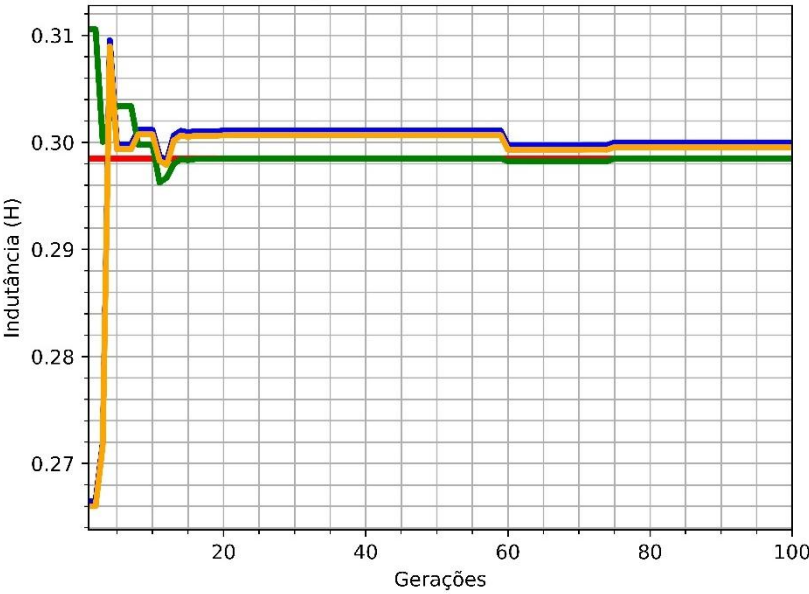
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.14 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do volume ao longo das gerações.



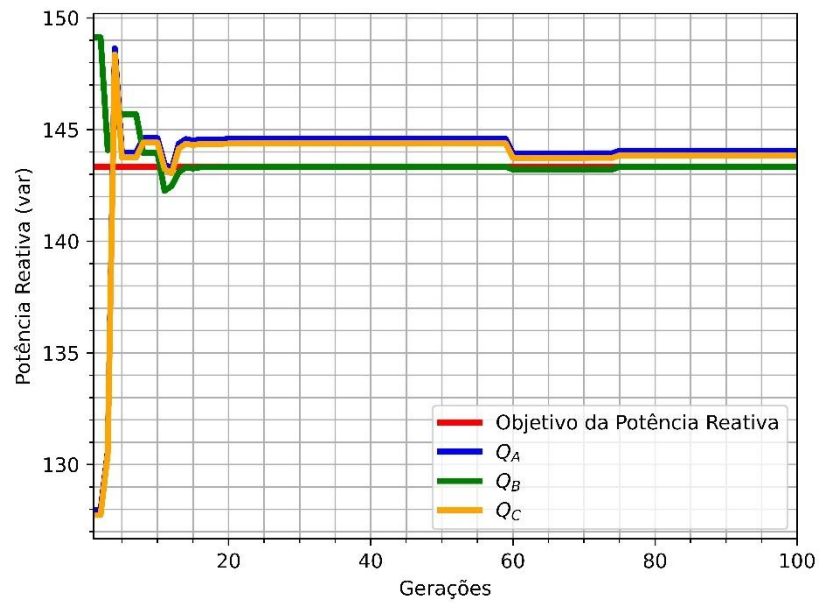
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.15 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo das indutâncias ao longo das gerações.



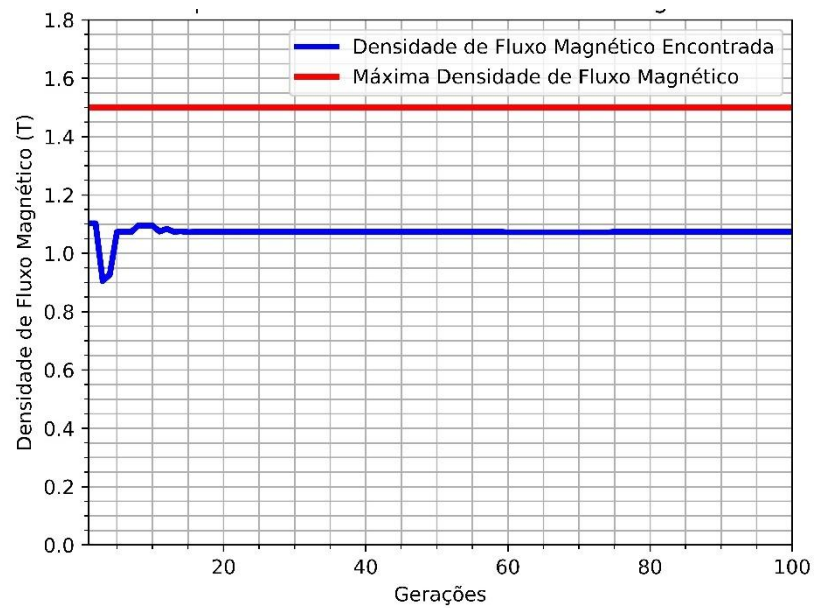
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.16 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da potência reativa ao longo das gerações.



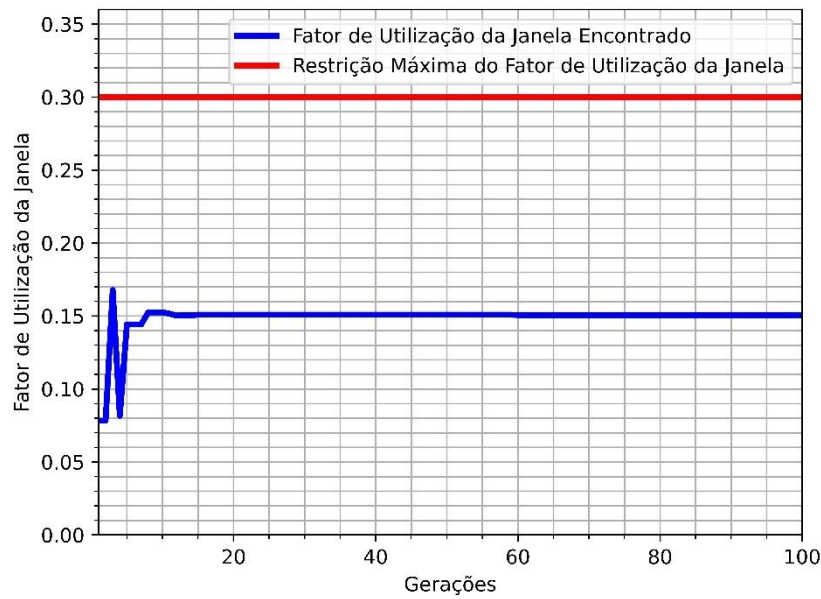
Fonte: Autor (2024).

Figura 6.17 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo da máxima densidade de fluxo magnético.



Fonte: Autor (2024).

Figura 6.18 - Gráfico do comportamento do melhor indivíduo do fator de utilização de janela.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar os gráficos, observamos que o algoritmo convergiu para os parâmetros desejados até a 60ª geração. Nas Figuras 5.33, 5.34, 5.35, e 5.36, observamos que a indutância se aproximou significativamente de 0,298490 H, a máxima densidade de fluxo magnético foi menor do que 1,5T e o valor do fator de ocupação de janela permaneceu abaixo de 0,3, conforme especificado anteriormente. Os valores detalhados dos parâmetros encontrados são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Parâmetros encontrados para o reator trifásico com o menor volume de núcleo.

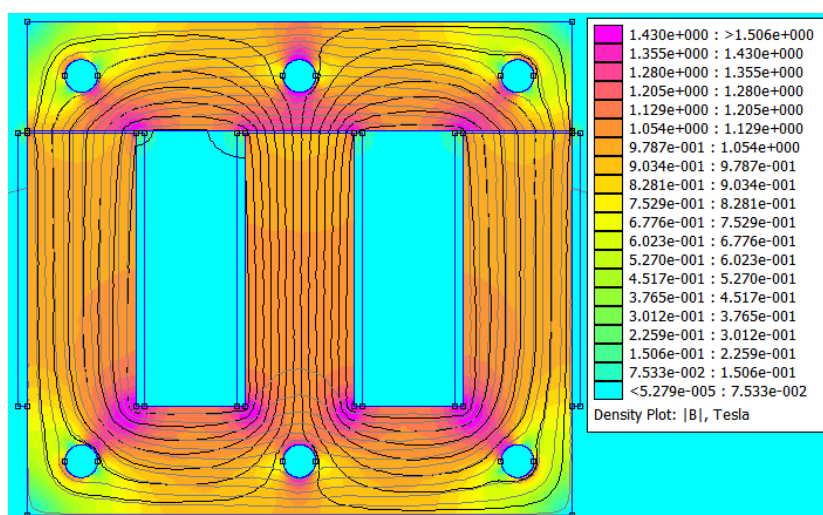
Parâmetro	Valores
ϕ	70,560258
V	$5,703705 \cdot 10^{-4} m^3$
L_A	0,299994 H
L_B	0,298483 H
L_C	0,299559 H
B_{max}	1,073014 T
ku_{max}	0,150683
id	1
g	0,87618544 mm
N_c	404 espiras
N_l	415 espiras
n_L	72 lâminas

Fonte: Autor (2024).

A análise dos resultados na Tabela 6.6 mostrou que o número de espiras da bobina central (N_c) do reator trifásico foi menor do que o número de espiras das bobinas laterais (N_l). Esse comportamento era esperado, pois o caminho do fluxo magnético na bobina central possui menor relutância magnética em comparação com as bobinas laterais. Portanto, as bobinas laterais exigiram um maior número de espiras para compensar essa maior relutância e alcançar o mesmo desempenho magnético.

Assim, com base nos resultados apresentados na Tabela 6.6, foi possível criar a representação visual da Figura 6.19.

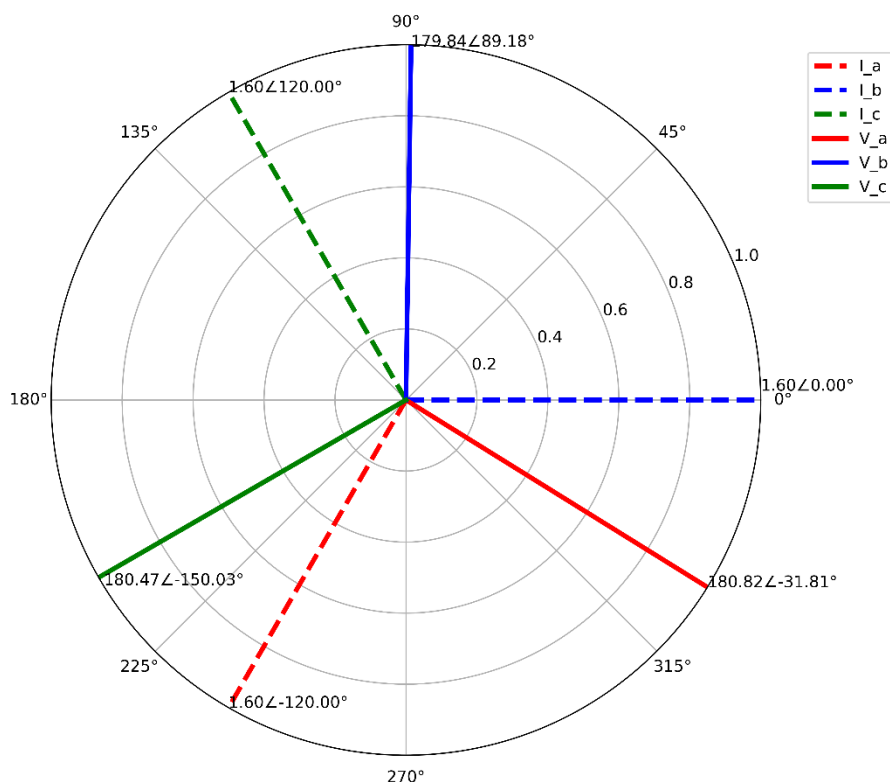
Figura 6.19 - Simulação da densidade de fluxo magnético do dispositivo da Tabela 6.6.



Fonte: Autor (2024).

Através dos resultados do *software* FEMM foi possível plotar os valores das correntes e das tensões no formato de diagrama fasorial da Figura 6.20.

Figura 6.20 - Diagrama fasorial das correntes e tensões do reator trifásico do tipo EI obtido por meio do Método de elementos Finitos.



Fonte: Autor (2024).

A simulação da otimização do reator trifásico de núcleo tipo EI usando o GA e o MEF durou 48 horas e 23 minutos.

6.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram discutidos os resultados obtidos a partir da comparação entre diferentes modelos e métodos de otimização aplicados aos reatores de núcleo. Primeiramente, foi realizada uma comparação entre o modelo axissimétrico 2D, o modelo tridimensional e o modelo real do reator de núcleo de ar monofásico. Os resultados mostraram que o modelo 2D é uma aproximação eficaz, com as simulações tridimensionais corroborando a precisão do modelo axissimétrico.

Adicionalmente, foram apresentados os resultados da otimização do reator de núcleo de ar monofásico utilizando o algoritmo meta-heurístico de otimização por enxame de partículas (PSO). O PSO demonstrou-se eficiente em atender às restrições impostas e em buscar soluções ótimas para o reator.

Para o reator trifásico tipo EI, a otimização foi realizada com o algoritmo genético, que se mostrou igualmente eficaz. A integração dos algoritmos Meta-Heurísticos com o método de elementos finitos e a implementação de processamento paralelo permitiram alcançar resultados satisfatórios e melhorar a eficiência das simulações para a resolução dos problemas. Estes resultados destacam a robustez e a eficácia dos métodos utilizados, evidenciando que a combinação de técnicas avançadas pode proporcionar soluções altamente eficazes para problemas complexos de engenharia.

7 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos destacam a eficácia dos métodos e modelo utilizados:

Modelo em Coordenadas Axissimétricas: O modelo de Elementos Finitos em coordenadas axissimétricas demonstrou ser uma representação adequada para o reator de núcleo de ar monofásico, conforme verificado pela comparação entre os resultados simulados e os dados experimentais. No entanto, é importante destacar que a precisão dessa correspondência pode ser influenciada por erros experimentais e de medição, bem como por erros numéricos inerentes ao processo de simulação.

Otimização do Reator de Núcleo de Ar Monofásico: A aplicação do PSO satisfaz as restrições impostas e em alcançar o menor volume possível para o reator, indicando uso satisfatório na resolução do problema de otimização.

Otimização do reator de núcleo tipo EI: A aplicação do GA ao reator trifásico tipo EI revelou insights importantes sobre o design do reator. A análise mostrou que a quantidade de condutores nas pernas central e lateral deve ser ajustada para compensar a menor relutância do núcleo da bobina central. Além disso, o diagrama fasorial confirmou que as tensões e correntes estão defasadas em 90 graus, conforme esperado.

Processamento Paralelo: O processamento paralelo foi empregado como uma ferramenta auxiliar com o objetivo de melhorar a utilização da capacidade computacional disponível.

Essas discussões reforçam a adequação dos modelos e algoritmos empregados e destacam como a combinação de técnicas de otimização e processamento paralelo contribui para a solução eficiente de problemas complexos.

8 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, foi investigada a aplicação de métodos avançados para a otimização de dispositivos eletromagnéticos, com foco na utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) e de algoritmos evolutivos. O estudo envolveu a implementação e comparação de modelos axissimétricos bidimensionais e tridimensionais, bem como a aplicação dos algoritmos de Otimização por Enxame de Partículas (PSO) e Algoritmos Genéticos (GA). Além disso, foi incorporado o processamento paralelo com o objetivo de aprimorar a eficiência computacional das simulações.

A pesquisa realizou uma comparação entre o modelo axissimétrico 2D e os dados experimentais de um reator de núcleo de ar monofásico, sendo os resultados posteriormente confrontados com simulações tridimensionais e as medições de um dispositivo físico.

Os algoritmos de otimização demonstraram-se ferramentas eficazes no aprimoramento dos dispositivos. O PSO foi capaz de atender às restrições impostas, minimizando o volume do reator monofásico, enquanto o GA realizou a otimização de um reator trifásico do tipo EI, promovendo melhorias significativas no projeto e alcançando resultados satisfatórios.

A integração de técnicas de otimização com algoritmos evolutivos ao Método dos Elementos Finitos, aliada ao uso do processamento paralelo, contribuiu substancialmente para a otimização do processo de simulação e projeto dos dispositivos. Tais avanços evidenciam que a combinação de métodos modernos pode resultar em soluções mais eficazes e precisas para problemas complexos de engenharia. Com relação ao MEF, soluções eficientes podem ser sim ser obtidas através da utilização de modelos simplificados.

Em síntese, esta dissertação contribui para o avanço na área de otimização de dispositivos eletromagnéticos, ressaltando a relevância da integração entre métodos de otimização avançados e ferramentas computacionais modernas. Os resultados obtidos não apenas validam as abordagens adotadas, como também fornecem subsídios valiosos para futuras pesquisas e inovações tecnológicas no campo.

8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Segue abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros que podem expandir e aprofundar os temas abordados nesta dissertação:

Explorar a integração de técnicas de aprendizado de máquina para melhorar a previsão e a otimização de parâmetros em dispositivos eletromagnéticos. Modelos preditivos e técnicas de aprendizado supervisionado podem ser aplicados para ajustar e aprimorar os algoritmos de otimização.

Ampliar a pesquisa para incluir a análise e a otimização de dispositivos eletromagnéticos em contextos multifísicos, onde interações térmicas e mecânicas são consideradas juntamente com os efeitos eletromagnéticos. Isso pode incluir a implementação de acoplamentos térmico-eletromagnéticos e estruturais.

Investigar o uso de técnicas de processamento paralelo mais avançadas, como a computação em nuvem ou o uso de GPUs (Unidades de Processamento Gráfico), para acelerar as simulações e otimizações.

Validação Experimental Aprofundada: Realizar mais experimentos para validar as simulações e otimizações propostas, especialmente para os modelos tridimensionais e os algoritmos de otimização. A coleta de dados experimentais adicionais pode fornecer uma base mais robusta para a comparação e validação dos resultados obtidos.

Realizar uma análise detalhada de sensibilidade e robustez dos modelos e algoritmos, investigando como variações nos parâmetros e condições de operação afetam os resultados e a performance dos dispositivos.

Realizar a análise e a otimização de dispositivos eletromagnéticos em contextos multifísicos para investigar sua influência sobre os resultados dos algoritmos de otimização.

Essas sugestões oferecem caminhos promissores para expandir o conhecimento e a aplicação das técnicas investigadas nesta dissertação, contribuindo para o avanço contínuo no campo da otimização de dispositivos eletromagnéticos.

8.2 Publicações

Através desta pesquisa de mestrado, foram realizadas as seguintes publicações, sendo as destacadas produtos diretos da pesquisa e as demais, indiretos.

- **Artigos em congressos/conferências**

CRUVINEL, J. A. S.; CAMACHO, J. R.; MARTINS DA SILVA, F. W. Volume optimization for a three-phase EI reactor – 2D finite element method and genetic algorithm approach. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO

ENERGÉTICO, 14., 2024, Manaus. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2024. p. 2874–2885.

CRUVINEL, Jeylto Alves de Souza; CAMACHO, José Roberto. Volume Optimization for a Single-Phase Air-Core Reactor – 2D Finite Element Method and Particle Swarm Optimization Approach. In: 22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24), 26-28 jun. 2024, Bilbao, Espanha. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ), v. 22, set. 2024.

ALVES DE SOUZA CRUVINEL, J.; CAMACHO, J. Roberto. Differential evolution algorithm applied to 2D finite element method for air core reactor design with volume minimization. In: International Symposium on Energy: Energy Transition, Green Hydrogen and Sustainable Industry, 1, 1, dez. 2023. [S.l.]: [s.n.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.55592/ISE.2023.2713954>.

MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I.; CRUVINEL, J. A. S. Integration of small hydroelectric plants in policies and regulations for energy transition. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 14., 2024, Manaus. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2024. p. 1668–1679.

RESENDE SILVA COUTO, L. C.; CAMACHO, J. Roberto; SOUZA CRUVINEL, J. A. de; FARIA, A. Miranda Teixeira. Genetic algorithms to obtain model parameters for photovoltaic modules with 1, and 2 diodes. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON QUALITY OF POWER, 15., 2023, São Luiz. Anais [...]. São Luiz: [s.n.], 2023. p. 1-7. DOI: 10.1109/CBQEE59548.2023.10503736.

• Capítulo de livro

CRUVINEL, JEYLTO ALVES DE SOUZA; CAMACHO, J. R. Optimization of air core reactor design through 2D finite element method and differential evolution algorithm for volume minimization, ed.1. Santo André: Universidade Federal do ABC, 2024, v.1, p. 325 - 336.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLDEA, I.; TUTELEA, L. N. *Electric Machines: Transients, Control Principles, Finite Element Analysis, and Optimal Design with MATLAB®*. 2. ed. CRC Press, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003216018>. Acesso em: 04 jan. 2024.

CABELLO-SOLORZANO, K.; ORTIGOSA DE ARAUJO, I.; PEÑA, M.; CORREIA, L.; TALLÓN-BALLESTEROS, A. J. *The Impact of Data Normalization on the Accuracy of Machine Learning Algorithms: A Comparative Analysis*. In: 18th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFT COMPUTING MODELS IN INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL APPLICATIONS (SOCO 2023). Lecture Notes in Networks and Systems, v. 750. Springer, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-42536-3_33. Acesso em: 12 jan. 2024.

CARDOSO, J. R. *Electromagnetics Through the Finite Element Method: A Simplified Approach Using Maxwell's Equations*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=JrRetAEACAAJ>. Acesso em: 02 jan. 2024.

CAVE, J.; SMITH, A.; JOHNSON, R. *Parallel Processing Systems: Techniques and Applications*. Springer, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71593-9>. Acesso em: 16 mar. 2024.

CAVERLY, D.; POINTNER, K.; PRESTA, R.; GRIEBLER, P.; REISINGER, H.; HASLEHNER, O. *Air Core Reactors: Magnetic Clearances, Electrical Connection, and Grounding of their Supports*. Trench Limited, 2017. Disponível em: <http://cce.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-Papers/2017/AirCoreReactors.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

DEB, Kalyanmoy. *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*. 2. ed. Wiley-IEEE Press, 2017. ISBN 978-1-119-13232-5.

DEB, Kalyanmoy; AGARWAL, Ram Bhushan. Simulated binary crossover for continuous search space. *Complex Systems*, v. 9, n. 2, p. 115-148, 1995. Disponível em: https://www.complex-systems.com/abstracts/v09_i02_a02/. Acesso em: 26 nov. 2023.

FRANCO, Isabel B.; CHATTERJI, Tathagata; DERBYSHIRE, Ellen; TRACEY, James (eds). *Actioning the Global Goals for Local Impact: Towards Sustainability Science, Policy, Education and Practice*. Science for Sustainable Societies. Singapore: Springer, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-32-9927-6>. Acesso em: 01 jul. 2024.

GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1. ed. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.

GOLDBERG, David E.; DEB, Kalyanmoy. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In: *Foundations of Genetic Algorithms*. Elsevier, 1991. p. 69-93. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050684-5.50008-2>. Acesso em: 26 nov. 2023.

HU, L.; PALAZZOLO, A. *An Enhanced Axisymmetric Solid Element for Rotor Dynamic Model Improvement*. Journal of Vibration and Acoustics, v. 141, n. 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4043411>. Acesso em: 12 jan. 2024.

KAZIMIERCZUK, Marian K. *Design of AC Resonant Inductors Using Area Product Method*. In: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION, 2009, San Jose. Anais [...]. [S.l.]: IEEE, 2009. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316501.

KAZIMIPOUR, Borhan; LI, Xiaodong; QIN, A. K. A review of population initialization techniques for evolutionary algorithms. *ResearchGate*, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/263011604_A_Review_of_Population_Initialization_Techniques_for_Evolutionary_Algorithms. Acesso em: 02 fev. 2024.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia: IEEE, 1995. p. 1942-1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>. Acesso em: 02 fev. 2024.

KUMAR, A.; DAS, S.; CHAKRABARTI, P. *Concurrency and Synchronization in Parallel Computing*. Springer, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71593-9>. Acesso em: 25 set. 2023.

MIRJALILI, Seyedali; LEWIS, Andrew. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, v. 95, p. 51-67, 2016. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997816300163>. Acesso em: 25 mai. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>.

PAPP, K.; SHARP, M. R.; PEELLO, D. F. *High voltage dry-type air-core shunt reactors*. *Elektrotechnik & Informationstechnik*, v. 131, n. 8, p. 349-354, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-014-0232-y>. Acesso em: 15 jan. 2024.

PYTHON Software Foundation. *pyFEMM: Python interface to Finite Element Method Magnetics (FEMM)*. Disponível em: <https://pypi.org/project/pyfemm/>. Acesso em: 06 jul. 2024.

PYTHON Software Foundation. *Python 3.9.1 Documentation: multiprocessing*. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>. Acesso em: 23 nov. 2023.

TESSIN. *Lâmina de Transformadores*. Disponível em: <https://www.tessin.com.br/pdf/lamina-transformadores.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2024.

YANG, L.; WANG, S. *A compensation winding structure for balanced three-phase coupled inductor*. In: IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC), 2017, Tampa, FL, USA. Anais [...]. Piscataway: IEEE, 2017. p. 868-875. DOI: 10.1109/APEC.2017.7930798.

ZHAN, Z.-H.; ZHANG, J.; LI, Y.; CHUNG, H. S.-H. Adaptive Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, v. 39, n. 6, p. 1362-1381, dez. 2009. DOI: 10.1109/TSMCB.2009.2015956.

ZHANG, Z. *Antenna Design for Mobile Devices*. 2. ed. Wiley-IEEE Press, 2017. ISBN 978-1-119-13232-5.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DAS LÂMINAS UTILIZADAS

