

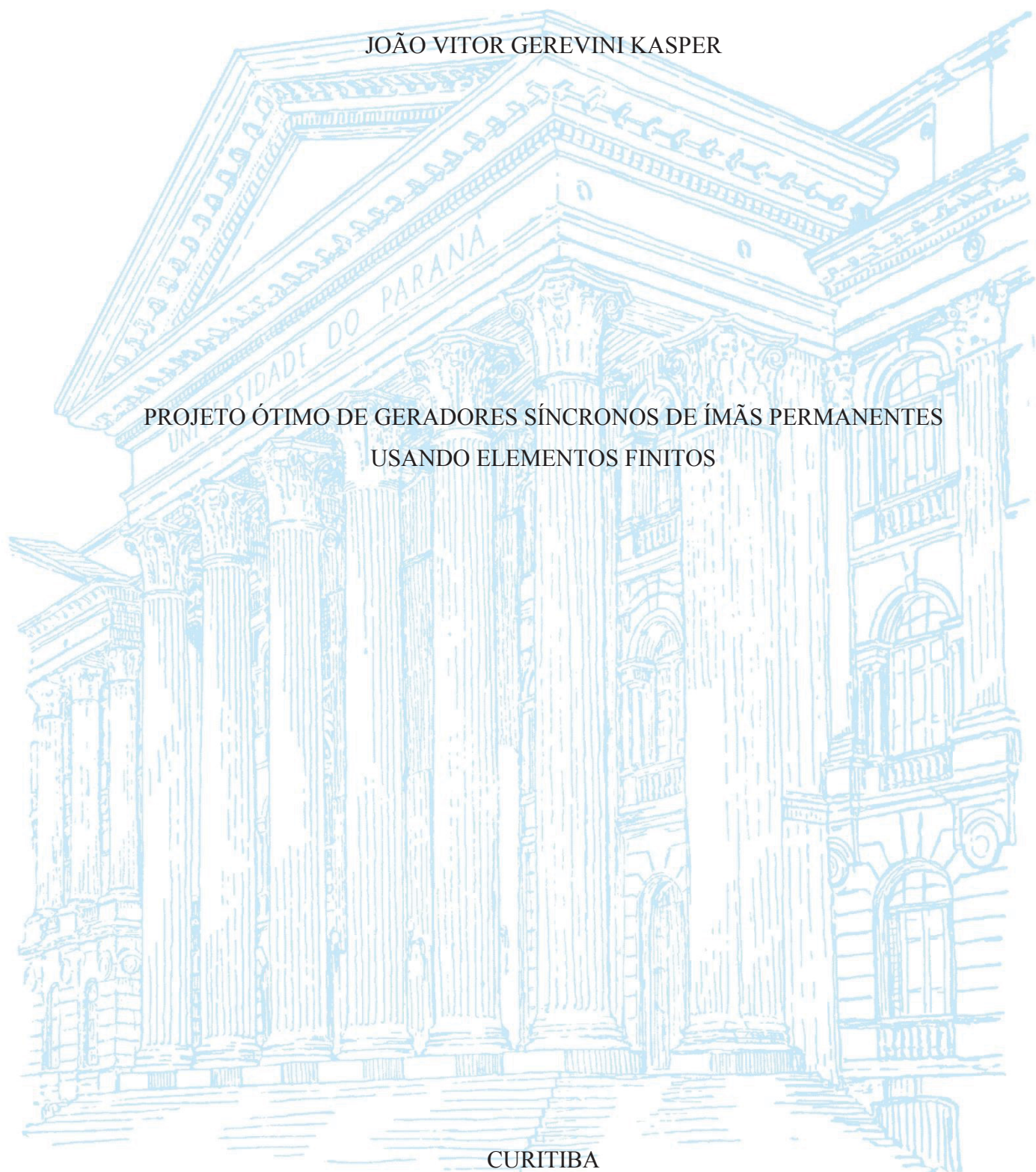
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VITOR GEREVINI KASPER

PROJETO ÓTIMO DE GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES
USANDO ELEMENTOS FINITOS

CURITIBA

2021



JOÃO VITOR GEREVINI KASPER

PROJETO ÓTIMO DE GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES
USANDO ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Almansa Malagoli

Coorientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- K19p Kasper, João Vitor Gerevini
Projeto ótimo de geradores síncronos de ímãs permanentes usando elementos finitos [recurso eletrônico] / João Vitor Gerevini Kasper – Curitiba, 2021.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Juliana Almansa Malagoli
Coorientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Machado Bazzo
1. Ímãs permanentes. 2. Método dos elementos finitos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Malagoli, Juliana Almansa. III. Bazzo, Thiago de Paula Machado. IV. Título.

CDD: 538

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOÃO VITOR GEREVINI KASPER** intitulada: **PROJETO ÓTIMO DE GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES USANDO ELEMENTOS FINITOS**, sob orientação da Profa. Dra. JULIANA ALMANSA MALAGOLI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Julho de 2021.

Assinatura Eletrônica

28/07/2021 17:09:57.0

JULIANA ALMANSA MALAGOLI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

28/07/2021 20:49:21.0

JOÃO AMÉRICO VILELA JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/07/2021 15:02:21.0

MAURICIO VALENCIA FERREIRA DA LUZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

28/07/2021 22:37:15.0

ALEXANDRE RASI AOKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, não poderia deixar de agradecer aos meus pais, Paulo Rodolfo e Mara Lúcia, pelo dom da vida, por todo amor, carinho e esforços que fizeram para sempre me proporcionar uma vida incrível. Obrigado por todo estímulo ao estudo e por me mostrarem que a educação é a ferramenta mais poderosa na transformação das pessoas.

Às minhas irmãs, Gabriela e Isabela, pelo companheirismo, apoio e pelos momentos muito agradáveis de descontração.

Aos meus orientadores Profa. Dra. Juliana e Prof. Dr. Thiago Bazzo que me orientaram neste trabalho. Muito obrigado pela extrema dedicação no desenvolvimento do trabalho, pelo seu zelo em contribuir no meu avanço como pesquisador, por todas as dúvidas sanadas e conhecimentos repassados.

À CAPES pelo apoio financeiro ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal do Paraná pelo ensino de qualidade e gratuito.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPR por todo conhecimento transmitido ao longo dessa jornada.

“O POVO NÃO DEVE TEMER SEU ESTADO. O ESTADO DEVE

TEMER SEU POVO.”

(V DE VINGANÇA)

RESUMO

Esta dissertação aborda o projeto ótimo de um gerador síncrono de ímãs permanentes alojados na superfície do rotor. Um dos principais desafios do projeto ótimo de geradores síncronos de ímãs permanentes é a escolha do coeficiente de permeância, que estabelece uma relação entre o comprimento do entreferro da máquina e a altura do ímã. A redução da altura do ímã contribui na redução do custo, entretanto, com a decorrente redução de fluxo, outras dimensões, como o comprimento axial do gerador, acabam aumentando, para manter a potência fornecida à carga. Logo, para cada projeto ótimo, com um objetivo definido, por exemplo, a minimização do custo, existe um valor ótimo do coeficiente de permeância que contribui com a redução de custo do GSIP. Os projetos ótimos apresentados na bibliografia até então, refinam a modelagem do gerador por meio de rede de relutâncias, além disso, diversificam as técnicas de otimização aplicadas, buscando minimizar o custo, maximizar a eficiência, ou ainda, otimizar ambos, por meio de algoritmos multiobjetivos. Entretanto, o coeficiente de permeância não é abordado como uma variável do problema de otimização. Através de uma análise do laço de histerese do ímã escolhido para o projeto ótimo do gerador, ímã de terras raras de Neodímio-Ferro-Boro, grade N42, foi traçada uma curva de tendência e obtida a equação que fornece o valor da densidade de fluxo operativa, densidade de fluxo fornecida pelo ímã, dado o coeficiente de permeância escolhido. São formulados problemas de otimização, primeiramente, buscando a minimização de custo, em seguida, a minimização das perdas e por fim, uma análise da fronteira de Pareto é proposta, de modo a encontrar as dimensões ótimas que possuam um bom compromisso com ambos objetivos. As soluções dos problemas de otimização são obtidas por meio de um algoritmo baseado no comportamento social de espécies, a otimização por enxame de partículas. Os resultados foram comparados através de simulações computacionais com o método dos elementos finitos 2D. Com a comparação dos projetos ótimos, nota-se que as diferenças entre os resultados dos projetos e das simulações numéricas são menores que 11%, realçando que a modelagem proposta apresenta como resultado GSIP's que atendem às restrições impostas no problema de otimização e respeitam as faixas de densidades de fluxo sugeridas pela bibliografia.

Palavras-chave: Gerador síncrono de ímãs permanentes. Coeficiente de permeância. Minimização do custo. Maximização da eficiência. Otimização por enxame de partículas.

ABSTRACT

This dissertation approaches the optimal design of a permanent magnets synchronous generator (PMSG) housed in the rotor surface. One of the main challenges in PMSGs' optimal design is the choice of the permeance coefficient, which establishes a relationship between the machine air gap length and the magnet height. Reducing the magnet height contributes to reduce the generator's cost, however, with the resulting flux reduction, other dimensions, such as the axial length of the generator, end up increasing, in an attempt to maintain power supplied to the load. Therefore, for each optimal design, with a specific objective, for example, cost minimization, there is an optimal value of the permeance coefficient that contributes to PMSG's cost reduction. The optimal designs already presented in the bibliography refine generator modeling using reluctance network, furthermore, they diversify the applied optimization techniques, seeking to minimize cost, maximize efficiency, or even, to optimize both through multi-objective algorithms. However, the permeance coefficient is not approached as a variable of the optimization problem. Through a hysteresis loop analysis of the magnet chosen for the generator's optimal design, rare earth Neodymium-Iron-Boron magnet, N42 grid, a trend curve was drawn and the equation that provides the operative magnetic flux density (magnet-provided magnetic flux density) value was obtained, given the chosen permeance coefficient. Optimization problems are formulated, first, seeking cost minimization, then loss minimization, and finally, an analysis of the Pareto frontier is proposed, in order to find the optimal dimensions, which have a great attendance to both objectives. The solutions to the optimization problems are obtained through an algorithm based on the social behavior of species, known as the Particle Swarm Optimization (PSO). The results were compared through computational simulations with the 2D Finite Element Method. By the optimal designs comparison, it is noted that the differences between designs and numerical simulations results are smaller than 11%, highlighting that the proposed model results in PMSGs that meet the optimization problem restrictions as well as respect the magnetic flux density ranges suggested by the bibliography.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Generator. Permeance Coefficient. Cost Minimization. Efficiency Maximization. Particle Swarm Optimization (PSO).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROJEÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.	20
FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.	21
FIGURA 3 – ESTATOR DO GSIP.	29
FIGURA 4 – ROTOR DE UM GSIP.	29
FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM GSIP.	30
FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS EM UM GSIP QUANDO ALIMENTA UMA CARGA INDUTIVA.	31
FIGURA 7 – GSIP COM ROTOR INTERNO E GSIP COM ROTOR EXTERNO.	33
FIGURA 8 – TOPOLOGIAS DOS ÍMÃS PERMANENTES.	34
FIGURA 9 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DE UM MATERIAL.	35
FIGURA 10 – LAÇO DE HISTERESE DE UM MATERIAL.	36
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DO SEGUNDO QUADRANTE DE UM LAÇO DE HISTERESE.	37
FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO DA REGIÃO FACTÍVEL DE UMA FUNÇÃO $F(X)$	40
FIGURA 13 – FRONTEIRA DE PARETO.	41
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE BUSCA DO PONTO ÓTIMO DE UMA FUNÇÃO $F(X)$	42
FIGURA 15 – POSIÇÕES DAS PARTÍCULAS AO LONGO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.	45
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PSO.	47
FIGURA 17 – MODIFICAÇÃO DO PROBLEMA ATRAVÉS DO MEF.	51
FIGURA 18 – TIPOS DE ELEMENTOS POSSÍVEIS EM UMA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	52
FIGURA 19 – EXEMPLOS DE DENSIDADE DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.	53
FIGURA 20 – CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS A UM GERADOR SÍNCRONO.	54
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO COM MEF.	55
FIGURA 22 – INTERFACE GRÁFICA DO PREFCAD.	56
FIGURA 23 – CONFIGURAÇÕES DO EXECUTÁVEL EFMA.	57
FIGURA 24 – INTERFACE GRÁFICA DO PRP, ETAPA DE PROCESSAMENTO.	58
FIGURA 25 – INTERFACE GRÁFICA DO PRP, ETAPA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.	59

FIGURA 26 – PRINCIPAIS DIMENSÕES DO GSIP.	61
FIGURA 27 – DIAGRAMA FASORIAL DO GSIP.	71
FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DE PROJETO DO GSIP.	77
FIGURA 29 – VALOR DA FUNÇÃO DE <i>FITNESS</i> DO CUSTO AO LONGO DAS ITERAÇÕES.	85
FIGURA 30 – CUSTO DO GSIP EM FUNÇÃO DO VALOR DO COEFICIENTE DE PERMEÂNCIA.	88
FIGURA 31 – VALOR DA FUNÇÃO DE FITNESS DA EFICIÊNCIA AO LONGO DAS ITERAÇÕES.	89
FIGURA 32 – FRONTEIRA DE PARETO.	93
FIGURA 33 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP1 OPERANDO EM PLENA CARGA..	97
FIGURA 34 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP2 OPERANDO EM PLENA CARGA..	99
FIGURA 35 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP3 OPERANDO EM PLENA CARGA.	100
FIGURA 36 – TENSÕES TERMINAIS DO GSIP3.	101
FIGURA 37 – POTÊNCIA ELÉTRICA FORNECIDA PELO GSIP3.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CRITÉRIOS ADOTADOS PARA OS PROJETOS ÓTIMOS DO GSIP.....	60
TABELA 2 – VALORES DA DENSIDADE DE FLUXO OPERATIVA DO ÍMÃ PARA CADA VALOR DO COEFICIENTE DE PERMEÂNCIA.	64
TABELA 3 – CUSTOS ESPECÍFICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO GSIP.	73
TABELA 4 – VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS NO CÁLCULO DAS PERDAS DO GSIP.	75
TABELA 5 – VARIÁVEIS DE CADA PARTÍCULA DA PSO.....	80
TABELA 6 – VALORES DAS VARIÁVEIS ADOTADAS PARA O PROJETO BASE DO GSIP0.	83
TABELA 7 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP1.....	85
TABELA 8 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP1.....	86
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE MATERIAL DO GSIP0 COM O GSIP1.	87
TABELA 10 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP2 ...	89
TABELA 11 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP2.....	91
TABELA 12 – DIFERENÇAS ENTRE CUSTOS E EFICIÊNCIAS DO GSIP1 E GSIP2.	92
TABELA 13 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP3.	94
TABELA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS GRANDEZAS DOS GERADORES ÓTIMOS PROJETADOS.	95
TABELA 15 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP3.....	96
TABELA 16 – DESVIO ENTRE O GSIP1 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	97
TABELA 17 – DESVIO ENTRE O GSIP2 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	98
TABELA 18 – DESVIO ENTRE O GSIP3 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
CEV	Computação Evolucionária
DE	<i>Differential Evolution</i>
ENSEEIH	<i>École Nationale Supérieure D'électrotechnique, D'informatique, D'hydraulique Et Des Télécommunicayions</i>
EFCAD	<i>Electromagnetic Fields Computer Aided Design</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GA	<i>Genetic Algorithms</i>
GSIP	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
LEEI	Laboratório de Engenharia Elétrica e Eletrônica Industrial
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOPSO	<i>Multi-Objective Particle Swarm Optimization</i>
NeFeB	Neodímio-Ferro-Boro
PSO	<i>Particle Swarm Otimization</i>
N	Polo Norte
S	Polo Sul
SQP	<i>Sequential Quadratic Programing</i>
UFSC	Universidade Federal De Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Ângulo de carga do gerador (rad)
θ_{rip}	Ângulo de inclinação da parede da ranhura (rad)
θ_{rc}	Ângulo do colarinho da ranhura (rad)
θ_{rt}	Ângulo ocupado pela ranhura no topo (rad)
θ_d	Ângulo ocupado pelo dente do estator (rad)
σ_0	Condutividade elétrica do material (1/ Ω .m);
ρ_v	Densidade volumétrica de carga elétrica (C/m ³)
η	Eficiência
ρ_f	Fator das perdas por Foucault (W/kg)
ρ_h	Fator das perdas por Histerese (W/kg)
ϕ	Fator de potência em graus (°)
ρ_{im}	Fator específico de perda nos ímãs (W/m ²)
ϕ_L	Fluxo magnético de um laço do gerador (mWb)
α_{ab}	Passo da bobina de armadura
α_r	Passo de ranhura
α_p	Passo polar (rad)
α_{pef}	Passo polar efetivo (rad)
μ_0	Permeabilidade magnética (H/m)
ϵ_0	Permissividade elétrica do material (F/m);
A_{acb}	Comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura (mm)
\vec{B}	Densidade de fluxo magnético ou indução magnética (T)
B_{ce}	Densidade de fluxo na coroa do estator (T)
B_{de}	Densidade de fluxo nos dentes do estator (T)
B_{op}	Densidade de fluxo operativa (T)
B_{op}	Densidade de fluxo remanente (T)
C_1	Coefficiente da componente cognitiva
C_2	Coefficiente da componente social
C_{a1e}	Comprimento de uma espira de armadura (mm)
C_{ax}	Comprimento axial da máquina (mm)
C_c	Custo do cobre (US\$/kg)
C_f	Custo do ferro (US\$/kg)

C_i	Custo do ímã (US\$/kg)
C_t	Custo total (US\$)
\vec{D}	Densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica (C/m ²)
D_c	Densidade do cobre (kg/mm ³)
D_{ee}	Diâmetro externo do estator (mm)
D_{ei}	Diâmetro interno do estator (mm)
D_f	Densidade do ferro (kg/mm ³)
D_{fre}	Diâmetro no fundo da ranhura do estator (mm)
D_i	Densidade do ímã (kg/mm ³)
D_{rbi}	Diâmetro na altura da base do ímã (mm)
D_{re}	Diâmetro externo do rotor (mm)
D_{ri}	Diâmetro interno do rotor (mm)
D_{rt}	Diâmetro na altura do topo da ranhura (mm)
D_{aab}	Passo da bobina de armadura (mm)
\vec{E}	Campo elétrico (V/m)
E_a	Tensão interna do gerador (V)
E_{abpf}	Encurtamento do passo de bobina
E_f	Comprimento do entreferro do gerador (mm)
$F(x^*)$	Ótimo global do problema de otimização
$F(x)$	Função objetivo do problema de otimização
f	Frequência (Hz)
f_p	Fator de potência
\vec{H}	Campo magnético (A/m)
\vec{H}_{lq}	Campo magnético líquido do gerador (A/m)
\vec{H}_r	Campo magnético do rotor (A/m)
\vec{H}_s	Campo magnético da reação de armadura (A/m)
$H(x)$	Vetor de restrições do problema de otimização
H_c	Campo magnetizante (A/m)
H_{ec}	Altura da coroa do estator (mm)
H_{im}	Altura do ímã (mm)
$H_{máx}$	Vetor com os limites máximos das restrições
$H_{mín}$	Vetor com os limites mínimos das restrições

H_{op}	Campo magnético operativo (A/m)
H_r	Campo magnético principal (A/m)
h_r	Altura da ranhura (mm)
h_{rc}	Altura do colarinho da ranhura (mm)
h_{rp}	Altura do pescoço da ranhura (mm)
I_a	Corrente de armadura do gerador (A)
\vec{j}	Densidade superficial de corrente (A/m ²)
J_a	Densidade de corrente de armadura (A/m ²)
K_{de}	Fator de ajuste do cálculo da densidade de fluxo nos dentes do estator
kF_{ce}	Fator empírico das perdas por Foucault na coroa do estator
kF_{de}	Fator empírico das perdas por Foucault nos dentes do estator
kH_{ce}	Fator empírico das perdas por Histerese na coroa do estator
kH_{de}	Fator empírico das perdas por Histerese nos dentes do estator
k_{adb}	Fator de distribuição da bobina de armadura
k_{aeb}	Fator de redução do fluxo pelo encurtamento da bobina
k_{cef}	Constante que controla o valor do comprimento do entreferro
k_{dl}	Constante que controla o valor do comprimento axial da máquina
k_{er}	Constante que controla o valor da altura da ranhura
k_{ic}	Constante que controla o valor da altura da coroa
k_{ra}	Constante que controla o valor da abertura de ranhura
k_{rc}	Constante que controla o valor da altura do colarinho da ranhura
k_{re}	Fator de enchimento da ranhura
k_{rp}	Constante que controla o valor da altura do pescoço da ranhura
k_{rt}	Constante que controla o valor do ângulo ocupado pela ranhura no topo
k_{ap}	Constante que controla o valor do passo efetivo
k_{ϕ}	Coefficiente do fluxo que cruza o entreferro
L_d	Indutância de eixo direto (mH)
L_{ef}	Indutância de entreferro (mH)
L_{im}	Largura do ímã (mm)
L_q	Indutância de eixo em quadratura (mH)
L_{ra}	Largura da abertura da ranhura (mm)
L_{ran}	Indutância de dispersão da ranhura (mH)

L_{rc}	Largura do colarinho da ranhura (mm)
L_{rf}	Largura da ranhura no fundo (mm)
L_{rt}	Largura da ranhura no topo (mm)
L_s	Indutância síncrona (mH)
M_c	Massa de cobre (kg)
M_{ef}	Indutância mútua de entreferro (mH)
M_f	Massa de ferro (kg)
M_{fcr}	Massa de ferro da coroa do rotor (kg)
M_{fec}	Massa de ferro da coroa do estator (kg)
M_{fed}	Massa de ferro dos dentes do estator (kg)
M_i	Massa de ímã (kg)
N_{abpff}	Número de bobinas por polo por fase
N_{at}	Número total de espiras da armadura por fase
N_{cp}	Número de caminhos paralelos
N_{cs}	Número de caminhos em série
N_r	Número de ranhuras do estator
N_{rc}	Número de camadas de condutores
n	Velocidade de rotação (rpm)
P	Número de polos do gerador
P_{hce}	Perdas por Histerese na coroa do estator (W)
P_{hde}	Perdas por Histerese nos dentes do estator (W)
P_I	Perdas nos ímas (W)
P_{ad}	Perdas adicionais (W)
P_c	Coeficiente de permeância
P_{cu}	Perdas no cobre (W)
P_{fce}	Perdas por Foucault na coroa do estator (W)
P_{fde}	Perdas por Foucault nos dentes do estator (W)
$P_{id}(t)$	Melhor posição visitada pela partícula
$P_{ig}(t)$	Melhor posição visitada pelo enxame
P_{rot}	Perdas rotacionais (W)
P_{tot}	Perdas rotacionais no GSIP (W)
R	Variável randômica

R_a	Resistência de uma fase do enrolamento de armadura (Ω)
R_{akm}	Resistividade do fio (Ω/km)
R_b	Resistividade de base (Ω)
S_{ac}	Área dos condutores de armadura (mm^2)
S_b	Seção de base (mm^2)
S_r	Área da ranhura (mm^2)
V_c	Volume de cobre (mm^3)
V_{fcr}	Volume de ferro na coroa do rotor (mm^3)
V_{fec}	Volume de ferro na coroa do estator (mm^3)
V_{fed}	Volume de ferro nos dentes do estator (mm^3)
V_i	Volume de ímã (mm^3)
$V_{id}(t)$	Velocidade no instante anterior
$V_{id}(t + 1)$	Velocidade no instante atual
V_t	Tensão terminal do gerador (V)
V_ϕ	Tensão terminal de fase (V)
$X_{id}(t)$	Posição no instante anterior
$X_{id}(t + 1)$	Posição no instante atual
X_s	Reatância síncrona do gerador (Ω)
X	Vetor de variáveis do problema de otimização
x^*	Coordenadas do ótimo global
$x_{máx}$	Limites máximos das variáveis de otimização
$x_{mín}$	Limites mínimos das variáveis de otimização
W	Coefficiente de inércia
Z_c	Vetor dos limites das restrições de igualdade
$Z(x)$	Vetor de restrições de igualdade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	20
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.3 JUSTIFICATIVA	25
1.4 OBJETIVOS	26
1.4.1 Objetivo geral	26
1.4.2 Objetivos específicos	26
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	26
2 GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES	28
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS	28
2.1.1 Estator	28
2.1.2 Rotor	29
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	30
2.3 CONFIGURAÇÕES DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES	32
2.3.1 Posições do estator e rotor do gerador	32
2.3.2 Topologia dos ímãs do rotor	33
2.4 ÍMÃS PERMANENTES	34
2.4.1 Coeficiente de Permeância	37
3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	39
3.1 DEFINIÇÕES DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	39
3.1.1 Fronteira de Pareto	41
3.2 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E ESTOCÁSTICOS	42
3.3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	44
4 USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA COMPARAÇÃO COM O MODELO ANALÍTICO	48
4.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL	48
4.1.1 Modelagem magnetostática	49
4.1.2 Modelagem magnetodinâmica	50
4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	50
4.2.1 Discretização do domínio	51
4.2.2 Condições de contorno	53
4.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	54

4.3.1 O PREFCAD	55
4.3.2 O EFMA	57
4.3.3 O PrP	57
5 PROJETO ÓTIMO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES	60
5.1 PRINCIPAIS DIMENSÕES DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES	60
5.2 PROJETO DO ROTOR.....	62
5.2.1 Modelo matemático para a densidade de fluxo operativa	64
5.3 PROJETO DO ESTATOR	65
5.4 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA E DA REATÂNCIA SÍNCRONA DO GSIP.....	69
5.4.1 Cálculo da resistência de armadura	69
5.4.2 Cálculo da indutância e reatância síncrona.....	70
5.5 CÁLCULO DA TENSÃO TERMINAL DO GSIP.....	70
5.6 CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA DO GSIP	71
5.7 CÁLCULO DAS MASSAS E DOS CUSTOS	72
5.8 CÁLCULO DAS PERDAS E DA EFICIÊNCIA DO GERADOR	73
5.8.1 Cálculo das perdas do GSIP	73
5.8.2 Cálculo da eficiência do GSIP	75
5.9 METODOLOGIA DE PROJETO	76
5.10 ELABORAÇÃO E SOLUÇÃO DOS PROJETOS ÓTIMOS PARA O GSIP.....	78
5.10.1 O problema de minimização de custo do GSIP	78
5.10.2 O problema de maximização da eficiência do GSIP	78
5.10.3 Obtenção da Fronteira de Pareto	79
5.10.4 Aplicação do PSO nos projeto ótimos do GSIP	80
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
6.1 PROJETO BASE DE UM GSIP	83
6.2 MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS DO GSIP	84
6.2.1 Solução do problema de otimização.....	84
6.2.2 Redução de custos em relação ao GSIP0.....	87
6.2.3 Minimizações de custo com valores fixos para o coeficiente de permeância	88
6.3 MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO GSIP	89
6.3.1 Solução do problema de otimização.....	89
6.3.2 Comparação de Desempenho e Custos entre os GSIP's Ótimos.....	91
6.4 ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO	92

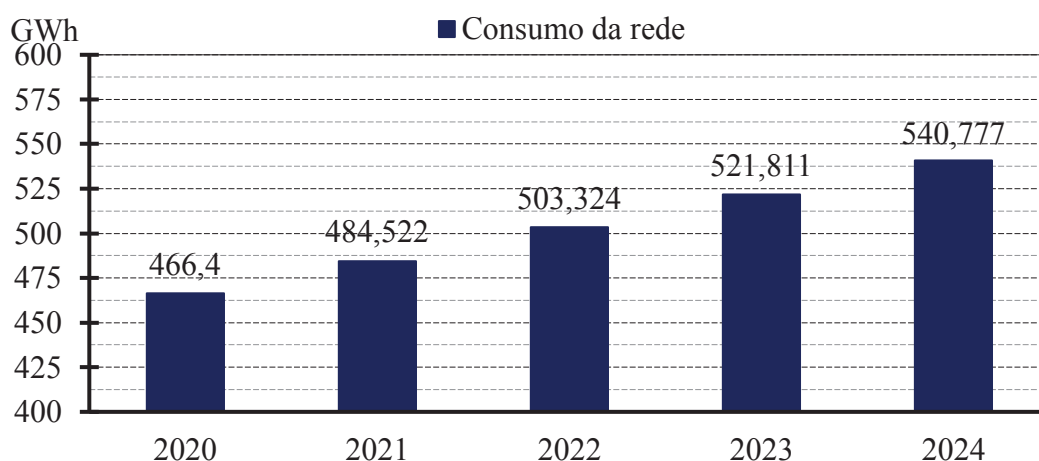
6.4.1 Análise do GSIP com melhor custo-benefício	94
6.5 COMPARAÇÃO DOS PROJETOS DO GSIP	96
6.5.1 Comparação do projeto ótimo de minimização de custos do GSIP.	97
6.5.2 Comparação do projeto ótimo de maximização da eficiência do GSIP.	98
6.5.3 Comparação do projeto ótimo considerando a fronteira de Pareto.	99
7 CONCLUSÕES.....	103
7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescimento da demanda de energia elétrica está relacionado com o crescimento da economia, que pode ser mensurado pelo Produto Interno Bruto (PIB) de um país. Estudos atuais realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), considerando o efeito da pandemia sobre a economia brasileira, apontam que a demanda de energia elétrica brasileira continua aumentando constantemente (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). Majoritariamente, a energia elétrica tem sido utilizada por consumidores industriais, comerciais e residenciais, contudo, o avanço tecnológico pode tornar a energia elétrica o “combustível” de meios de transporte (carros elétricos), alavancando ainda mais o consumo de energia. A Figura 1 apresenta o gráfico do consumo projetado de energia elétrica previsto entre os anos de 2020 até 2024.

FIGURA 1 – PROJEÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.

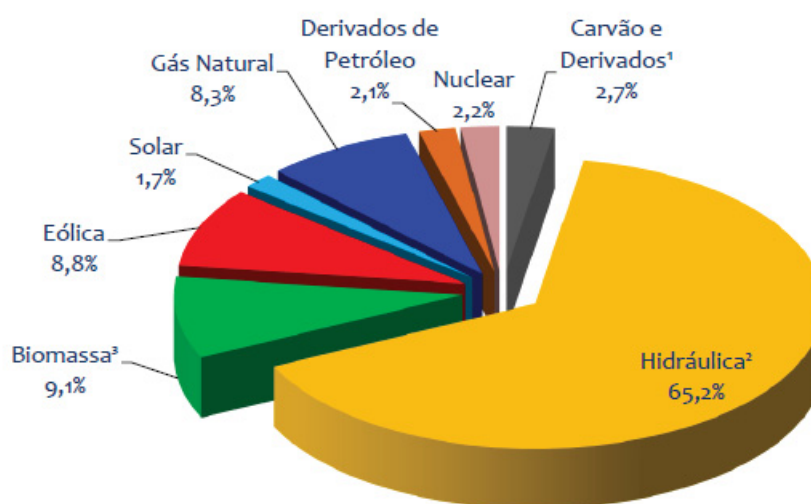


FONTE: Adaptado de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

A Figura 1 apresenta nas colunas azuis os valores de projeção de consumo de energia elétrica do sistema interligado nacional (SIN). No período de 2020 até 2024, o consumo do SIN tem um crescimento estimado de 3,8% anuais. Esse valor é uma média entre os valores de crescimento das classes de consumidores residenciais (4,0% ao ano), comerciais (4,1% ao ano) e industriais (3,2% ao ano) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020). A previsão de aumento no consumo retratado na Figura 1 deverá ser suprida pela conversão da energia de fontes primárias em energia elétrica, por meio de dispositivos eletromecânicos (geradores elétricos) ou por dispositivos eletrônicos (painéis fotovoltaicos).

A matriz elétrica brasileira é composta por diversas fontes de energia primária: hidráulica, carvoeira, nuclear, gás natural, eólica, biomassa, solar, entre outras. Entre as diversas fontes de energia exploradas, a grande maioria fazem uso de geradores elétricos para realizar a conversão da energia mecânica em elétrica, exceto no caso da energia solar. Como pode ser visto na Figura 2, a matriz elétrica brasileira possui a maior parte da geração de energia advinda de fontes de energias primárias que se utilizam de geradores síncronos na conversão de energia.

FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.



FONTE: Adaptado de (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

É sabido que as usinas hidráulicas, termelétricas e parte das eólicas utilizam-se de geradores síncronos na conversão da energia primária. Com isso, por meio da análise dos percentuais da Figura 2, estima-se que, aproximadamente, 93% da energia elétrica brasileira é extraída por meio geradores síncronos, sendo o uso de geradores de indução reservado a uma porção das usinas eólicas. Com o evidente aumento do consumo de energia elétrica e com o uso contínuo de geradores síncronos na extração da energia elétrica, exalta-se a importância do estudo do projeto dessas máquinas, através do qual, é possível projetar geradores de menor custo, ou ainda, aumentar sua eficiência.

Em muitas destas aplicações os geradores síncronos de ímãs permanentes (GSIP's) não são aplicáveis, por não permitirem a regulação da tensão através da excitação de campo. Entretanto, em alguns casos, como na energia eólica e nos pequenos aproveitamentos hidrelétricos, torna-se interessante operar com velocidade variável, para aproveitar melhor o recurso (vento ou água). Como a frequência gerada é variável, é necessário usar conversores eletrônicos de energia, que ajustam a tensão e a frequência entregues à rede, com isso, torna-se interessante a aplicação de geradores síncronos de ímãs permanentes. O aumento na eficiência

e a manutenção menos recorrente são vantagens conhecidas do GSIP em relação aos demais geradores, porém, o custo destes geradores retrai o crescimento de sua aplicação. Portanto, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas de modo a tornar este tipo de gerador mais competitivo comercialmente.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os geradores elétricos convertem a energia mecânica contida em fontes primárias (eólica, hidráulica, calorífica, marítima, entre outras) em energia elétrica disponível para consumo. Existem diversas topologias de geradores e sua aplicação está relacionada com as características da fonte primária de energia. O projeto desses dispositivos pode ser ajustado para cada fonte de energia e possuir diversos propósitos, tais como: a redução do custo de material ativo, o aumento da eficiência e a redução da massa do gerador (BOLDEA, 2016). Desse modo, o projetista é responsável pelas alterações das dimensões da máquina, de modo que, as metas de projeto sejam atendidas.

Os geradores elétricos subdividem-se em duas grandes famílias: síncronos ou assíncronos. Os assíncronos podem ter rotor de gaiola ou bobinado. Os síncronos podem ter polos salientes ou lisos, e podem ter o campo criado por ímãs permanentes ou enrolamentos excitados por corrente contínua (PYRHÖNEN, 2008). Os GSIP's usam ímãs para produzir o fluxo principal da máquina, agregando algumas vantagens a esse tipo de gerador em relação ao de rotor bobinado: inexistência de perdas no cobre do enrolamento de campo, o que contribui para um ganho de eficiência, além disso, o volume da máquina é menor devido à alta densidade de fluxo presente nos ímãs atuais, com isso, há um aumento na densidade de conjugado. Porém, o alto custo de material aplicado na construção desse tipo de máquina estimula que estudos de viabilidade sejam realizados para cada aplicação proposta (GÜNDOĞDU, 2011).

Por serem geradores amplamente aplicados na extração de energia de fontes renováveis, principalmente em aerogeradores, diversos trabalhos da academia propuseram alterações na topologia clássica de GSIP com ímãs alojados na superfície do rotor, almejando melhorar o desempenho da máquina e reduzir seus custos de produção. O emprego de ímãs enterrados, máquinas de fluxo axial, rotor externo e a substituição dos ímãs de terras raras por ímãs de ferrite, são alguns exemplos de modificações aplicadas. Geralmente, as alterações propostas na topologia clássica dificultam a modelagem analítica da máquina, tornando o cálculo de grandezas como a indutância, dependentes de modelagens semi-analíticas (uso de rede de relutâncias) ou de simulações computacionais, modelagens numéricas, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) (KOLZER, *et al.*, 2016), (ZHU, *et al.*, 2009), (MI, *et al.*,

2004). Além das alterações na topologia clássica do GSIP, o projeto dos geradores vem sendo abordado por meio de problemas de otimização, considerando modelagens distintas, para uma vasta gama de objetivos e aplicando inúmeros métodos de otimização, com o propósito de tornar o GSIP mais atrativos comercialmente.

O escopo principal do trabalho de Li, Chen e Polinder (2009) é realizar uma análise de custo-benefício de uma turbina eólica composta pela caixa de câmbio, um GSIP trifásico e o conversor eletrônico. No modelo magnético do GSIP, nota-se que a indução operativa do gerador é calculada analiticamente em função da indução remanente, permeabilidade relativa e dimensões do ímã, além de considerar o entreferro do gerador e o passor polar da máquina. A função objetivo é a redução do custo do GSIP, utilizando-se um algoritmo genético aprimorado na solução do problema de otimização, obtêm-se os resultados com uma maior redução de custos em relação aos trabalhos anteriores, entretanto, as perdas do GSIP aumentaram em relação ao trabalho comparado. Já o projeto ótimo mono-objetivo realizado em Resmini (2013) visa reduzir o custo de produção de um GSIP, sendo que a seção transversal projetada poderia ser utilizada em dois geradores, com especificações nominais de potência e tensão terminal distintas. A modelagem do GSIP dispunha de uma rede de relutâncias para o cálculo das densidades de fluxo em pontos estratégicos do gerador, as dimensões ótimas encontradas pelo algoritmo determinístico *Sequential Quadratic Programming* (SQP).

O trabalho de Karnavas e Korkas (2014) apresenta duas topologias de máquinas: rotor interno com os ímãs externos ao rotor e rotor externo com os ímãs internos ao rotor, ambas são analiticamente modeladas, desse modo, obteve-se os valores de indução magnética, indutância, resistência por fase e a partir delas, tensão terminal e potência da máquina. Dentre os objetivos do projeto estão a minimização: da massa total do gerador, da massa de ímãs e das perdas totais no cobre, para esse fim, três algoritmos de otimização são aplicados: um método quase-newton (SQP), algoritmos genéticos e o *pattern search*. O algoritmo genético foi apontado como o melhor método, por ter encontrado os menores valores da função objetivo, apesar de apresentar o maior custo computacional. Em Sarikhani e Mohammed (2014), propõe-se o modelo magnético de um GSIP baseado em uma simplificação da formulação utilizada no método dos elementos finitos 2D, desse modo, as densidades de fluxo nos pontos de interesse do gerador são obtidas por meio de uma modelagem numérica. Além disso, um modelo térmico é proposto para o gerador, por meio dele, altera-se o valor das resistências ao longo do processo de otimização, conforme a temperatura varia. Para realizar a minimização de massa o algoritmo de otimização escolhido foi o *Particle Swarm Optimization* (PSO). Os valores de massa são

comparados entre o modelo inicial e o obtido pelo algoritmo de otimização, comprovando que o algoritmo encontrou as dimensões que minimizam a massa.

Um projeto ótimo mono-objetivo multifísico de um GSIP aplicado a aerogeradores é apresentado em Bazzo *et al.* (2017). Consideram-se seis submodelos na modelagem do gerador: magnético, elétrico, mecânico, térmico, geométrico e econômico. Os submodelos interagem ao longo do processo de otimização, conforme as dimensões da máquina (modelo geométrico) são ajustadas por meio de um algoritmo determinístico (SQP). Os modelos elétrico, térmico, magnético e eletrônico calculam os valores de grandezas de interesse, como: potência, saturação, (através de uma rede de relutâncias), e perdas, enquanto o modelo econômico atualiza o custo do aerogerador. Já em Bazzo *et al.* (2016), o projeto ótimo mono-objetivo de um aerogerador considerou a curva de ocorrência de vento no problema de otimização, avaliando o desempenho do GSIP em 25 pontos operativos distintos. Desse modo, o SQP determina quais dimensões forneciam a máquina mais eficiente e em qual velocidade isso ocorre. O trabalho propôs encontrar o GSIP com o melhor compromisso entre o custo da máquina e a produção de energia durante a vida útil do gerador.

A otimização considerando diversos pontos operativos também foi estendida para outras aplicações do GSIP. Em Zhang *et al.* (2021) um GSIP foi aplicado a hidrelétricas por meio da utilização de conversores eletrônicos de potência. A otimização em diversos cenários hidrológicos ajuda na escolha dos parâmetros da máquina e permite um aumento significativo na eficiência global do gerador, visto que, o mesmo não opera sob o mesmo patamar hidrológico ao longo de todo ano. A validação dos resultados mostrou que a eficiência calculada com o modelo analítico aproximou-se dos valores obtidos experimentalmente. Já Gao *et al.* (2021) realiza a otimização de GSIP aplicados a veículos híbridos para diferentes intervalos de carga. Uma rede de relutâncias que considera o fluxo produzido no rotor foi utilizada para calcular as densidades de fluxo magnético ao longo do gerador e com isso refinar o cálculo das perdas do gerador. De posse da rede de relutâncias, uma otimização considerando múltiplos intervalos operativos é proposta, com isso, a eficiência da máquina é obtida para várias faixas de carregamento do gerador e a função objetivo é maximizar a eficiência multi-intervalar do gerador. A otimização considerando diversos intervalos de eficiência apresentou resultados superiores para todo o tipo de carregamento do gerador.

Os trabalhos citados exaltam as alterações na topologia do gerador, o uso de um conjunto híbrido de modelagens, otimizações mono e multiobjetivos e diversos algoritmos de otimização são empregados para melhorar o custo, eficiência e massa dos geradores estudados. Entretanto, o valor do coeficiente de permeância, usado nos projetos como uma relação da altura

do ímã com o comprimento do entreferro, é abordado, como uma constante do problema de otimização, (RESMINI, 2013), (BAZZO, *et al.*, 2016) e (BAZZO, *et al.*, 2017), ou ainda, não é utilizado na modelagem do gerador (LI, CHEN e POLINDER, 2009), (SARIKHANI e MOHAMMED, 2014), (KARNAVAS e KORKAS, 2014), (ZHANG, *et al.*, 2021) e (GAO, *et al.*, 2021).

Os equacionamentos que não utilizam o coeficiente de permeância no modelo do GSIP, não possuem uma variável garantindo que o ímã está operando longe da região de desmagnetização, dessa maneira, devem assegurar através de restrições impostas a outras variáveis do problema de otimização, que o ímã vai operar em uma região longe do joelho do laço de histerese. Os trabalhos que utilizam o coeficiente na modelagem com valor fixo acabam reduzindo o universo de soluções possíveis, como nem sempre uma escolha prévia deste coeficiente é a mais adequada, a melhor solução possível pode estar fora deste universo de soluções. À vista disso, permitir que o valor desse coeficiente seja atualizado, conforme o algoritmo de otimização ajusta os parâmetros do GSIP, torna esse parâmetro uma variável do problema de otimização, aumentando significativamente a liberdade do algoritmo de otimização na busca da melhor solução.

1.3 JUSTIFICATIVA

Via de regra, os projetos ótimos de GSIP vistos na academia são feitos para aplicações específicas, geralmente focados em aerogeradores e veículos híbridos, sem manifestar se a modelagem do projeto apresentada pode ser replicada para outra finalidade. Particularmente em Bazzo *et al.* (2017), nota-se que a modelagem apresentada pelo trabalho foi elaborada para ser aplicada a um problema de otimização. Entretanto, na maioria dos trabalhos a escolha das variáveis que participam do processo de otimização é pouco justificada.

Também é verificada pouca bibliografia sobre a modelagem do coeficiente de permeância como variável de um problema de otimização, quais variáveis a escolha deste coeficiente afeta e como sua modelagem pode contribuir em um melhor resultado no projeto ótimo de GSIP. Portanto, a metodologia de projeto proposta no trabalho, apresenta todas as variáveis envolvidas no processo de otimização de forma clara, além disso, justifica-se a escolhas das variáveis que fazem parte da otimização do gerador, bem como, os limites propostos para cada uma delas. Dentre as variáveis presentes no processo de otimização, ressalta-se o uso do coeficiente de permeância, que é utilizado na modelagem como variável do problema de otimização e contribui na melhoria dos resultados encontrados.

1.4 OBJETIVOS

Dado o pretexto apresentado no item 1.3, durante o desenvolvimento desta dissertação, que possui objetivo geral e objetivos específicos, almeja-se desenvolver uma metodologia clara de projeto para o GSIP, conforme os objetivos explanados a seguir são alcançados.

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral é realizar o projeto ótimo para um gerador síncrono de ímãs permanentes, com ímãs alojados na superfície do rotor.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Examinar a literatura técnico-científica sobre geradores elétricos, o projeto de GSIP's, o algoritmo da computação evolucionária e o método dos elementos finitos;
- Elaborar uma metodologia de projeto de um gerador síncrono de ímãs permanentes, com ímãs alojados na superfície do rotor;
- Elaborar problemas de otimização visando a redução do custo de material ativo e a maximização da eficiência do GSIP, usando o coeficiente de permeância como uma variável do problema de otimização;
- Determinar as dimensões ótimas do GSIP para os problemas de otimização elaborados, através do algoritmo de otimização estudado;
- Realizar uma análise da fronteira de Pareto, considerando a maximização da eficiência e a minimização dos custos;
- Realizar simulações computacionais, através do método dos elementos finitos 2D, comparando os resultados analíticos da modelagem proposta com os resultados obtidos numericamente.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este documento está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo contextualiza a demanda de energia elétrica crescente e apresenta a matriz energética brasileira, ressaltando a importância do estudo sobre projeto de geradores. A justificativa deste trabalho é corroborada pelo referencial teórico apresentado neste mesmo capítulo. No segundo capítulo, apresenta-se

o princípio de funcionamento do gerador síncrono de ímãs permanentes, seus aspectos construtivos, os tipos de geradores síncronos que utilizam ímãs permanentes, as características magnéticas dos ímãs permanentes utilizados e como o coeficiente de permeância pode alterar o projeto do gerador.

No capítulo três, conceitua-se um problema de otimização, partindo de suas definições sobre função objetivo e restrições do problema. Em seguida, as características dos algoritmos de otimização são abordadas, apresentando os conceitos de otimização e o algoritmo da computação evolucionária utilizado para solucionar os problemas de otimização elaborados. O quarto capítulo apresenta uma breve revisão sobre o conceito do método dos elementos finitos e os *softwares* utilizados na fase de validação dos projetos são apresentados de forma breve.

O quinto capítulo apresenta o projeto ótimo de um gerador síncrono de ímãs permanentes, o cálculo das massas, volumes e custos dos materiais ativos presentes no GSIP, além do cálculo das perdas e da eficiência do GSIP. Os problemas de otimização são propostos ao fim deste capítulo, bem como, as variáveis escolhidas para participarem do processo de otimização. O sexto capítulo apresenta os resultados do trabalho, as dimensões ótimas obtidas, as análises dos resultados das otimizações e as comparações dos projetos ótimos. No sétimo capítulo, a conclusão do trabalho discorre qualitativamente sobre os resultados obtidos e propostas de continuidade do trabalho são apresentadas.

2 GERADORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES

O gerador síncrono é uma máquina elétrica que converte energia mecânica em energia elétrica, em que os campos magnéticos do estator e do rotor, giram na mesma frequência da rede à qual o gerador está conectado, no caso de uma máquina de dois polos. Portanto, um gerador síncrono, em condições operativas normais, tem a velocidade de operação definida pela rede à qual está conectado, a chamada velocidade síncrona (UMANS, 2014).

Diferentemente dos geradores síncronos com rotor bobinado, que necessitam de enrolamentos de campo e da presença de uma corrente de excitação (contínua) para gerar o fluxo principal do gerador, os GSIP's fazem uso de ímãs permanentes para gerar o campo. Com a substituição do rotor bobinado pelo rotor com ímãs, há uma redução de material utilizado, promovendo um aumento da densidade de energia em geradores de ímãs permanentes, quando comparados aos seus equivalentes de rotor bobinado (GÜNDOĞDU, 2011).

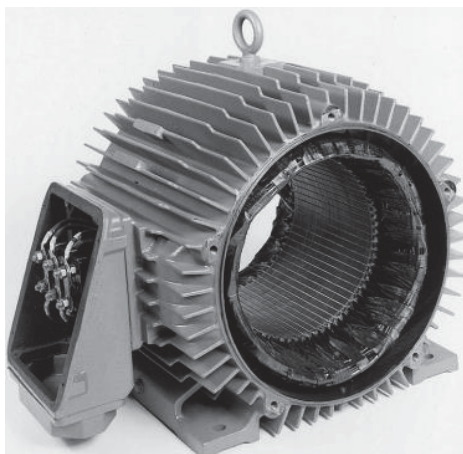
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O gerador síncrono de ímãs permanentes é composto por duas partes que não possuem contato elétrico, mas que interagem por meio de campos magnéticos: o rotor, parte móvel, onde ficam alojados os ímãs do gerador e o estator, parte fixa, onde estão os enrolamentos de armadura.

2.1.1 Estator

As características construtivas do estator de um GSIP são similares às de um gerador de rotor bobinado e até mesmo às de um motor de indução. A parte mais externa do estator é a carcaça, responsável pela proteção mecânica e suporte estrutural da parte ativa do gerador, que pode possuir aletas para contribuir na troca térmica com o ambiente externo. O núcleo ferromagnético do estator é formado por chapas empilhadas, para reduzir as perdas no ferro. As chapas de aço magnético possuem ranhuras onde se alojam os enrolamentos da armadura, normalmente de cobre. A grande maioria dos geradores síncronos são trifásicos, portanto, suas bobinas de armadura estão dispostas de forma que suas fases apresentem uma defasagem de 120° elétricos entre si (CHAPMAN, 2013). O aço que constitui as chapas apresenta uma alta permeabilidade, gerando um caminho magnético de baixa relutância, por onde o fluxo que atravessa o entreferro circula, na Figura 3 é visto o estator de um GSIP.

FIGURA 3 – ESTATOR DO GSIP.



FONTE: Adaptado de (HUGHES, 2006).

2.1.2 Rotor

O rotor de um gerador de ímãs permanentes é formado por um núcleo magnético, que pode ser inteiriço, ou formado por chapas de aço magnético, e pelos ímãs do gerador. O núcleo do rotor é percorrido pelo fluxo que atravessa o entreferro e retorna para o rotor da máquina, fechando um laço de fluxo. Os ímãs utilizados atualmente são de terras raras, particularmente de Neodímio-Ferro-Boro (NeFeB), e são responsáveis pela criação do fluxo principal da máquina. O rotor de um GSIP com ímãs alojados na superfície do rotor é visto na Figura 4.

FIGURA 4 – ROTOR DE UM GSIP.



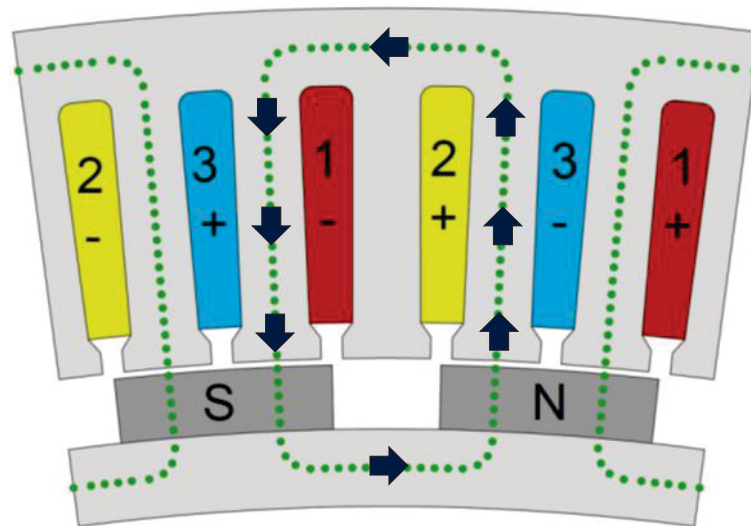
FONTE: Adaptado de (EBAY, 2020).

Os ímãs do rotor podem ser posicionados de diversos modos: internos, superficiais ou enterrados, na Figura 4, os ímãs estão inseridos na superfície do rotor. No item 2.3.2, a posição dos ímãs no rotor do GSIP é abordada de forma mais detalhada.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A principal função de um gerador é a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Os ímãs alojados no rotor de um GSIP produzem um campo magnético, cuja componente radial atravessa o entreferro da máquina, as bobinas de armadura enlaçam este fluxo, que é variante no tempo (do ponto de vista das bobinas de armadura) quando a máquina está em rotação, uma tensão é induzida nos terminais do gerador (BOLDEA, 2016). A Figura 5 apresenta a seção transversal de um GSIP e ilustra o caminho percorrido pelo fluxo magnético.

FIGURA 5 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM GSIP.



FONTE: Adaptado de (BAZZO, 2017).

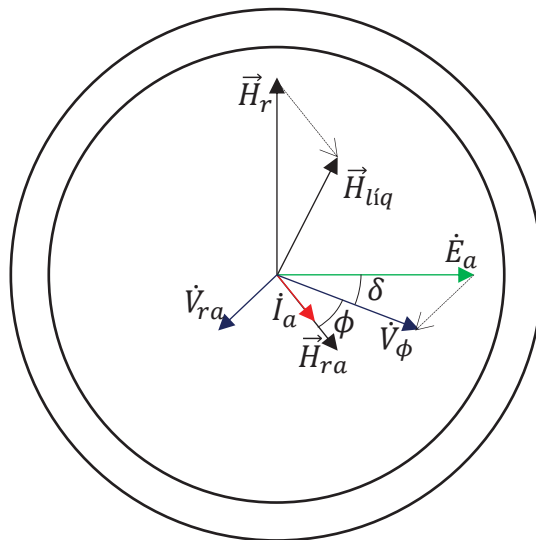
Na Figura 5, são vistos dois polos adjacentes alojados na superfície do rotor, um norte (que direciona o fluxo para o exterior) e outro sul (que direciona o fluxo para o interior), de um GSIP, bem como as ranhuras do estator do GSIP, as quais estão enumeradas de 1 até 3, indicando as fases do gerador, com sinais positivos e negativos, que indicam a polaridade de cada um dos condutores de armadura. Uma linha de fluxo com um laço magnético completo é vista no centro da Figura 5. O fluxo gerado pelo rotor, no polo norte (N), atravessa o entreferro e ingressa no estator pelos dentes, percorre azimuthalmente a coroa do estator até que tenha completado passo polar. Logo após, o fluxo retorna ao seu curso radial, em direção ao rotor do GSIP, atravessa novamente o entreferro, ingressa no rotor pelo polo sul (S) e retorna ao polo norte (N) pela coroa do rotor, fechando o laço.

O princípio de funcionamento de um GSIP pode ser embasado na Lei de Faraday e na Lei de Ampère, quando o GSIP é acionado, o rotor da máquina gira e as bobinas de armadura enlaçam um fluxo que varia no tempo, gerando tensão elétrica nos terminais do GSIP, como enuncia a Lei de Faraday. Quando o gerador alimenta uma carga, há corrente circulando pelos enrolamentos de armadura, essa corrente produz um campo magnético, como enuncia a Lei de Ampère, que vai interagir com o campo principal da máquina.

A análise do princípio de funcionamento do GSIP considera apenas um campo magnético presente no gerador, entretanto, quando um gerador é acionado, existem dois campos magnéticos interagindo na máquina, o campo principal, proveniente dos ímãs do rotor, e o campo de reação de armadura, originado pela corrente elétrica alternada, que circula nos condutores de armadura do gerador, quando uma carga é conectada em seus terminais. Desse modo, o caminho de fluxo visto na Figura 5, é percorrido pelo campo líquido ($\vec{H}_{líq}$) do GSIP, obtido pela soma vetorial do campo principal (\vec{H}_r) com o campo de reação de armadura (\vec{H}_{ra}), visto na Equação (1). Já a Figura 6 ilustra a interação dos campos magnéticos presentes em um gerador.

$$\vec{H}_{líq} = \vec{H}_r + \vec{H}_{ra} \quad (1)$$

FIGURA 6 – INTERAÇÃO DOS CAMPOS MAGNÉTICOS EM UM GSIP QUANDO ALIMENTA UMA CARGA INDUTIVA.



FONTE: O autor (2021).

Pela inspeção da Figura 6, percebe-se que quando o gerador alimenta uma carga, o campo principal do gerador (\vec{H}_r) interage com o campo magnético produzido pela corrente de

armadura (\dot{I}_a), o campo de reação de armadura (\vec{H}_{ra}), que se origina de modo a enfraquecer o campo principal da máquina. Pela soma vetorial dos campos, o campo líquido do GSIP (\vec{H}_{liq}) é obtido, e considerando-se a lei de Faraday, a tensão terminal do gerador (\dot{V}_ϕ) pode ser calculada. Também é possível obter a tensão terminal da máquina, partindo do fato que o campo principal do gerador induz uma tensão interna (\dot{E}_a) nas bobinas do estator, assim como, o campo de reação de armadura também produz uma tensão nas bobinas do estator (\dot{V}_{ra}), tensão que se opõe à tensão interna da máquina. Desse modo, realizando a soma vetorial das tensões produzidas, obtém-se, novamente, a tensão terminal do gerador, defasada ângulo de carga (δ) em relação à tensão interna da máquina e defasada com o ângulo (ϕ) em relação à corrente. Desse modo, a tensão terminal da máquina é composta pela tensão interna do gerador e pelas componentes de queda de tensão, vistas em:

$$\dot{V}_\phi = \dot{E}_a - j \cdot X_s \cdot \dot{I}_a - R_a \cdot \dot{I}_a \quad (2)$$

Nota-se que a Equação (2) é composta por três componentes, sendo a primeira conhecida como a tensão interna da máquina (\dot{E}_a), proveniente do campo principal do GSIP, fornecido pelos ímãs presentes no rotor. A segunda componente refere-se à reação de armadura do gerador, originada pela presença do campo \vec{H}_{ra} e mensurada através da reatância síncrona do gerador, X_s . Por convenção, a componente X_s , também inclui o efeito da queda de tensão devido à indutância da bobina. Finalmente, a última componente é devido à queda de tensão na resistência de armadura do GSIP.

2.3 CONFIGURAÇÕES DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

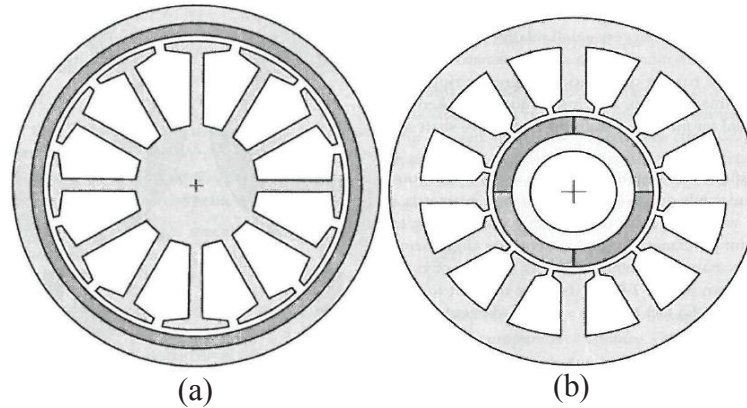
O fluxo principal da máquina pode possuir orientação: axial, radial ou transversal. A posição do estator e do rotor do gerador pode ser adaptada às necessidades de projeto. Ademais, a posição dos ímãs do rotor, também pode ser alterada e ajustada de forma que o GSIP projetado, beneficie-se dessas alterações.

2.3.1 Posições do estator e rotor do gerador

Tradicionalmente, os GSIP's possuem rotores internos, sendo o eixo acoplado na coroa do rotor (parte móvel) e o estator do gerador (parte estática) posicionado externamente ao rotor. Dessa forma, o caminho percorrido por um laço de fluxo é descrito conforme apresentado no item 2.2. Já o laço de fluxo produzido por geradores com rotores externos, origina-se no rotor externo do GSIP, onde está acoplado o eixo de rotação, e é enlaçado pelas bobinas de armadura

do estator interno da máquina. A Figura 7(a) apresenta um GSIP com rotor externo, já a Figura 7(b), apresenta um GSIP de rotor interno.

FIGURA 7 – GSIP COM ROTOR INTERNO E GSIP COM ROTOR EXTERNO.



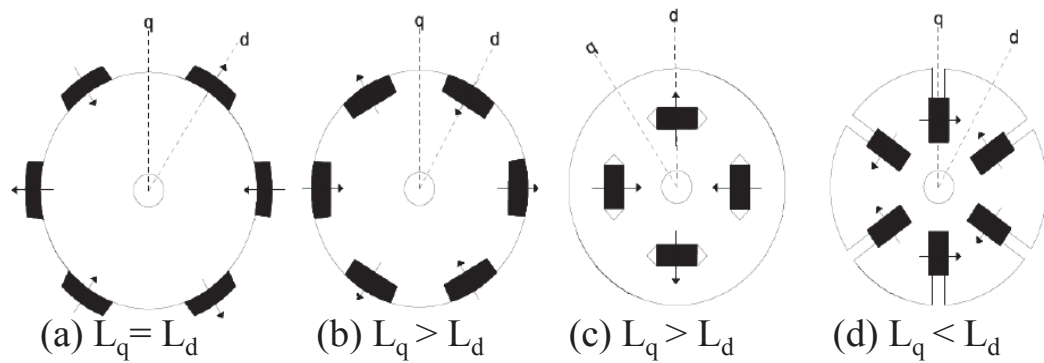
FONTE: Adaptado de (HANSELMAN, 2003).

2.3.2 Topologia dos ímãs do rotor

Os ímãs dos geradores de magnetização radial podem ser dispostos de diversos modos. A posição adotada para os ímãs altera os caminhos de fluxo da máquina, tornando a relutância experimentada pelo fluxo variável, no caso de máquinas com polos salientes. A Figura 8 apresenta algumas das topologias de ímãs nos rotores mais utilizadas, sendo na Figura 8(a) um GSIP de polos lisos e para as Figura 8(b), (c) e (d) GSIP's de polos salientes.

Quando a relutância é variável (polos salientes), como nas máquinas das Figura 8(b), (c) e (d), é necessário adotar uma metodologia de análise diferente, pois a contribuição da corrente de armadura para criação do campo de reação de armadura, depende do ângulo da corrente (fator de potência da carga), distintivamente da máquina em que a relutância é constante (polos lisos). Nesta abordagem, a corrente de armadura é decomposta em duas componentes, uma alinhada ao eixo direto e outra alinhada ao eixo em quadratura. Portanto, a representação da queda de tensão devido à reação de armadura por meio de uma componente única, X_s , não faz mais sentido, dito isso, utiliza-se duas componentes de reatância: a reatância de eixo direto (X_d) e a reatância de eixo em quadratura (X_q). Nesta dissertação, a abordagem da representação do campo nas duas componentes não é abordada de forma profunda, pois o trabalho aborda o projeto de uma máquina de polos lisos.

FIGURA 8 – TOPOLOGIAS DOS ÍMÃS PERMANENTES.



FONTE: Adaptado de (CAETANO, 2013).

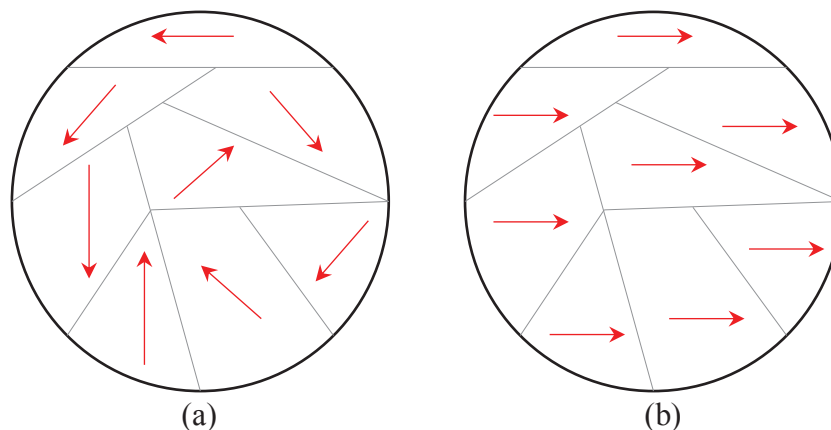
A Figura 8(a) mostra o rotor de um GSIP com os ímãs alojados na superfície do rotor, pelo fato da permeabilidade magnética dos ímãs ser muito próxima a permeabilidade do entreferro, a relutância ao longo do entreferro é praticamente constante, portanto, L_d e L_q são aproximadamente iguais. A Figura 8(b) apresenta um GSIP com os ímãs inseridos no interior do rotor, pelo fato dos ímãs possuírem permeabilidade magnética próxima a do entreferro, a relutância vista pelo fluxo na linha do ímã, que está localizado sobre o eixo direto (caminho principal do fluxo do rotor), é maior quando comparada com a região interpolar, localizada sobre o eixo em quadratura, portanto, tem-se que $L_d < L_q$. As duas últimas configurações, vistas em Figura 8(c) e Figura 8(d), são conhecidas como ímãs permanentes enterrados. Em ambos geradores, a relutância vista pelo fluxo na linha do ímã e a relutância na linha interpolar são diferentes, logo, os valores de L_d e L_q são diferentes, com $L_d < L_q$ para o caso da Figura 8(c) e $L_d > L_q$ para o gerador da Figura 8(d).

2.4 ÍMÃS PERMANENTES

Os ímãs permanentes fazem parte de uma classe de materiais denominada materiais ferromagnéticos, que são conhecidos pela sua propriedade de reter a magnetização. O fenômeno de magnetização dos materiais está atrelado a mudanças microscópicas que ocorrem em cada átomo do material. Cada átomo é composto por um núcleo, região maciça, densa e estática que se localiza no centro do átomo, composta por prótons e nêutrons, e pela eletrosfera, que é a região mais periférica do átomo, onde ficam os elétrons. Os elétrons movem-se em torno do núcleo regidos por dois movimentos, o de translação ao redor do núcleo e o de rotação em torno de seu próprio eixo, fenômeno também denominado como *spin* do elétron (KAKANI e KAKANI, 2004).

Pela lei de Ampère, sabe-se que cargas em movimento geram um campo magnético, logo, o movimento dos elétrons de cada átomo (translação e rotação), produzem um campo magnético. A maioria dos materiais, possui um campo magnético líquido nulo, ou seja, para todos os elétrons que se movimentam e geram um campo magnético em um sentido, existe um elétron análogo, mas com o sentido oposto de movimento, anulando o efeito do primeiro campo magnético gerado. Entretanto, há materiais que possuem um campo magnético líquido não-nulo, nesses casos, nota-se que os átomos agrupam-se formando domínios magnéticos, que possuem uma orientação resultante (CALLISTER, 2007). De forma simplificada, assume-se que quando esses materiais são expostos a um campo magnético externo, a orientação resultante desses domínios tendem a se alinhar com a orientação do campo magnético externo, magnetizando o material em um sentido, determinado pelo sentido do campo externo, como é visto na Figura 9.

FIGURA 9 – DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DE UM MATERIAL.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 9(a) ilustra os domínios magnéticos de um material sem ter sido exposto a um campo magnético, percebe-se que cada domínio possui uma orientação distinta, já na Figura 9(b), ilustra os domínios magnéticos do material após a exposição do material a um campo magnético, com orientação para a direita. Desse modo, a orientação de cada um dos domínios alinha-se com a orientação do campo magnético externo, magnetizando o material no sentido desejado (COEY, 2009).

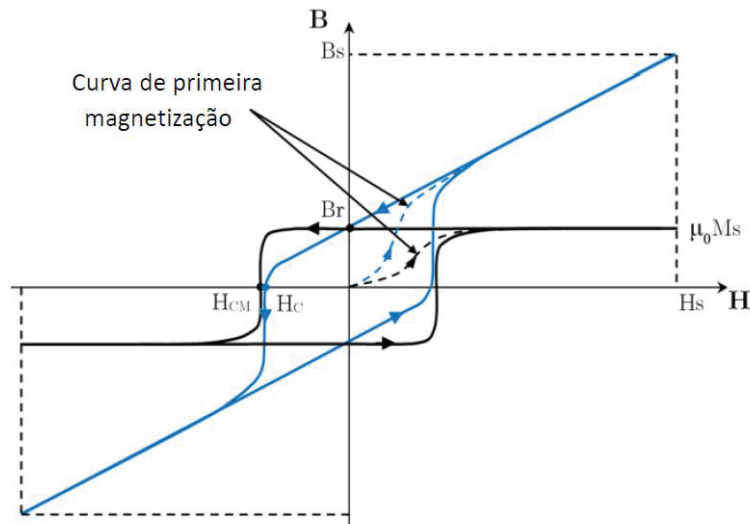
A indução magnética no interior de um material é regido pela expressão :

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (3)$$

onde a indução (B) é formada pela parcela do campo aplicado ao material (H) e pela parcela de campo fornecida pelo próprio material (M), conhecida como magnetização do material. A

análise das características magnéticas dos materiais é, normalmente, realizada através da curva de histerese do material, gerada por meio da resposta do material em função do campo magnético que está sendo aplicado a ele. A resposta do material pode ser dividida em duas parcelas, a indução magnética do material devido ao campo externo e a magnetização, como ilustra a Figura 10 (FRATILA, 2014).

FIGURA 10 – LAÇO DE HISTERESE DE UM MATERIAL.



FONTE: Adaptado de (FRATILA, 2014).

A Figura 10 ilustra a resposta de um material exposto a um campo magnético, de valor máximo limitado a H_s . Percebe-se que as duas componentes de resposta do material possuem comportamentos distintos. A magnetização do material não cresce indefinidamente, conforme o campo externo cresce, ela possui um limite máximo, atrelado ao fato de que se todos os microscópicos domínios magnéticos do material já estiverem alinhados com o campo externo, não importa a magnitude do campo externo, a magnetização do material não aumenta. Por outro lado, a indução magnética do material continua aumentando, conforme aumenta-se o campo externo (H), visto na Equação (3).

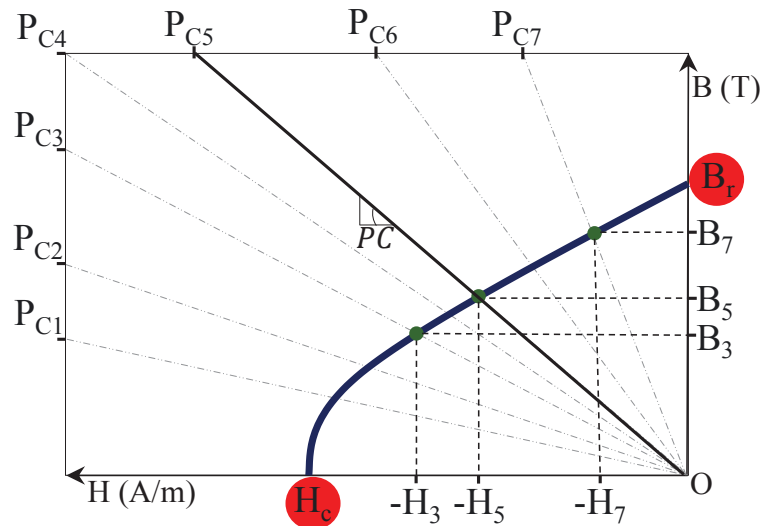
Ressaltam-se três pontos importantes do laço de histerese, a indução remanente (B_r), a força coercitiva (H_c) e o campo (H_{cm}). O valor de indução remanente define a quantidade de indução que o material fornece quando o campo externo é retirado, já a força coercitiva, define a quantidade de campo magnético que deve ser aplicada para inverter o sentido da indução magnética do material e por fim, H_{cm} , que pode ser compreendido como o campo magnético necessário para desmagnetizar o material. Os ímãs presentes em um gerador síncrono, estão expostos à ação de um campo magnético externo (campo de reação de armadura), que se opõe ao sentido de magnetização do material, portanto, a região operativa de um ímã permanente é

o segundo quadrante do laço de histerese. Vale ressaltar que o valor de indução fornecido pelo ímã, não é igual ao valor da indução remanente, esta indução fornecida pelo ímã depende das características do circuito magnético em que o ímã está inserido; considerando-se algumas simplificações, pode ser determinada por uma constante utilizada no projeto do GSIP, o coeficiente de permeância (HENDERSHOT e MILLER, 2010).

2.4.1 Coeficiente de Permeância

A Figura 11 apresenta o segundo quadrante de um laço de histerese, onde se notam três pontos destacados (B_3 , B_5 e B_7), cada um deles possui projeções nos eixos B e H. Cada uma dessas projeções possui duas coordenadas (H_{op}, B_{op}) que são conhecidas como campo e indução operativas dos ímãs, ou seja, o par ordenado (H_5, B_5) fornece os valores operativos de B e H, considerando o P_{C5} . Cada um dos pontos é determinado pela reta de carga, que parte da origem e intercepta o laço de histerese no segundo quadrante, cada uma dessas retas possui inclinação diferente, variando essa inclinação, variam também os valores de campo e indução operativa (H_{op}, B_{op}). A inclinação dessas retas é conhecida como coeficiente de permeância (P_c). Tradicionalmente, é convencionado que as curvas apresentem marcações dos coeficientes de permeância nas bordas superior e esquerda do gráfico, como mostra a Figura 11.

FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DO SEGUNDO QUADRANTE DE UM LAÇO DE HISTERESE.



FONTE: O autor (2021).

Nota-se que a escolha do valor do coeficiente de permeância determina o valor da indução magnética fornecida pelo ímã, em outras palavras, optando-se pelo coeficiente de permeância $-P_{C5}$, a componente de indução magnética, indução operativa (B_5), para esse ponto, será menor que a indução magnética operativa (B_7) dada pelo coeficiente de permeância $-P_{C7}$.

Para GSIP's com ímãs alojados na superfície do rotor, topologia vista na Figura 8(a), define-se, de forma aproximada, o coeficiente de permeância como sendo a razão entre a altura dos ímãs pelo valor do comprimento do entreferro do gerador (HANSELMAN, 2003).

$$P_c = \frac{H_{im}}{E_f} \quad (4)$$

Haja vista a relação, vista na Equação (4), existente entre as dimensões do GSIP e o valor do coeficiente de permeância, percebe-se o compromisso que deve ser assumido na escolha deste parâmetro. Considerando a manutenção da potência elétrica fornecida pelo gerador, a escolha de maiores valores do coeficiente de permeância, por exemplo, o -P_{C7}- visto na Figura 11, permitiria uma redução nas demais dimensões da máquina em comparação com o P_{C5}, por exemplo. Entretanto, o aumento das dimensões dos ímãs aumentaria o custo da máquina. Com valores menores do coeficiente de permeância, por exemplo -P_{C3}- visto na Figura 11, há uma redução da dimensão dos ímãs, reduzindo o custo do gerador, já que os ímãs são a matéria-prima mais cara da máquina. A redução do coeficiente de permeância promove uma redução na indução operativa entregue pelo ímã e para manter o fluxo fornecido pelo rotor, a área do ímã deve ser ajustada, acarretando no aumento de outras dimensões da máquina, como comprimento axial ou o diâmetro do rotor.

Notoriamente, a escolha do coeficiente de permeância interfere na escolha de outras dimensões do GSIP e deve ser ajustada em conjunto com as demais dimensões do gerador. A escolha de parâmetros para o gerador buscando uma melhoria em uma característica específica da máquina, como por exemplo o custo, caracteriza o projeto do gerador como um problema de otimização, que deve ser abordado de modo que o algoritmo tenha a liberdade de escolher o valor atribuído ao coeficiente de permeância, dada sua relação direta com dimensões da máquina e com o valor do fluxo principal do gerador.

3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

3.1 DEFINIÇÕES DE UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Um problema de otimização pode ser definido como uma modelagem matemática de um fenômeno físico, do qual, pretende-se extrair os mínimos ou máximos valores de uma função que representa uma grandeza desse sistema físico, dentro de uma região no espaço de busca. Em termos matemáticos, o processo de otimização é conhecido como “programação” e possui características peculiares dependendo da modelagem adotada. As equações que modelam um problema de otimização podem ser lineares ou não-lineares. Além disso, as variáveis do problema podem ser contínuas, discretas ou inteiras, diversificando ainda mais os algoritmos que podem ser utilizados para encontrar o ponto ótimo de cada problema de otimização (LUENBERGER e YE, 2016). As características dos problemas de otimização são definidas pelas equações que regem o problema, um problema de otimização pode ser descrito pelo conjunto de Equações (5) - (8):

$$\text{Máx } [F(x)] \text{ ou Min } [F(x)] \quad (5)$$

$$H_{\text{mín}} \leq H(x) \leq H_{\text{máx}} \quad (6)$$

$$Z(x) = Z_c \quad (7)$$

$$x_{\text{mín}} \leq x \leq x_{\text{máx}} \quad (8)$$

onde:

- $F(x)$: é a função objetivo do problema de otimização;
- $H(x)$: é o vetor de restrições de desigualdade, limitado pelos vetores de máximo ($H_{\text{máx}}$) e mínimo ($H_{\text{mín}}$) valores que podem ser assumidos, pelas funções contidas em ($H(x)$);
- $Z(x)$: é o vetor de restrições de igualdades, limitado pelo vetor que contém os valores que devem ser assumidos (Z_c) pelas variáveis contidas no vetor ($Z(x)$);
- x : é o vetor de variáveis do problema de otimização, seus valores podem ser livres ou restringidos por vetor de valores mínimos ($x_{\text{mín}}$) e máximos ($x_{\text{máx}}$).

Dadas as equações que modelam o problema de otimização é possível realizar uma caracterização do problema. A começar pela Equação (5), nota-se que a função objetivo pode ser considerada como um escalar, caracterizando um problema de otimização mono-objetivo ou de um vetor, nesse caso, o modelo é chamado de multiobjetivo. Os vetores de Equações (6) e (7) caracterizam o problema como restrito, ou seja, havendo restrições, o espaço de busca é

limitado, e as soluções contidas dentro do subespaço que respeita as restrições, são conhecidas como soluções factíveis. Com base na Equação (8), constata-se que as variáveis do problema de otimização podem ser restritas a uma determinada faixa de valores (WILLIAMS, 2013).

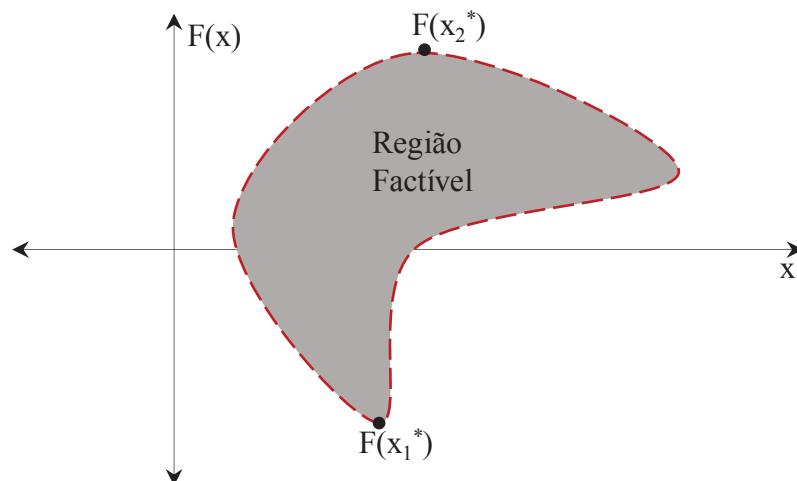
Os vários métodos de otimização existentes em muitos aspectos. Entretanto, de maneira geral, todos métodos buscam encontrar o ótimo global da função objetivo do problema dentro da faixa de valores permitidas para cada variável, respeitando todo o conjunto de restrições (6) e (7), se existirem. O ótimo global de uma função pode ser definido como o maior ou menor valor de uma função, para todo o seu domínio. As Equações (9) e (10) definem matematicamente os ótimos globais de uma função $F(x)$.

$$F(x_1^*) \leq F(x) \quad (9)$$

$$F(x_2^*) \geq F(x) \quad (10)$$

Define-se como mínimo global de uma função, visto na Equação (9), o valor da função $F(x)$ obtido no ponto x_1^* que fornece o menor valor da função objetivo para todo o domínio de $F(x)$, dentro da região factível. Já o máximo global de uma função, definido na Equação (10), é o valor da função $F(x)$ obtido no ponto x_2^* que fornece o maior valor da função objetivo para todo o domínio de $F(x)$, dentro da região factível (BERTSEKAS, 1999). A Figura 12 ilustra o espaço de busca de um problema de otimização.

FIGURA 12 – ILUSTRAÇÃO DA REGIÃO FACTÍVEL DE UMA FUNÇÃO $F(x)$.



FONTE: O autor (2021).

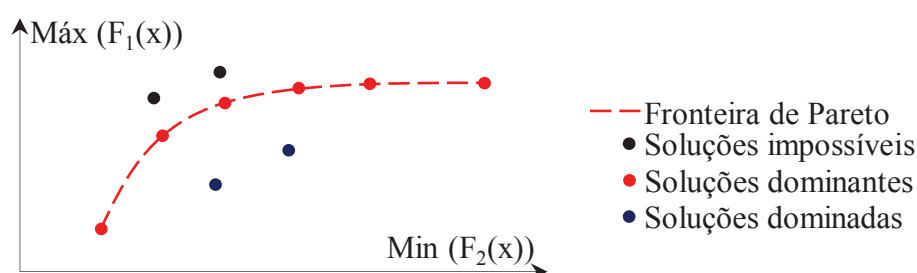
Nota-se na Figura 12, que a região factível, subconjunto do domínio de $F(x)$, onde os valores de x respeitam as restrições impostas, está separada do restante do domínio da função por um contorno tracejado, esse contorno é definido pelas restrições do problema, Equações (6) e (7). Ressaltam-se dois pontos dentro da região factível do problema, x_1^* e x_2^* , visivelmente,

são os valores de mínimo e máximo global da função $F(x)$. Pondera-se que as restrições de um problema de otimização limitam (reduzem) o tamanho do espaço de busca, logo, um problema de otimização restrito tem seu espaço de busca finito, já um problema de otimização irrestrito, que não possui restrições, tem seu espaço de busca infinito.

3.1.1 Fronteira de Pareto

Quando existem objetivos contraditórios em um problema de otimização, ou seja, para melhorar um dos objetivos é preciso piorar o outro, as soluções do problema de otimização estão contidas na fronteira de Pareto do problema de otimização. Nestes casos, a definição de para as soluções ótimas existentes é que nenhuma variável do problema de otimização pode melhorar a solução, sem piorar pelo menos outro objetivo do problema de otimização (LOBATO, 2008). A Figura 13 apresenta uma fronteira de Pareto ilustrativa, considerando um problema de otimização biobjetivo, sendo cada um dos objetivos definido por uma função $F_1(x)$ e $F_2(x)$.

FIGURA 13 – FRONTEIRA DE PARETO.



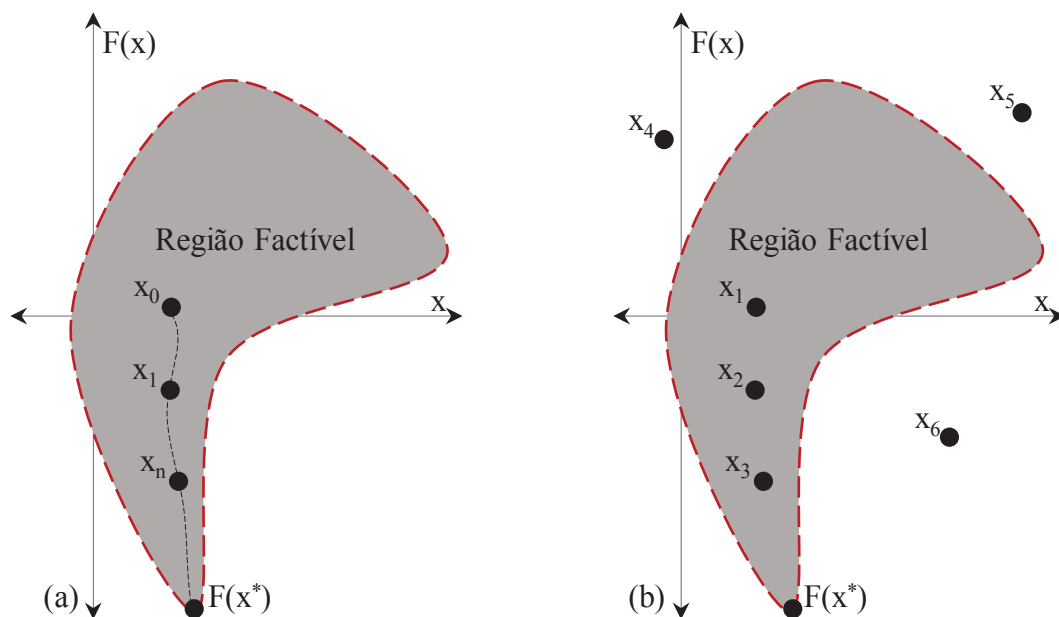
FONTE: Adaptado de (BAZZO, 2017).

Nota-se que existem três tipos de soluções na Figura 13, as soluções impossíveis, as soluções dominantes e as soluções dominadas, além da fronteira de Pareto. Define-se uma solução como impossível, aquela solução que não respeita pelo menos uma das restrições do problema de otimização, logo, ela poderia ser a melhor solução (comparada com as demais) caso as restrições do problema de otimização não existissem. As soluções dominadas existem quando há pelo menos uma solução superior a elas nos dois objetivos do problema. A fronteira de Pareto é uma linha, considerando um problema biobjetivo, sob a qual estão as soluções dominantes do problema de otimização, que são assim denominadas, por não existir nenhuma solução possível que as domine (MALAGOLI, 2016).

3.2 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E ESTOCÁSTICOS

Os algoritmos de otimização subdividem-se em duas grandes famílias: os algoritmos determinísticos, em sua grande maioria, baseados na informação das derivadas da função objetivo, em relação às variáveis do problema, para encontrar o ponto ótimo da função e os algoritmos estocásticos, baseados em métodos populacionais, onde existem diversas soluções candidatas, como possíveis soluções do problema. Os métodos determinísticos, por serem baseados em derivadas, convergem para o mesmo ponto ótimo para todas as vezes que o algoritmo for executado, condição válida somente se o ponto inicial for o mesmo para todas as simulações (GILL e MURRAY, 1997). Já os algoritmos estocásticos, por possuírem variáveis aleatórias nas formulações, mesmo partindo do mesmo ponto inicial para todas as simulações, não garantem que o algoritmo converge para o mesmo ponto ótimo em todas as simulações. A Figura 14 apresenta algumas diferenças entre os algoritmos, considerando uma função objetivo $F(x)$ e um domínio x , em ambos os casos.

FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE BUSCA DO PONTO ÓTIMO DE UMA FUNÇÃO $F(x)$.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 14(a) ilustra o espaço de busca de um problema de minimização, com um mínimo global evidenciado, através de $F(x^*)$. Nota-se que há uma solução inicial proposta (x_0), localizada dentro da região factível do problema. Para alguns algoritmos determinísticos, o valor de x é atualizado a cada iteração com base nos valores da 1ª e 2ª derivada da função objetivo em relação às variáveis do problema, quando x é um vetor de variáveis, a 1ª e 2ª

derivada da função objetivo tornam-se matrizes, conhecidas como Jacobiana e Hessiana, respectivamente (LUENBERGER e YE, 2016). Conforme o valor de x é atualizado ao longo das iterações, x aproxima-se do ponto ótimo do problema, o subíndice visto na Figura 14(a) indica a iteração de cada solução e a linha tracejada a direção seguida pela solução ao longo do processo de otimização.

Vale salientar que os algoritmos determinísticos atualizam o valor de uma única solução ao longo do processo de otimização. A única solução ilustrada na Figura 14(a) teve seu ponto de partida dentro da região factível do problema, essa condição é exigida por alguns métodos de otimização determinísticos, para que haja convergência, entretanto, dependendo do método empregado, o valor inicial pode partir de fora da região factível (WILLIAMS, 2013). Diversos métodos de otimização determinísticos já foram propostos na literatura, ressaltando-se os mais aplicados na solução de problemas de engenharia elétrica: o uso do método Simplex na solução de problemas lineares de grande porte, o método do Pontos Interiores, versão primal-dual, para a solução do fluxo de potência ótimo (PINTO, UNSIHUAY-VILA e FERNANDES, 2018) e o SQP utilizado na otimização de máquinas elétricas (BAZZO, KOLZER, *et al.*, 2017).

A Figura 14(b) ilustra o mesmo espaço de busca de um problema de minimização, desta vez, sendo solucionado por um método estocástico. Cada uma das seis soluções propostas pelo método, x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 e x_6 , são vistas ao longo de todo domínio da função. Tradicionalmente, os métodos populacionais geram um conjunto de soluções iniciais de forma aleatória, dessa maneira, não há garantias que todas as soluções criadas encontram-se dentro da região factível do problema, caso das soluções x_4 , x_5 e x_6 . O número de soluções proposta inicialmente, é um parâmetro dos algoritmos de otimização populacionais, conhecido como tamanho da população, ou enxame, dependendo do método utilizado. Espaços de busca maiores exigem uma população maior, para facilitar a convergência do método para o mínimo global da função.

Percebe-se que o número de soluções iniciais aumentou, quando se comparado à Figura 14(a), sendo essa uma das principais características dos algoritmos de otimização estocásticos, também conhecidos como meta-heurísticas populacionais. Os métodos de otimização estocásticos não atualizam apenas uma solução ao longo das iterações, diversas soluções são atualizadas, conforme o algoritmo converge para o ponto ótimo da função. A maioria dos algoritmos estocásticos fazem parte de uma grande família de métodos populacionais, chamada Computação Evolucionária (CEV). A CEV compreende uma gama de algoritmos populacionais bio-inspirados que se utilizam de uma população de soluções para encontrar as soluções ótimas de problemas de otimização, são técnicas de otimização baseadas

no comportamento social de espécies ou na teoria da evolução (GOLDBERG, 1989). Vale salientar que os algoritmos bio-inspirados não se utilizam das informações das derivadas da função objetivo, geralmente, suas soluções são atualizadas com base nas melhores soluções da iteração anterior.

Diversos métodos de CEV conhecidos já foram aplicados em problemas de engenharia elétrica: os *Genetic Algorithms* (GA) têm seu uso recorrente em problemas com variáveis binárias, podendo fazer analogia aos estados ligado e desligado de equipamentos elétricos (WIRMOND, FERNANDES e TORTELLI, 2011), a *Differential Evolution* (DE) e a *Particle Swarm Optimization* (PSO) têm sido muito utilizadas em problemas de despacho econômico, fluxo de potência ótimo, problemas de controle ótimo e em projeto de máquinas elétricas (PEREIRA, FERNANDES e AOKI, 2018) e (HUA, ZHU e XU, 2020) e por fim, os algoritmos *Ant Colony Optimization* (ACO) e *Artificial Bee Colony* (ABC) têm seu uso relacionado a problemas de otimização representados por grafos ou em problemas de mineração de dados (PARPINELLI, LOPES e FREITAS, 2002).

3.3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

O PSO é um algoritmo da computação evolucionária definido como uma meta-heurística populacional estocástica utilizada em problemas de otimização, contínuos e discretos, cujo modelo é bioinspirado no comportamento coletivo de grupos de animais. O PSO é embasado no princípio da inteligência de enxames, definido como o comportamento social adotado por animais que vivem em bandos e que se organizam e cooperam em tarefas que envolvem o benefício do bando e o do próprio indivíduo, tais como: busca de alimento, construção de seus ninhos ou em processos migratórios (KENNEDY e EBERHART, 1995).

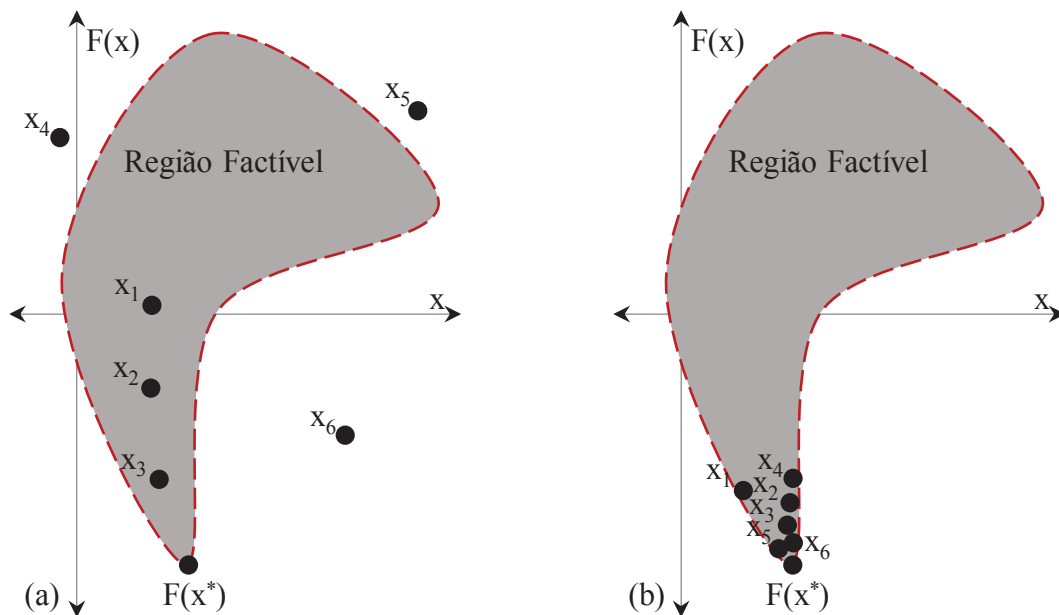
O método possui uma população de soluções candidatas, onde a partícula (indivíduo) do enxame representa uma possível solução para o problema de otimização, sob a forma de um vetor numérico com as variáveis do problema. Durante o processo evolutivo, as partículas interagem entre si e com o meio, de modo que tendem a ir na direção de boas soluções que já foram encontradas pelo bando, mas também exploram novas regiões do espaço de busca. Cada solução é avaliada por uma função *fitness* a ser maximizada ou minimizada (VALLE, VENAYAGAMOORTHY, *et al.*, 2010). A Figura 15 ilustra o comportamento das partículas ao longo de um processo de otimização.

A Figura 15(a) apresenta um enxame de partículas no início da otimização, quando as partículas são dispostas ao longo do espaço de busca de forma aleatória. Por via de regra, a maioria dos algoritmos cria a população inicial de soluções de forma aleatória, com isso,

algumas soluções propostas podem não atender todas as restrições do problema de otimização, consequentemente, essas partículas estão fora da região factível do problema, caso visto na Figura 15(a), para as soluções x_4 , x_5 e x_6 .

A Figura 15(b) mostra a população de partículas ao final do processo evolutivo, nota-se que as soluções foram atraídas pelo valor de mínimo x^* da função $F(x)$. As interações entre as partículas do algoritmo fazem o enxame ser atraído para os valores de x que forneçam os maiores ou menores valores da função objetivo $F(x)$. Constatamos que ao final da otimização as soluções propostas pelo algoritmo evolutivo atendem às restrições do problema de otimização, já que todas as partículas do enxame, estão dentro da região factível da função $F(x)$. A maioria dos algoritmos de PSO propostos na literatura aborda as restrições do problema de otimização como penalidades no valor da função de *fitness*. Dessa maneira, evita-se as regiões de atração do espaço de busca que não fazem parte da região factível do problema.

FIGURA 15 – POSIÇÕES DAS PARTÍCULAS AO LONGO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.



FONTE: O autor (2021).

O deslocamento de cada partícula ao longo do espaço de busca é descrito matematicamente por dois vetores onde: $X_{id}(t + 1)$ é a posição da partícula no instante atual e $V_{id}(t + 1)$ é a velocidade no instante atual, sendo esses vetores atualizados a cada iteração. A velocidade no instante atual de cada partícula é escrita em função de quatro vetores: $P_{id}(t)$, conhecida como componente cognitiva, que armazena a melhor posição visitada de cada

partícula, $P_{ig}(t)$, conhecida como componente social, que armazena a melhor posição dentre todas as partículas do enxame, $V_{id}(t)$ que é a velocidade da partícula no instante anterior

e $X_{id}(t)$ posição no instante anterior de cada partícula. Já a posição de cada partícula no instante atual ($X_{id}(t + 1)$), é atualizada por meio de duas componentes: $V_{id}(t + 1)$ velocidade no instante atual de cada partícula e $X_{id}(t)$ posição no instante anterior de cada partícula (KENNEDY e SHI, 2001).

Para controlar o deslocamento das partículas ao longo do espaço de busca, o método propõe o uso de três parâmetros: C_1 , C_2 e W . C_1 e C_2 são responsáveis por regular as contribuições das componentes cognitiva e social na composição do vetor velocidade no instante atual ($V_{id}(t + 1)$), variando sua faixa de valores entre $[0...2]$. O coeficiente de inércia (W) controla a contribuição do vetor velocidade no instante anterior ($V_{id}(t)$) na formação do vetor velocidade atual ($V_{id}(t + 1)$), seu valor pode variar em uma faixa restrita entre $[0...1]$. A característica estocástica do método é introduzida pelas variáveis randômicas R_1 e R_2 , que podem assumir valores aleatórios entre $[0...1]$, ambas variáveis randômicas são introduzidas no cálculo da velocidade no instante atual de cada partícula ($V_{id}(t + 1)$) (ZHANG e JI, 2015). De posse das variáveis utilizadas no cálculo da velocidade e posição no instante atual, apresentam-se as equações que regem o comportamento das partículas ao longo do processo de otimização.

$$V_{id}(t + 1) = W \cdot V_{id}(t) + C_1 \cdot R_1 \cdot (P_{id}(t) - X_{id}(t)) + C_2 \cdot R_2 \cdot (P_{ig}(t) - X_{id}(t)) \quad (11)$$

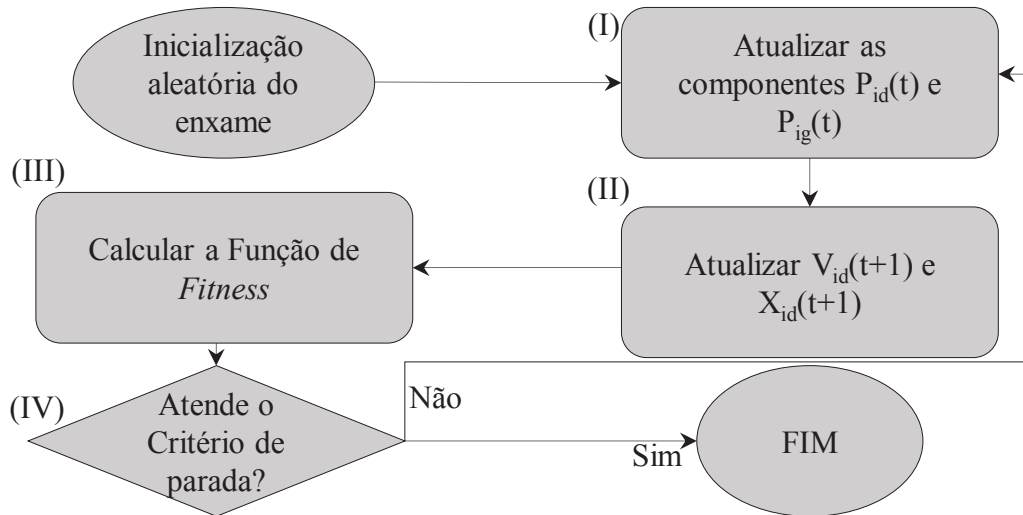
$$X_{id}(t + 1) = X_{id}(t) + V_{id}(t + 1) \quad (12)$$

A aglomeração de partículas em torno do ponto mínimo da função, apresentado na Figura 15(b), ressalta a importância de um bom ajuste para os parâmetros do algoritmo. O processo evolutivo tende a tornar as partículas do enxame x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 e x_6 vetores muito parecidos, restringindo a diversidade da população do enxame, o que dificulta a “migração” para outro ponto ótimo da função. Portanto, os parâmetros do algoritmo devem ser ajustados de maneira que os ótimos locais da função objetivo sejam evitados, aumentando a aleatoriedade da busca por meio do ajuste da constante C_2 . O fluxograma visto na Figura 16 explica o processo evolutivo do algoritmo.

A Figura 16 apresenta as principais etapas do processo evolutivo do PSO. Com a inicialização da população de soluções, a etapa (I) do algoritmo consiste em atualizar a melhor posição visitada pela partícula e a melhor posição visitada pelo enxame. Na etapa (II), atualizam-se os vetores que regem o deslocamento das partículas ao longo do espaço de busca, cada partícula possui uma posição que é avaliada pela função de *fitness* do problema. O cálculo da função de *fitness*, realizado na etapa (III), determina a melhor posição visitada pelo enxame e a melhor posição de cada partícula. A etapa (IV) verifica se o critério de parada estabelecido

para o algoritmo foi atendido, se a resposta for positiva o algoritmo encerra o processo evolutivo, caso contrário, uma iteração do método é contabilizada e o algoritmo retorna para a etapa (I).

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PSO.



FONTE: Adaptado de (KENNEDY e SHI, 2001).

4 USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA COMPARAÇÃO COM O MODELO ANALÍTICO

Na resolução de problemas magnéticos utiliza-se, quando possível, métodos analíticos que permitem obter uma solução exata do problema. Entretanto, os métodos analíticos só podem ser usados em problemas cuja a configuração permita a imposição das condições de contorno de uma maneira simples, para os demais casos ou em modelagens que exigem um alto nível de precisão, sugere-se a utilização de um método numérico (MALAGONI, 2012).

A modelagem analítica proposta para realizar o projeto ótimo do GSIP não considera alguns fenômenos magnéticos presentes no gerador. A relutância do ferro e as harmônicas dos campos eletromagnéticos da máquina são exemplos de fenômenos físicos não modelados no projeto. Para comparar os resultados do projeto realizado, aplica-se uma modelagem numérica ao gerador, ou seja, um método numérico capaz de calcular a densidade de fluxo magnético ao longo de todo o gerador, correntes elétricas e tensões da máquina, com uma maior acurácia e proximidade com os valores que seriam obtidos em um ensaio físico, caso o gerador fosse construído (MALAGOLI, 2016). O método numérico aplicado para comparar o projeto ótimo realizado foi o Método dos Elementos Finitos (MEF).

4.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

Os fenômenos eletromagnéticos presentes em máquinas elétricas são descritos pelas equações de *Maxwell*. Elas unificam os princípios do eletromagnetismo em um sistema de Equações Diferenciais Parciais (EDP) que associam os fenômenos elétricos ao fenômenos magnéticos e são dadas na forma diferencial por (LUZ, 2003):

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (13)$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (14)$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (15)$$

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho_v \quad (16)$$

Onde:

- \vec{H} : é o campo magnético (A/m);
- \vec{J} : é a densidade superficial de corrente (A/m²);
- \vec{D} : é a densidade de fluxo elétrico (C/m²);

- \vec{E} : é o campo elétrico (V/m);
- \vec{B} : é a densidade de fluxo magnético (T);
- ρ_v : é a densidade volumétrica de carga elétrica (C/m³).

O conjunto de Equações (13), (14), (15) e (16) são, respectivamente, conhecidas como: Lei de Ampère, Lei de Gauss Magnética, Lei de Faraday e Lei de Gauss Elétrica e formam juntas a modelagem matemática do campo eletromagnético. Existem diversas modelagens propostas para o cálculo dos fenômenos eletromagnéticos, diversificando-se, basicamente, em relação à frequência que esses fenômenos acontecem e se os campos em estudo são variantes ou invariantes no tempo. Além do conjunto de equações descrito acima, existem as equações construtivas, que modelam o comportamento dos campos elétricos e magnéticos na matéria (BASTOS e SADOWSKI, 2003).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (17)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (18)$$

$$\vec{J} = \sigma_0 \vec{E} \quad (19)$$

Onde:

- ϵ_0 : é a permissividade elétrica do material (F/m);
- μ_0 : é a permeabilidade magnética do material (T.m/A);
- σ_0 : é a condutividade elétrica do material (1/ Ω .m);

4.1.1 Modelagem magnetostática

A magnetostática estuda fenômenos magnéticos em regime estacionário, ou seja, quando as grandezas elétricas e magnéticas são independentes do tempo, as derivadas temporais vistas nas Equações (13) e (15) anulam-se e as grandezas elétricas e magnéticas são desacopladas (LUZ, 2003).

O campo elétrico torna-se um campo conservativo e o campo magnético é invariante no tempo, ou seja, as fontes geradoras dos campos magnetostáticos são correntes elétricas estacionárias ou campos magnéticos oriundos de materiais magnetizados (ímãs permanentes). As equações em estudo no caso da magnetostática tornam-se (MALAGOLI, 2016):

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (20)$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (21)$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = 0 \quad (22)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (23)$$

4.1.2 Modelagem magnetodinâmica

O modelo proposto na magnetodinâmica consiste em resolver as equações de *Maxwell* no regime quase-estático, onde o termo da Equação (13) originário da variação do campo elétrico é desprezível em relação à densidade de corrente elétrica. Portanto o conjunto de equações a ser estudado é (BASTOS e SADOWSKI, 2003):

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (24)$$

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (25)$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (26)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (27)$$

$$\vec{j} = \sigma_0 \vec{E} \quad (28)$$

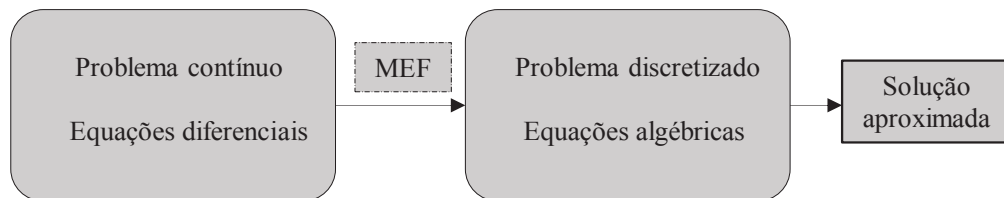
Nota-se que nessa modelagem o campo elétrico deixa de ser conservativo e agora os campos eletromagnéticos estudados são provenientes tanto de correntes elétricas estacionárias como de correntes elétricas variantes no tempo (LUZ, 2003).

4.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A modelagem matemática fundamental para o estudo de campos eletromagnéticos em máquinas elétricas para o caso estático, seção 4.1.1, e para o caso quase-estático, seção 4.1.2, engloba a solução de um conjunto de equações diferenciais parciais para domínios de difícil definição das condições de contorno, além de que, os materiais utilizados na concepção de máquinas elétricas, geralmente, possuem permeabilidade variável, ou seja, a permeabilidade do material varia em função do campo magnético. Desse modo, a aplicação de métodos analíticos na solução desses problemas torna-se inviável e a solução dessas equações é obtida por meio de um método numérico, majoritariamente, por meio do MEF (IDA e BASTOS, 1997).

O MEF é um método numérico que aproxima a solução exata de um problema contínuo (EDP's), discretizando o domínio das variáveis, em geometrias menores, definidas como elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata é calculada por interpolações dos valores obtidos em cada um dos elementos do domínio discretizado (MALAGOLI, 2016). O conceito fundamental do MEF é a aproximação de uma quantidade contínua através de um modelo discreto composto por um conjunto de funções algébricas definidas em um número finito de subdomínios (elementos) (BATHE, 2016). Logo, as principais etapas de resolução de um problema pelo MEF são a discretização do domínio e a definição das condições de contorno do problema. A Figura 17 ilustra as alterações feitas no domínio e nas equações de um problema solucionado pelo MEF.

FIGURA 17 – MODIFICAÇÃO DO PROBLEMA ATRAVÉS DO MEF.

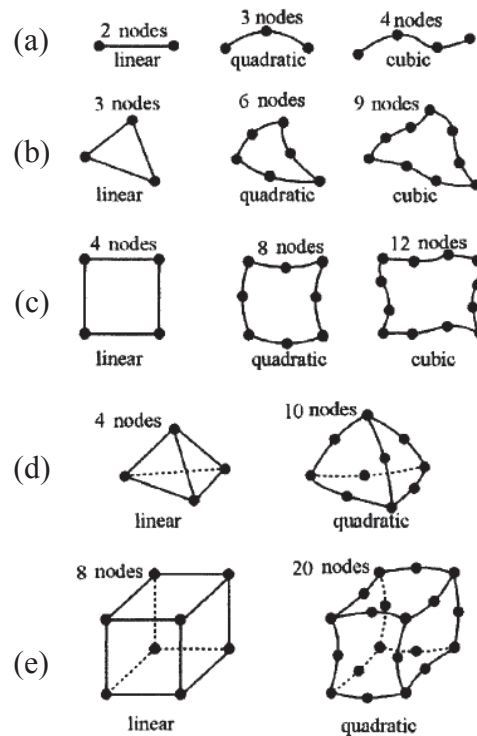


FONTE: O autor (2021).

4.2.1 Discretização do domínio

O MEF possui uma grande liberdade sobre a discretização do domínio de estudo, já que, diversos tipos de elementos podem ser aplicados. A escolha dos tipos de elementos que formam a malha que discretiza o domínio está relacionada com o formato do domínio de estudo. Desse modo, o usuário do MEF deve ter clareza sobre qual tipo de elemento tende a reduzir o erro de discretização cometido pela malha (BASTOS e SADOWSKI, 2003). A Figura 18 ilustra alguns tipos de elementos possíveis.

FIGURA 18 – TIPOS DE ELEMENTOS POSSÍVEIS EM UMA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.

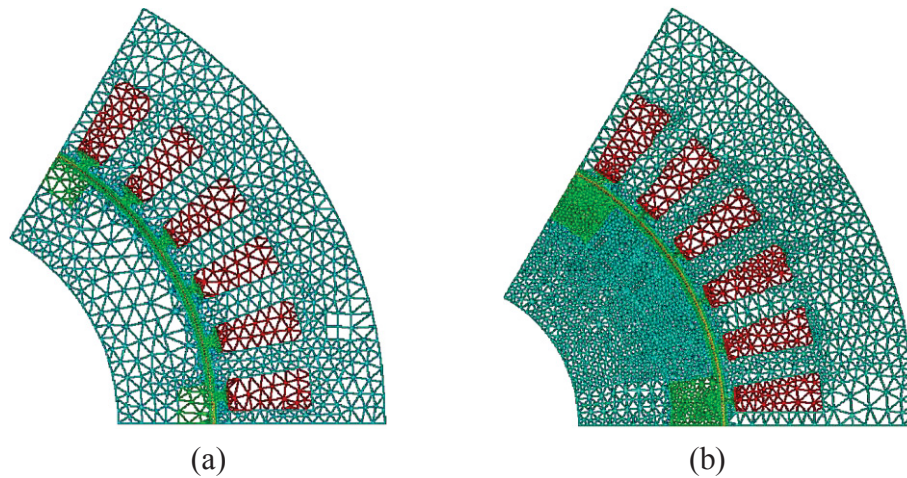


FONTE: Adaptado de (BASTOS e SADOWSKI, 2003).

A Figura 18(a) ilustra elementos unidimensionais, considerando a utilização de elementos lineares, quadráticos e cúbicos. Essas características estão relacionadas com a função de interpolação utilizada, funções de interpolação quadráticas e cúbicas podem melhorar a aproximação do domínio, visto que, podem originar elementos com lados curvos, permitindo um ajuste mais apropriado às bordas de algumas regiões de estudo. A Figura 18(b) e a Figura 18(c) ilustram dois tipos de elementos bidimensionais, o elemento triangular e o elemento quadrilateral, respectivamente. Por fim, a Figura 18(d) e a Figura 18(e) apresentam elementos finitos volumétricos, conhecidos como elementos tetraédricos e elementos cúbicos, respectivamente. Os elementos de volume foram ilustrados apenas com funções de interpolação linear e quadrática.

A solução aproximada fornecida pelo MEF possui uma diferença em relação à solução exata, atrelada a sua discretização espacial. É possível reduzir essa diferença, utilizando-se de elementos menores e formando uma malha de discretização mais densa, a contrapartida é um aumento no custo computacional envolvido na solução do problema (MALAGOLI, 2016). A Figura 19 aborda o mesmo domínio de um problema bidimensional, com elementos triangulares de primeira ordem, entretanto, com diferentes números de elementos para cada malha.

FIGURA 19 – EXEMPLOS DE DENSIDADE DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.



FONTE: O autor (2021).

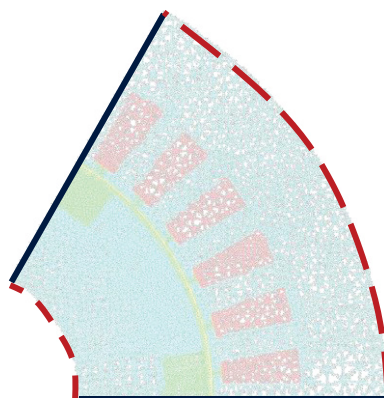
A Figura 19(a) apresenta uma malha com elementos finitos triangulares lineares de maior área e em menor número, quando comparados ao número de elementos da vistas na Figura 19(b), que possui um maior número de elementos, tornando a malha mais densa e melhorando a aproximação do domínio estudado. Pela inspeção da Figura 19(a), percebe-se que próximo aos dentes do estator e do ímã do rotor, existem regiões que estão sendo modeladas por triângulos grandes, diferentemente da malha da Figura 19(b), que possui uma malha mais densa para ambas regiões citadas. Possivelmente, os valores de densidade de fluxo magnético obtido para essas regiões apresenta uma maior confiabilidade quando são modelados pela malha vista na Figura 19(b). Além disso, a solução dentro de cada elemento também melhora quando se usa uma malha mais densa, reduzindo a diferença entre o MEF e a solução exata.

4.2.2 Condições de contorno

Seja uma malha de elementos finitos definida para a solução de um problema através de seu domínio discretizado, existem condições de contorno que devem ser aplicadas ao domínio para garantir a unicidade da solução. Há três tipos de condições de contorno que são utilizadas na formulação numérica: a condição de contorno de Dirichlet, de Neumann e de periodicidade. Duas delas são impostas, a condição de contorno de Dirichlet, ou condição de contorno fixa, que delimita a fronteira do domínio onde os valores das variáveis de estudo nos nós da malha são conhecidos. Logo, o valor conhecido é imposto à formulação do problema, reduzindo a dimensão do sistema de equações algébricas. Outra condição de contorno imposta, é a condição de contorno de periodicidade que é aplicada em regiões onde ocorrem repetibilidade da estrutura, no caso de máquinas elétricas trifásicas simétricas, elas podem ser

aplicadas para cada polo da máquina. Por fim, as condições de contorno de Neumann, ou condições de contorno de simetrias, não impõe valores às variáveis dos nós, entretanto, elas fornecem a direção dos campos eletromagnéticos em estudo (BASTOS e SADOWSKI, 2003). A Figura 20 exemplifica as condições de contorno impostas na simulação de um gerador síncrono.

FIGURA 20 – CONDIÇÕES DE CONTORNO APLICADAS A UM GERADOR SÍNCRONO.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 20 mostra um polo de GSIP, onde são aplicadas as condições de contorno ao domínio do problema, de modo a realizar a simulação numérica do GSIP. Por meio da condição de contorno de Dirichlet, evidenciadas pelas linhas de cor vermelha pontilhadas, impõe-se que o valor do potencial vetor magnético é nulo sob a fronteira limitada por esta condição de contorno. Já as linhas contínuas de cor azul, destacam as condições de contorno de periodicidade do problema, visto que, o gerador possui simetria entre os demais polos presentes na máquina.

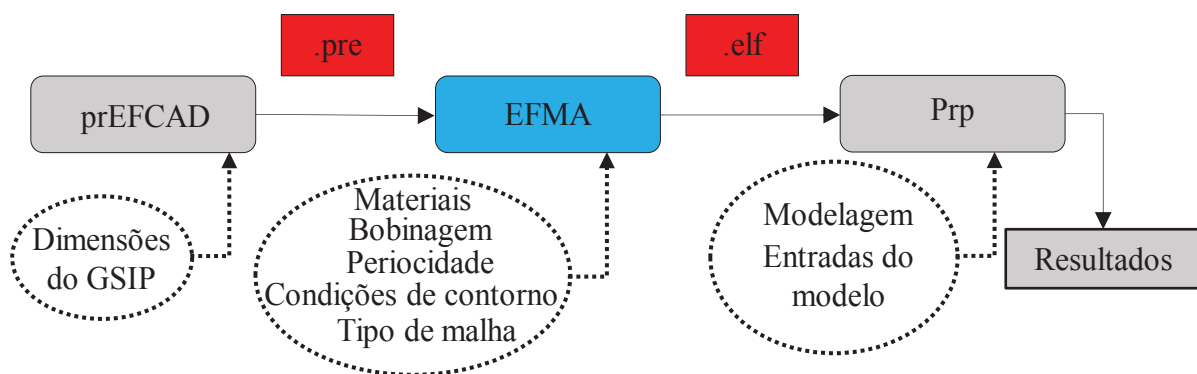
4.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A validação do projeto ótimo realizado nesta dissertação foi feito através do *software Electromagnetic Fields Computer Aided Design* (EFCAD) desenvolvido por professores do Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com o Laboratório de Engenharia Elétrica e Eletrônica Industrial (LEEI) da *École nationale supérieure d'électrotechnique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications* (ENSEEIHT), com sua primeira versão lançada em 1986 (BASTOS e SADOWSKI, 2008). O *software* dispõe das modelagens apresentadas no

item 4.1 para o cálculo da indutância, considerando a modelagem magnetostática, e da potência elétrica fornecida pelo gerador, considerando a modelagem magnetodinâmica.

A versão original do *software* possui uma interface gráfica pouco amigável para os padrões atuais, através do sistema operacional DOS o usuário realiza a entrada de dados do problema inserindo os valores pelo *prompt* de comando do *Windows*. Com a finalidade de facilitar a simulação de geradores síncronos, duas interfaces gráficas foram propostas, facilitando a interação entre o usuário e o *software*. O prEFCAD e o PrP foram propostos para auxiliar na entrada de dados do EFCAD e na análise dos resultados obtidos, respectivamente (SILVA, 2020).

FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO COM MEF.



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2020).

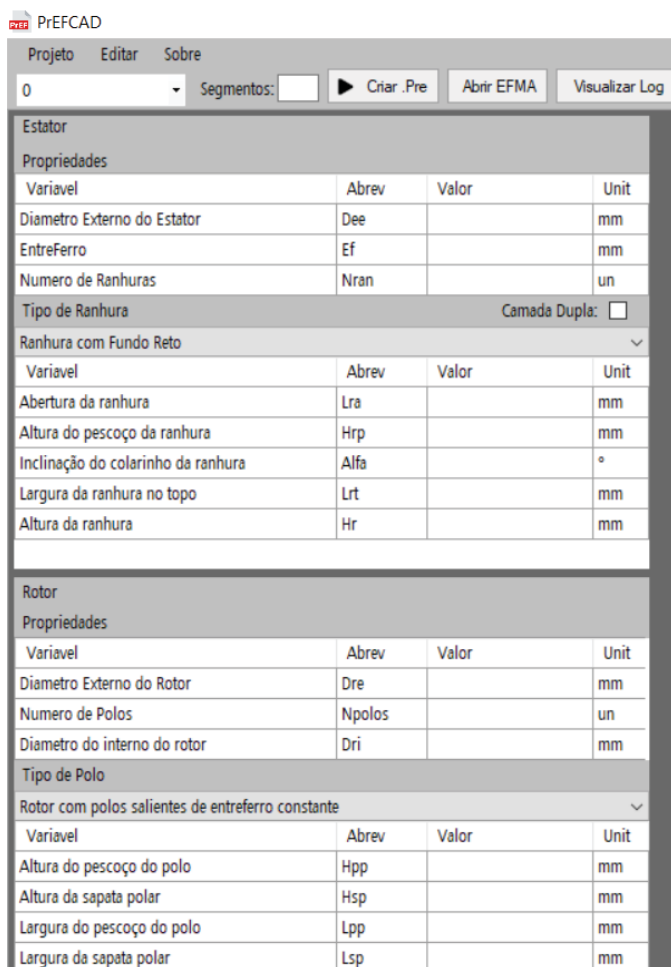
A partir da análise da Figura 21 é possível compreender a sequência em que os aplicativos e o EFCAD são utilizados. Inicia-se, informando as dimensões do GSIP para o prEFCAD, o aplicativo gera um arquivo *.pre* e em seguida, o executável EFMA é aberto, neste executável, diversas informações para a simulação com elementos finitos são solicitadas, como as propriedades dos materiais, a localização das bobinas e a discretização do domínio. Ao término do uso do executável EFMA, gera-se um arquivo *.elf*, utilizado pelo aplicativo Prp para informar ao EFCAD as dimensões e características da máquina simulada. Durante o uso do Prp é possível escolher o tipo de simulação a ser realizado e conseqüentemente, as entradas de cada uma das simulações são solicitadas. Ao fim do uso do Prp, os resultados da simulação com o EFCAD são obtidos. Vale salientar que ambos aplicativos fazem uma interface entre o usuário e os módulos do EFCAD, software que realiza os cálculos utilizando o MEF.

4.3.1 O PREFCAD

O prEFCAD é uma interface gráfica capaz de gerar o desenho de alguns tipos de geradores a partir das dimensões fornecidas pelo usuário, a interface cria um arquivo .pre que é usado pelo EFCAD para determinar o domínio de cálculo. Para as características do estator da máquina, é possível variar o tipo da ranhura utilizada no projeto, com fundo reto, abaulado ou circular. Além disso, o número de camadas de condutores do estator também pode ser modificado, optando-se entre camada simples ou dupla de bobinamento. Quanto aos tipos de rotores, o prEFCAD dispõe de três possibilidades: com ímãs permanentes externos ao rotor, polos salientes com entreferro constante acima da sapata polar e polos salientes com perfil senoidal de polo e rotor bobinado.

Após o dimensionamento da máquina, a interface realiza o desenho, cria um arquivo .pre e uma aba com o desenho do gerador é aberta, a aba do executável EFMA, nesta aba, definem-se as variáveis de entrada para uma simulação com MEF. A Figura 22 mostra a interface do prEFCAD.

FIGURA 22 – INTERFACE GRÁFICA DO PREFCAD.

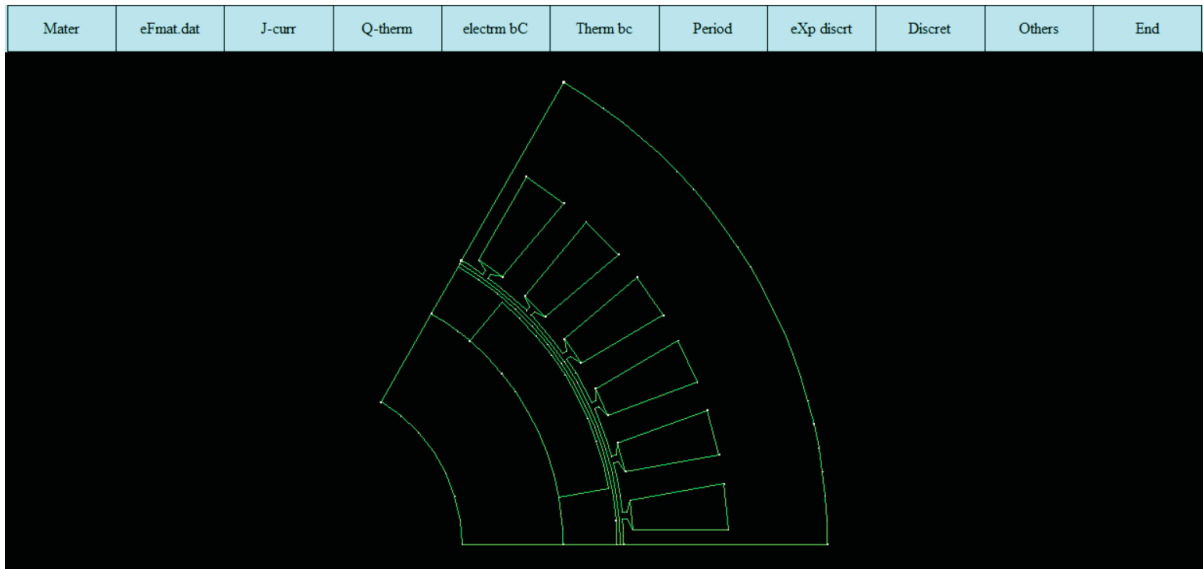


FONTE: O autor (2021).

4.3.2 O EFMA

Quando o desenho com as dimensões da máquina é finalizado pelo prEFCAD, o executável EFMA é aberto, após a criação do arquivo .pre, é possível definir: os tipos de materiais presentes no gerador, a bobinagem da máquina, as condições de contorno do problema, a periodicidade, o tipo de malha utilizado na discretização, além de características térmicas, se forem consideradas na simulação. A Figura 23 retrata as configurações que podem ser definidas no EFMA.

FIGURA 23 – CONFIGURAÇÕES DO EXECUTÁVEL EFMA.



FONTE: O autor (2021).

4.3.3 O PrP

Após as definições necessárias para a realização da simulação feitas no arquivo EFMA, é gerado um arquivo .elf, onde as informações definidas pelo usuário foram salvas. O PrP é uma interface gráfica que realiza a comunicação entre os dados fornecidos e solicitados pelo usuário e os módulos de cálculo do EFCAD. A Figura 24 ilustra a interface gráfica do PrP na etapa de processamento do arquivo .elf.

FIGURA 24 – INTERFACE GRÁFICA DO PRP, ETAPA DE PROCESSAMENTO.



FONTE: O autor (2021).

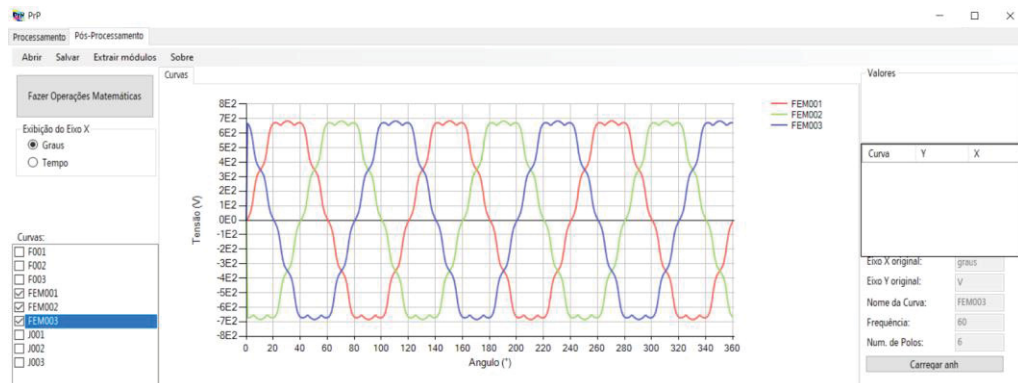
Percebe-se por meio da Figura 24, que após a seleção do arquivo .elf desejado é possível optar por três tipos de simulações possíveis: EFCS, EFCR e EFCM, cada uma delas possui um conjunto de dados de entrada necessários para realizar os cálculos, visto que, cada

uma delas é um módulo de cálculo. Cada simulação faz uso de uma formulação eletromagnética do problema (BASTOS e SADOWSKI, 2008):

- EFCS: Soluciona problemas magnéticos sem qualquer movimentação mecânica, utiliza a formulação magnetostática com potencial vetor magnético para calcular a densidade de fluxo magnético do gerador;
- EFCR: Resolve problemas magnetostáticos, mas inclui o cálculo de estruturas rotativas, como geradores síncronos. Os resultados dos cálculos são: a tensão induzida, torque, densidade de fluxo e as perdas no ferro da máquina;
- EFCM: Encontra a solução para cálculos magnetodinâmicos em potencial elétrico e potencial vetor magnético. Portanto, obtém-se os resultados variantes no tempo considerando o movimento do rotor, como: a tensão induzida e a corrente de armadura.

Com o arquivo .elf selecionado e a etapa de pré-processamento realizada, escolha do tipo de simulação a ser executada e o fornecimento dos dados de entrada, basta clicar em calcular, visto na Figura 24, que o cálculo dos campos eletromagnéticos é realizado. Os resultados podem ser vistos por meio da aba pós-processamento, como apresenta a Figura 25.

FIGURA 25 – INTERFACE GRÁFICA DO PRP, ETAPA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 25 mostra como a interface gráfica do PrP apresenta os resultados obtidos em simulação. Na parte esquerda, é vista uma aba onde é possível selecionar os gráficos das variáveis de interesse, havendo a opção das variáveis estarem em função do ângulo ou do tempo. A aba “carregar anh” aciona o módulo DSN do EFCAD, onde o cálculo das harmônicas de cada uma das variáveis selecionadas é realizado. Com isso, é possível avaliar o conteúdo harmônico do gerador projetado.

5 PROJETO ÓTIMO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

Uma das premissas para a elaboração de um projeto ótimo de um GSIP é a definição do tipo do gerador. O projeto ótimo realizado nessa dissertação considera um gerador síncrono de ímãs permanentes (GSIP), com ímãs alojados na parte externa do rotor, utilizando rotor interno, topologia apresentada na Figura 8(a), no item 2.3.2. O GSIP possui algumas grandezas que são consideradas constantes ao longo do processo de otimização, vale salientar que o valor dessas constantes pode ser ajustado para outros projetos, dependendo da aplicação do gerador e dos objetivos do projeto. Os parâmetros e os valores adotados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – CRITÉRIOS ADOTADOS PARA OS PROJETOS ÓTIMOS DO GSIP.

Parâmetros	Valor adotado
Frequência (f)	60 Hz
Velocidade de rotação (n)	1200 rpm
Fator de enchimento da ranhura (k_{re})	0,5
Número de camadas de condutores (N_{rc})	Camada simples
Coefficiente do fluxo que cruza o entreferro (k_{ϕ})	0,98
Fator de potência (f_p)	0,9 indutivo
Número de ranhuras do estator (N_r)	36
Resistência base do condutor (R_b)	2,03 Ω /km
Seção de base (s_b)	8,36 mm ²

FONTE: O autor (2021).

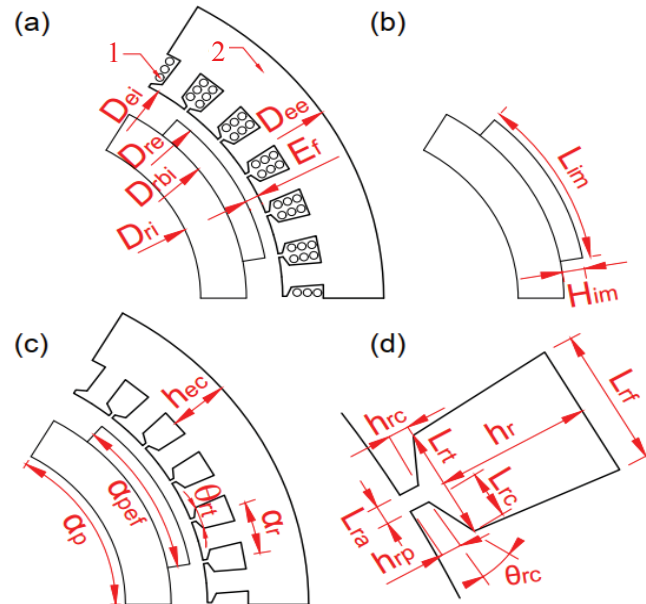
Os parâmetros vistos na Tabela 1 podem ter seus valores alterados, como o número de camadas de condutores ou o número de ranhuras, que são parâmetros construtivos do gerador. Entretanto, o valor de k_{ϕ} deve ser ajustado de forma minuciosa, visto que, ele avalia a quantidade de fluxo produzida no rotor do gerador que atravessa o entreferro da máquina e é enlaçado pelo enrolamento de armadura. Portanto, não se recomenda a escolha dessa constante de forma arbitrária, mas sim, baseada em simulações computacionais usando métodos numéricos. Além disso, a seção de base e resistência do condutor são baseadas em uma tabela de condutores AWG (NOVACON, 2021), sendo o valor da resistência calculado conforme a área do condutor varia, por meio de uma regra apresentada no item 5.4.1.

5.1 PRINCIPAIS DIMENSÕES DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

O projeto de um GSIP consiste em determinar valores para todas as dimensões construtivas do gerador, de forma que, seja possível construir o gerador, possuindo as variáveis

propostas e calculadas no projeto. As principais dimensões de um GSIP com ímãs alojados na superfície do rotor são apresentadas na Figura 26.

FIGURA 26 – PRINCIPAIS DIMENSÕES DO GSIP.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 26 ilustra os aspectos construtivos do GSIP projetado, as dimensões vistas, que compõe a modelagem analítica do gerador. Iniciando pela Figura 26(a), os diâmetros do gerador são apresentados: o diâmetro externo do rotor (D_{re}), o diâmetro interno do rotor (D_{ri}), o diâmetro na altura da base do ímã (D_{rbi}), o diâmetro interno do estator (D_{ei}) e o diâmetro externo do estator (D_{ee}). Além disso, a Figura 26(a) expõe a presença de alguns materiais que compõe o gerador, em 1: os condutores de cobre da armadura, alojados no interior das ranhuras da máquina e em 2: o aço, que compõe tanto as chapas do estator da máquina como as do rotor. Ademais, outra grandeza importante vista é o entreferro do gerador (E_f), que pode ser descrito como a distância radial entre os polos do rotor e os dentes do estator.

Na Figura 26(b), as características de cada polo da máquina são ressaltadas, forma-se cada polo magnético do gerador com um ímã, alojado na parte externa do rotor e com as seguintes dimensões: a altura do ímã (H_{im}) e o comprimento do arco do ímã (L_{im}), dimensões utilizadas no cálculo do fluxo do campo principal do GSIP. O passo polar (α_p) e o passo efetivo do polo (α_{pef}), vistos na Figura 26(c), são variáveis que devem ter seus valores controlados ao longo da otimização, facilitando que o fluxo dos polos do rotor atravessasse as bobinas do estator, com isso, reduzindo o fluxo disperso.

Os principais parâmetros do estator do gerador são mostrados nas Figura 26(c) e (d). A escolha das dimensões do estator do gerador interfere diretamente na área das ranhuras (S_r), grandeza que contribui no cálculo da potência elétrica gerada, e no ângulo de inclinação do colarinho da ranhura (θ_{rc}), ângulo que contribui no cálculo da indutância de dispersão do gerador. A altura do pescoço da ranhura (h_{rp}), a altura do colarinho da ranhura (h_{rc}) e a largura da abertura da ranhura (L_{ra}), são variáveis que alteram os valores de θ_{rc} e determinam o formato dos dentes do estator. O ângulo ocupado pela ranhura no topo (θ_{rt}), é uma fração do valor do passo de ranhura (α_r), que contribui no cálculo da largura dos dentes do estator e é usado para se obter a largura da ranhura no topo (L_{rt}). A largura do colarinho da ranhura (L_{rc}) ajuda a determinar as dimensões da largura do dente na ponta, por onde passa o fluxo do estator do gerador. A largura do fundo da ranhura (L_{rf}) é calculada de forma que os dentes do estator do gerador sejam paralelos. O cálculo da potência elétrica depende da corrente I_a , que é proporcional à área da ranhura (S_r) e está diretamente relacionada à altura da ranhura (h_r), logo, o algoritmo determina a altura da ranhura de modo que a potência exigida pela carga seja entregue. A escolha da altura da coroa do estator (h_{ec}) é feita com base no valor adotado para h_r .

5.2 PROJETO DO ROTOR

Dada a frequência operativa do gerador (f) e a velocidade de rotação da máquina (n), determina-se o número dos polos do GSIP por meio de:

$$P = 120 \cdot \frac{f}{n} \quad (29)$$

Cada polo do GSIP ocupa um arco geométrico conhecido como passo polar (α_p) e cada polo magnético do gerador possui um ímã. O arco ocupado pelo ímã em cada polo é conhecido como passo polar efetivo (α_{pef}), que é uma variável com valor controlado pela constante ($k_{\alpha p}$). Ambas as grandezas são obtidas, respectivamente em:

$$\alpha_p = \frac{2 \cdot \pi}{P} \quad (30)$$

$$\alpha_{pef} = \alpha_p \cdot k_{\alpha p} \quad (31)$$

O entreferro do gerador é calculado em relação ao valor atribuído ao diâmetro externo do rotor por meio do coeficiente k_{cef} . Dessa forma, o entreferro da máquina é calculado em:

$$E_f = D_{re} \cdot k_{cef} \quad (32)$$

Para a topologia de gerador escolhida para realização do projeto, a altura do ímã é definida com base no valor do entreferro da máquina e do valor atribuído para o coeficiente de permeância do gerador (HANSELMAN, 2003). Desse modo, a altura do ímã é obtida:

$$H_{im} = E_f \cdot P_c \quad (33)$$

A largura do ímã é calculada na altura do diâmetro externo do rotor. Portanto, deve-se considerar o raio do centro geométrico do gerador até a superfície externa do ímã. Desse modo, a L_{im} é obtida em:

$$L_{im} = \frac{D_{re}}{2} \cdot \alpha_{pef} \quad (34)$$

Com a altura e a largura do ímã definidas, sendo k_{cr} um fator que controla a altura da coroa do rotor, é possível determinar os valores do diâmetro do rotor na base do ímã (D_{rbi}) e do diâmetro do diâmetro interno do rotor (D_{ri}):

$$D_{rbi} = D_{re} - 2 \cdot H_{im} \quad (35)$$

$$D_{ri} = D_{rbi} - 2 \cdot L_{im} \cdot k_{cr} \quad (36)$$

O comprimento axial do gerador (C_{ax}) é obtido com base no valor atribuído ao diâmetro externo do rotor, a relação é feita através da constante k_{dl} , que pode ser calculada como uma razão entre D_{re} e C_{ax} . Logo C_{ax} é obtido por meio de:

$$C_{ax} = D_{re} \cdot k_{dl} \quad (37)$$

Por fim, o valor do fluxo magnético de um laço do gerador (ϕ_L) pode ser obtido através de:

$$\phi_L = \frac{B_{op} \cdot C_{ax} \cdot L_{im}}{2} \quad (38)$$

O valor da densidade de fluxo operativa do ímã B_{op} , que aparece na Equação (38), varia conforme o tipo de ímã escolhido (material considerado), com a temperatura operativa do gerador e principalmente, depende do valor do coeficiente de permeância. Para evitar a escolha equivocada de um valor do coeficiente de permeância, a densidade de fluxo operativa foi obtida conforme os valores de P_c foram sendo propostos pelo algoritmo de otimização. Dessa forma, não há a necessidade de atribuir um valor ao coeficiente antes do processo de otimização.

5.2.1 Modelo matemático para a densidade de fluxo operativa

Por meio da análise do segundo quadrante do laço de histerese da curva B-H do material presente nos ímãs, é possível obter um modelo matemático que forneça o valor da densidade de fluxo operativa do gerador em função do coeficiente de permeância escolhido. Define-se que o ímã utilizado no projeto seria o ímã de Neodímio-Ferro-Boro (N_eF_eB) grade N42, considerando que a temperatura operativa do GSIP seja constante, igual a 80 °C. São coletados dados de 13 pontos operativos do ímã, os pontos de operação do ímã tratam-se dos pontos de cruzamento entre a curva do ímã e a reta de carga equivalente a cada coeficiente de permeância, como pode ser visto na Figura 11. Os valores de B_{op} referentes aos valores de P_c escolhidos, são vistos na Tabela 2 (K&J MAGNETICS , 2021).

TABELA 2 – VALORES DA DENSIDADE DE FLUXO OPERATIVA DO ÍMÃ PARA CADA VALOR DO COEFICIENTE DE PERMEÂNCIA.

P_c	B_{op} (T)
1,0	0,586
1,2	0,642
1,4	0,688
1,6	0,728
1,8	0,762
2,0	0,792
2,5	0,852
3,0	0,897
4,0	0,961
5,0	1,004
7,0	1,058
9,0	1,090
10,0	1,102

FONTE: O autor (2021).

De posse da Tabela 2 e usando o *software* Excel, foi traçada uma linha de tendência para os dados, permitindo que o valor do coeficiente de permeância fosse alterado de maneira contínua, ao longo da otimização. Aplicando-se o modelo polinomial de quarta ordem, o erro médio quadrático entre a saída fornecida pelo modelo e a indução operativa real foi $5,109 \cdot 10^{-3}$. A expressão para o cálculo de B_{op} em função de P_c é dada por:

$$\begin{aligned}
 B_{op} = & -0,0003016 \cdot P_c^4 + 0,0081504 \cdot P_c^3 - 0,0819641 \cdot P_c^2 \\
 & + 0,3880564 \cdot P_c + 0,2804700
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

Com o valor da densidade de fluxo operativa entregue pelo ímã em função do coeficiente de permeância, é possível, considerar o coeficiente de permeância como uma

variável contínua do problema de otimização, desse modo, com a variação do valor de P_c , o valor de B_{op} é atualizado por meio de (39), permitindo o cálculo do fluxo magnético de um laço, para uma gama de valores de P_c . A escolha da faixa de valores usada para criar a linha de tendência é feita analisando o laço de histerese do material escolhido (K&J MAGNETICS, 2021), de modo que os valores próximos ao joelho do laço de histerese sejam desprezados, valores menores que um não foram considerados. Além disso, para valores maiores que dez, o custo do GSIP cresce muito, sendo uma região que não é de interesse do algoritmo de otimização, portanto, não foi modelada.

5.3 PROJETO DO ESTATOR

O dimensionamento do estator do gerador deve ser realizado de forma que o fluxo calculado na Equação (38) seja enlaçado pelas bobinas de armadura, produzindo a tensão terminal e potência elétrica requerida em projeto. Inicia-se o projeto do estator da máquina determinando-se o passo de ranhura (α_r), o ângulo ocupado pela ranhura no topo (θ_{rt}), vistos na Figura 26(c) e o ângulo ocupado pelo dente do estator (θ_d), por meio de:

$$\alpha_r = \frac{2 \cdot \pi}{N_r} \quad (40)$$

$$\theta_{rt} = \frac{\alpha_r}{1 + k_{rt}} \quad (41)$$

$$\theta_d = \alpha_r - \theta_{rt} \quad (42)$$

O θ_{rt} é calculado com base no valor obtido para α_r , que tem seu valor constante ao longo da otimização, pois o número de ranhuras do GSIP permanece constante. Logo, o valor de θ_{rt} é controlado por meio de uma constante k_{rt} , permitindo que o algoritmo de otimização ajuste seu valor, se for necessário.

Duas dimensões definem a altura da ponta dos dentes do GSIP, a altura do pescoço da ranhura (h_{rp}) e a altura do colarinho da ranhura (h_{rc}), vistas na Figura 26(d), são obtidas por meio de uma razão entre D_{re} e o N_r :

$$h_{rp} = \frac{D_{re}}{N_r} \cdot k_{rp} \quad (43)$$

$$h_{rc} = \frac{D_{re}}{N_r} \cdot k_{rc} \quad (44)$$

Foram utilizados dois fatores, k_{rp} e k_{rc} , para ajustar os valores das alturas h_{rp} e h_{rc} ao longo do processo de otimização, permitindo que as alturas assumam valores distintos. Dois

diâmetros devem ser determinados para facilitar o cálculo de grandezas do estator da máquina, são eles: o diâmetro interno do estator (D_{ei}), visto na Figura 26(a), e o diâmetro na altura do topo da ranhura (D_{rt}), obtidos por meio de:

$$D_{ei} = D_{re} + 2 \cdot E_f \quad (45)$$

$$D_{rt} = D_{ei} + 2 \cdot (h_{rp} + h_{rc}) \quad (46)$$

De posse do diâmetro na altura do topo da ranhura é possível determinar a largura da ranhura no topo (L_{rt}), a largura do dente do estator (L_d), a largura da abertura da ranhura (L_{ra}) e a largura do colarinho da ranhura (L_{rc}), todas larguras vistas na Figura 26(d) e obtidas por meio de:

$$L_{rt} = D_{rt} \cdot \tan \frac{\theta_{rt}}{2} \quad (47)$$

$$L_d = D_{rt} \cdot \tan \frac{\theta_d}{2} \quad (48)$$

$$L_{ra} = L_{rt} \cdot k_{ra} \quad (49)$$

$$L_{rc} = \frac{L_{rt} - L_{ra}}{2} \quad (50)$$

O valor da largura da abertura da ranhura é ajustado por meio de uma constante (k_{ra}) que ajusta seu valor com base no valor calculado para a largura da ranhura no topo. Outros dois ângulos são importantes para o dimensionamento da ranhura do estator, o ângulo de inclinação do colarinho da ranhura (θ_{rc}), visto na Figura 26(d), e o ângulo de inclinação da parede da ranhura (θ_{rip}), definido como metade do passo de ranhura para que os dentes possuam largura constante. Ambas as grandezas são obtidas em:

$$\theta_{rc} = \tan^{-1} \frac{h_{rc}}{L_{rc}} \quad (51)$$

$$\theta_{rip} = \frac{\alpha_r}{2} \quad (52)$$

Para determinar a altura da coroa do estator (h_{ec}), vista na Figura 26(c) e a altura da ranhura (h_r), vistas na Figura 26(d), é intuitivo basear-se no valor do comprimento do arco do ímã, dado que, metade da quantidade de fluxo que percorre o arco do ímã também percorre a coroa. As alturas são obtidas por meio de:

$$h_{ec} = L_{im} \cdot k_{ic} \quad (53)$$

$$h_r = h_{ec} \cdot k_{er} \quad (54)$$

As alturas calculadas nas Equações (53) e (54) têm seus valores ajustados pelos fatores k_{ic} e k_{er} , respectivamente, permitindo que o algoritmo de otimização ajuste a altura da coroa com base no valor do comprimento do arco do ímã e a altura da ranhura com base no valor da altura da coroa do estator.

O valor da altura da ranhura do estator é usado no cálculo da largura do fundo da ranhura (L_{rf}) e do diâmetro no fundo da ranhura do estator (D_{fre}), já o diâmetro externo do estator (D_{ee}), utiliza-se tanto da altura da ranhura como da altura da coroa na obtenção de sua dimensão. As variáveis são calculadas em:

$$L_{rf} = L_{rt} + 2 \cdot h_r \cdot \tan \theta_{rip} \quad (55)$$

$$D_{fre} = D_{rt} + 2 \cdot h_r \quad (56)$$

$$D_{ee} = D_{rt} + 2 \cdot h_r + 2 \cdot h_{ec} \quad (57)$$

Obtidas as dimensões das ranhuras e dos dentes do estator, inicia-se o dimensionamento dos condutores do GSIP. O número de caminhos em série (N_{cs}) é definido conforme o esquema de bobinagem dos condutores de armadura e seu valor é dependente do número de caminhos paralelos (N_{cp}), para o gerador projetado seu valor é 1, já que todas as bobinas de uma fase estão ligadas em série. Outra variável importante do dimensionamento dos condutores é número de bobinas por polo por fase do GSIP (N_{abpf}), que depende do número de ranhuras do gerador (N_r), do número de camadas de condutores de armadura (N_{rc}) e do número de polos da máquina (P). As variáveis apresentadas têm seus valores calculados, respectivamente, através de:

$$N_{cs} = \frac{P}{N_{cp}} \quad (58)$$

$$N_{abpf} = \frac{N_r \cdot N_{rc}}{6 \cdot P} \quad (59)$$

A distribuição das bobinas pelas ranhuras do estator depende do tipo de bobinagem adotada para a máquina, o passo da bobina de armadura (α_{ab}) pode ser completo ou encurtado, o fator de encurtamento do passo de bobina (E_{abpf}) pode assumir diversos valores e seu valor, geralmente, está relacionado com a redução do conteúdo harmônico do gerador. O encurtamento do passo da bobina de armadura gera uma redução do fluxo enlaçado pelas

bobinas do estator e essa redução é avaliada pelo fator de redução do fluxo pelo encurtamento da bobina (k_{aeb}) (PYRHÖNEN, 2008). O passo da bobina de armadura e o fator de redução do fluxo pelo encurtamento da bobina são calculados, respectivamente, por meio de:

$$\alpha_{ab} = \frac{P}{2} \cdot \alpha_p \cdot E_{abpf} \quad (60)$$

$$k_{aeb} = \sin \frac{\alpha_{ab}}{2} \quad (61)$$

O número total de espiras da armadura por fase (N_{at}) foi calculado considerando o fator de distribuição da bobina de armadura (k_{adb}) (PYRHÖNEN, 2008). Por meio deste fator, mensura-se a redução da tensão induzida devido a distribuição dos enrolamentos ao longo das ranhuras do estator da máquina, ou seja, quando N_{abpf} não é unitário, um fator que considera uma redução da tensão induzida é incluída no cálculo de N_{at} . O cálculo de N_{at} também considera o fluxo que não atravessa o entreferro da máquina, por meio do valor da constante k_ϕ e leva em conta a tensão interna da máquina (E_a) para realizar o dimensionamento do número de bobinas. Portanto, os parâmetros k_{adb} e N_{at} são obtidos respectivamente, em:

$$k_{adb} = \frac{\sin \left(\frac{N_{abpf} \cdot \alpha_r}{2} \right)}{N_{abpf} \cdot \sin \left(\frac{\alpha_r}{2} \right)} \quad (62)$$

$$N_{at} = \frac{E_a}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_{adb} \cdot k_{aeb} \cdot k_\phi \cdot 2 \cdot \phi_L} \quad (63)$$

Dado o número total de espiras da armadura por fase, pode-se calcular o número de espiras da armadura por bobina (N_{ab}), por meio de:

$$N_{ab} = \frac{N_{at}}{N_{abpf} \cdot N_{cs}} \quad (64)$$

O número de espiras da armadura por bobina, contribui no dimensionamento da área dos condutores de armadura (S_{ac}). Entretanto, o dimensionamento da área dos condutores está relacionado com a área da ranhura (S_r). A área da ranhura e a área dos condutores de armadura são obtidas, respectivamente:

$$S_r = \frac{L_{rt} + L_{rf}}{2} \cdot h_r \quad (65)$$

$$S_{ac} = \frac{S_r \cdot k_{re}}{N_{ab} \cdot N_{rc}} \quad (66)$$

5.4 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA E DA REATÂNCIA SÍNCRONA DO GSIP

Com os dimensionamentos geométricos do rotor, estator, ímãs e condutores de armadura do GSIP feitos, é possível realizar o cálculo da resistência e da indutância da máquina. Dessa maneira, a tensão terminal do gerador e a potência elétrica fornecida pelo GSIP podem ser obtidas.

5.4.1 Cálculo da resistência de armadura

O cálculo da resistência da armadura do gerador exige o conhecimento do comprimento de uma espira de armadura (C_{a1e}). Inicia-se o cálculo do comprimento de uma espira de armadura, determinando-se o valor do passo da bobina de armadura ($D_{\alpha ab}$), por meio de:

$$D_{\alpha ab} = \left(\frac{D_{re}}{2} + E_f + h_{rc} + h_{rp} + \frac{h_r}{2} \right) \cdot \frac{\alpha_{ab}}{\frac{P}{2}} \quad (67)$$

De posse do valor do passo da bobina de armadura, calcula-se o comprimento do arco da cabeça de bobina de armadura (A_{acb}) e finalmente, o comprimento de uma espira de armadura (C_{a1e}), obtidas, respectivamente:

$$A_{acb} = D_{\alpha ab} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (68)$$

$$C_{a1e} = 2 \cdot C_{ax} + 2 \cdot A_{acb} \quad (69)$$

Para calcular a resistência de uma fase do enrolamento de armadura (R_a), necessita-se do valor da resistência do fio utilizado. Como a resistência se altera conforme a bitola do fio é atualizada pelo algoritmo de otimização, o valor da resistência (R_{akm}) foi calculado considerando-se a resistência e a seção de uma classe de fio como base. Com isso, considerando R_b como a resistência de base e S_b como a seção de base, R_{akm} foi obtido por meio de:

$$R_{akm} = \frac{R_b \cdot S_b}{S_{ac}} \quad (70)$$

Finalmente, obtém-se a resistência de armadura através de:

$$R_a = R_{akm} \cdot C_{a1e} \cdot N_{at} \quad (71)$$

5.4.2 Cálculo da indutância e reatância síncrona

A indutância síncrona do GSIP projetado nesta dissertação possui três componentes: a indutância de entreferro (L_{ef}), a indutância mútua de entreferro (M_{ef}) e a indutância de dispersão da ranhura (L_{ran}). Sendo μ_0 a constante de permeabilidade magnética no vácuo, a indutância do entreferro pode ser obtida através de (HENDERSHOT e MILLER, 2010):

$$L_{ef} = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot N_{at}^2 \cdot D_{ei} \cdot C_{ax}}{4 \cdot \left(\frac{P}{2}\right)^2 \cdot (E_f + H_{im})} \quad (72)$$

Já a componente de indutância mútua do entreferro é calculada em (HENDERSHOT e MILLER, 2010):

$$M_{ef} = -\frac{L_{ef}}{3} \quad (73)$$

Com a última componente da indutância síncrona, a indutância de dispersão da ranhura (L_{ran}) (PYRHÖNEN, 2008), obtida, finalmente, calcula-se a indutância síncrona do gerador (L_s) (HENDERSHOT e MILLER, 2010):

$$L_{ran} = 4 \cdot \frac{N_f}{N_r} \cdot \mu_0 \cdot C_{ax} \cdot N_{at}^2 \cdot \left(\frac{h_r}{3 \cdot L_{rt}} + \frac{h_{rp}}{L_{ra}} + \frac{h_{rc}}{L_{rt} - L_{ra}} \cdot \ln \frac{L_{rt}}{L_{ra}} \right) \quad (74)$$

$$L_s = L_{ef} + L_{ran} - M_{ef} \quad (75)$$

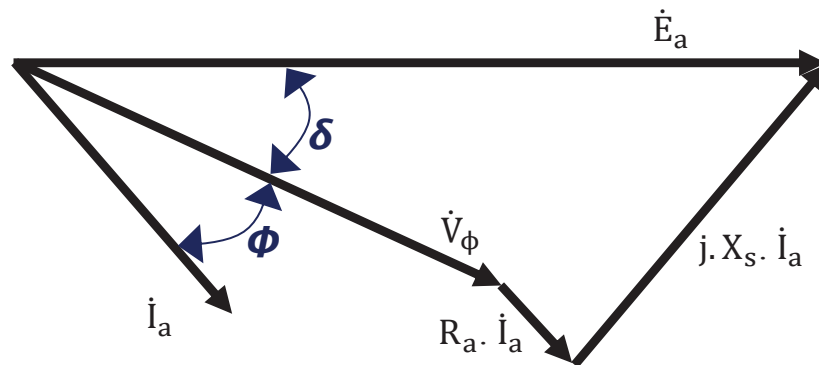
De posse da indutância síncrona do GSIP, obtém-se a reatância síncrona da máquina, multiplicando-se a indutância pela frequência angular:

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \quad (76)$$

5.5 CÁLCULO DA TENSÃO TERMINAL DO GSIP

O diagrama fasorial visto na Figura 27 apresenta os vetores envolvidos no cálculo da tensão terminal do GSIP.

FIGURA 27 – DIAGRAMA FASORIAL DO GSIP.



FONTE: O autor (2021).

Analisando o diagrama fasorial da Figura 27, nota-se que a tensão interna do gerador (\dot{E}_a) e a tensão terminal de fase (\dot{V}_ϕ) estão defasadas pelo ângulo de carga (δ). Já \dot{V}_ϕ e a corrente de armadura (\dot{I}_a) estão defasadas pelo fator de potência em graus (ϕ). Sendo f_p , o fator de potência do gerador, o ângulo de carga e o fator de potência são obtidos por meio de (CHAPMAN, 2013):

$$\delta = \sin^{-1} \frac{(X_s \cdot I_a \cdot \cos \phi - R_a \cdot I_a \cdot \sin \phi)}{E_a} \quad (77)$$

$$\phi = \cos^{-1} f_p \quad (78)$$

De posse dos ângulos apresentados no diagrama fasorial, da corrente de armadura, da resistência e reatância do GSIP e da tensão interna da máquina é possível calcular o valor da tensão terminal de fase do GSIP através de (UMANS, 2014):

$$\dot{V}_\phi = \dot{E}_a - \dot{I}_a \cdot (R_a + j \cdot X_s) \quad (79)$$

5.6 CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA DO GSIP

Com a área dos condutores da armadura determinada na Equação (66), é possível calcular a corrente dos condutores de armadura, multiplicando-se o valor da área pela densidade de corrente de armadura (J_a). Com isso, a corrente elétrica de armadura do GSIP (I_a) é obtida em:

$$I_a = S_{ac} \cdot J_a \quad (80)$$

Dessa forma, a potência elétrica trifásica fornecida pelo GSIP é obtida em:

$$P_e = 3 \cdot V_\phi \cdot I_a \cdot \cos(\phi) \quad (81)$$

5.7 CÁLCULO DAS MASSAS E DOS CUSTOS

A obtenção do custo de um GSIP, exige o conhecimento da massa de cada um dos materiais que compõe o estator e o rotor da máquina, com isso, basta multiplicar as massas obtidas pelo custo específico de cada material. Iniciando-se pela massa de ferro (M_f), calcula-se o volume de ferro presente no estator e no rotor da máquina, desse modo, são obtidos: o volume de ferro na coroa do estator (V_{fec}), o volume de ferro nos dentes do estator (V_{fed}) e o volume de ferro da coroa do rotor (V_{fcr}). Multiplicando-se cada volume pela densidade de ferro (D_f), dada por $7,87 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, são obtidas: a massa de ferro da coroa do estator (M_{fec}), a massa de ferro do dente do estator (M_{fed}) e a massa de ferro da coroa do rotor (M_{fcr}), sendo o volume em mm^3 e a massa em kg. Cada um dos respectivos volumes e massas são obtidos por meio de:

$$V_{fec} = \left(\pi \cdot \frac{(D_{ee})^2 - (D_{fre})^2}{4} \right) \cdot C_{ax} \quad (82)$$

$$V_{fed} = \left(\pi \cdot \frac{(D_{fre})^2 - (D_{ei})^2}{4} - N_r \cdot \left(S_r + L_{rt} \cdot \frac{h_{rc}}{2} + L_{ra} \cdot h_{rp} \right) \right) \cdot C_{ax} \quad (83)$$

$$V_{fcr} = \left(\pi \cdot \frac{(D_{rbi})^2 - (D_{ri})^2}{4} \right) \cdot C_{ax} \quad (84)$$

$$M_{fec} = V_{fec} \cdot D_f \quad (85)$$

$$M_{fed} = V_{fed} \cdot D_f \quad (86)$$

$$M_{fcr} = V_{fcr} \cdot D_f \quad (87)$$

$$M_f = M_{fec} + M_{fed} + M_{fcr} \quad (88)$$

A massa de cobre (M_c) usada no GSIP, é a quantidade de massa contida nos condutores da armadura, sabendo que a densidade do cobre (D_c) é de $8,96 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, o volume de cobre (V_c) e a massa são calculados em:

$$V_c = \frac{N_{ab} \cdot S_{ac} \cdot N_r \cdot C_{a1e}}{2} \quad (89)$$

$$M_c = V_c \cdot D_c \quad (90)$$

A massa dos ímãs (M_i) é determinada pelas dimensões dos ímãs, sabendo que a densidade dos ímãs (D_i) é de $7,5 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, o volume dos ímãs (V_i) e a massa são obtidos por meio de:

$$V_i = H_{im} \cdot L_{im} \cdot P \cdot C_{ax} \quad (91)$$

$$M_i = V_i \cdot D_i \quad (92)$$

A Tabela 3 apresenta os custos específicos de cada material ativo empregado na construção do GSIP, sendo: o custo do ferro (C_f), o custo do cobre (C_c) e o custo do ímã (C_i) dados em US\$/kg. Os valores dos custos específicos são baseados em Kölzer (2017):

TABELA 3 – CUSTOS ESPECÍFICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO GSIP.

Material Ativo	Custo Específico (US\$/kg)
Ferro	3,78
Cobre	13,87
NdFeB	318,10

FONTE: O autor (2021).

A partir dos custos específicos dos materiais usados no GSIP e das massas dos materiais, finalmente, calcula-se o custo total (C_t) do GSIP, por meio de:

$$C_t = M_f \cdot C_f + M_i \cdot C_i + M_c \cdot C_c \quad (93)$$

5.8 CÁLCULO DAS PERDAS E DA EFICIÊNCIA DO GERADOR

5.8.1 Cálculo das perdas do GSIP

Inicia-se o cálculo das perdas do GSIP, considerando as perdas no cobre por meio de:

$$P_{cu} = 3 \cdot R_a \cdot I_a^2 \quad (94)$$

As perdas por histerese na coroa do estator (P_{hce}) do GSIP são calculadas por meio de (GRAUERS, 1996):

$$P_{hce} = kH_{ce} \cdot M_{fec} \cdot \rho_h \cdot \frac{f}{50} \cdot \left(\frac{B_{ce}}{1,5}\right)^2 \quad (95)$$

sendo M_{fec} a massa de ferro na coroa do estator, p_h o fator de perda por histerese dado em W/kg, kH_{ce} um fator adimensional empírico, proposto em Grauers (1996) e B_{ce} a densidade de fluxo na coroa do estator, obtida em:

$$B_{ce} = \frac{k_\phi \cdot \phi_L}{H_{ec} \cdot C_{ax}} \quad (96)$$

Considerando as perdas na coroa do estator devido às correntes de Foucault (P_{fce}), o cálculo é visto em (GRAUERS, 1996):

$$P_{fce} = kF_{ce} \cdot M_{fec} \cdot \rho_f \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_{ce}}{1,5}\right)^2 \quad (97)$$

sendo p_f o fator de perda por correntes de Foucault dado em W/kg e kF_{ce} um fator adimensional empírico, proposto em Grauers (1996).

Com o intuito de calcular as perdas em todo ferro do gerador, considera-se para os dentes do estator, uma metodologia análoga à proposta anteriormente, iniciando pelas perdas por histerese nos dentes do estator (P_{hde}) (GRAUERS, 1996):

$$P_{hde} = kH_{de} \cdot M_{fed} \cdot \rho_h \cdot \frac{f}{50} \cdot \left(\frac{B_{de}}{1,5}\right)^2 \quad (98)$$

sendo M_{fed} a massa de ferro nos dentes da coroa do estator, kH_{de} um fator adimensional empírico, proposto em Grauers (1996) e B_{de} a densidade de fluxo nos dentes do estator, obtida em:

$$B_{de} = \frac{k_\phi \cdot \phi_L}{K_{de} \cdot L_d \cdot C_{ax}} \quad (99)$$

O cálculo das perdas devido às correntes de Foucault nos dentes do estator (P_{fde}), é visto em (GRAUERS, 1996):

$$P_{fde} = kF_{de} \cdot M_{fed} \cdot \rho_f \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_{de}}{1,5}\right)^2 \quad (100)$$

sendo kF_{de} um fator adimensional empírico, proposto em Grauers (1996).

As perdas nos ímãs do GSIP (P_I) podem ser obtidas por meio de (GRAUERS, 1996):

$$P_I = \rho_{im} \cdot P \cdot L_{im} \cdot C_{ax} \quad (101)$$

sendo p_{im} um coeficiente que considera as perdas específicas nos ímãs, dado em W/m².

Todas as constantes utilizadas no cálculo das perdas têm seus valores apresentados na Tabela 4, sendo que todos os fatores são escolhidos baseados em recomendações da literatura (GRAUERS, 1996), exceto o K_{de} , fator que considera o número de dentes que contribuem no cálculo das perdas. Este fator foi ajustado baseado em um análise prévias com simulações computacionais e pode variar dependendo das densidades de fluxo dos dentes.

TABELA 4 – VALORES DAS CONSTANTES UTILIZADAS NO CÁLCULO DAS PERDAS DO GSIP.

Constante	Valor adotado
kH_{ce}	2,00
ρ_h	2,04
kF_{ce}	1,80
ρ_f	0,76
kH_{de}	1,20
kF_{de}	2,50
ρ_{im}	300,00
K_{de}	2,50

FONTE: Adaptado de (GRAUERS, 1996).

As perdas adicionais no GSIP (P_{ad}) são calculadas como uma fração das perdas no ferro, assim como, as perdas rotacionais no GSIP (P_{rot}), que são obtidas como em função da potência elétrica da máquina (RESMINI, 2013):

$$P_{ad} = (P_{fde} + P_{hde} + P_{fce} + P_{hce}) \cdot 0,1 \quad (102)$$

$$P_{rot} = P_e \cdot 0,005 \quad (103)$$

A soma de todas as perdas vistas na seção 5.8.1 fornece o valor das perdas totais no GSIP (P_{tot}):

$$P_{tot} = (P_{fde} + P_{hde} + P_{fce} + P_{hce} + P_{cu} + P_l + P_{ad} + P_{rot}) \quad (104)$$

5.8.2 Cálculo da eficiência do GSIP

O cálculo da eficiência do GSIP (η) é obtido a partir de uma razão entre a potência elétrica do gerador e a soma da potência elétrica com as perdas totais:

$$\eta = \frac{P_e}{P_e + P_{tot}} \quad (105)$$

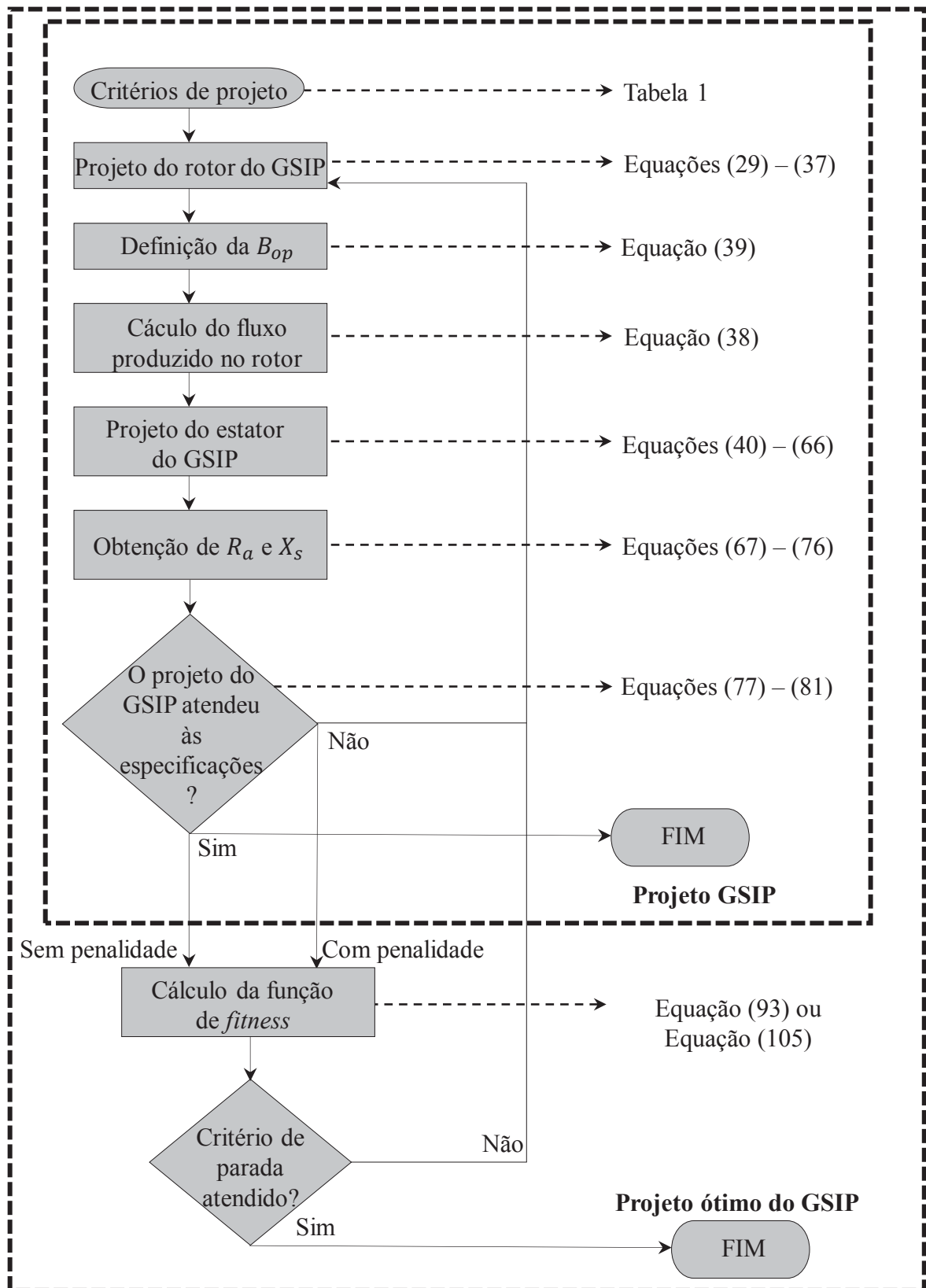
5.9 METODOLOGIA DE PROJETO

Com o equacionamento do projeto do GSIP feito e o cálculo das possíveis funções objetivo do projeto ótimo do GSIP explanadas, apresenta-se, na Figura 28 a metodologia de projeto estabelecida. Nota-se que o projeto inicia pelos critérios de projeto, que são algumas definições sobre a topologia da máquina (camada simples ou dupla e número de ranhuras), alguns critérios de projeto (fator de potência desejado e frequência operativa) e alguns fatores obtidos por meio de simulações computacionais (k_ϕ). Essas grandezas definidas a priori permanecem constantes ao longo de todo o projeto do gerador.

O dimensionamento do rotor do GSIP é realizado por meio das equações construtivas ilustradas no fluxograma da Figura 28, determinando-se as dimensões dos ímãs, calcula-se a densidade de fluxo operativa e o fluxo produzido pelo rotor da máquina. Em seguida, projeta-se o estator do GSIP, novamente, fazendo uso das equações vistas no fluxograma da Figura 28. Com o estator dimensionado, parte-se para o cálculo da resistência de armadura e cálculo da indutância síncrona da máquina. Obtidos os parâmetros que permitem realizar o cálculo das quedas de tensão (R_a e X_s), a corrente elétrica, tensão terminal e potência elétrica da máquina são calculadas. Caso os valores de tensão e potência tenham sido atendidos, o dimensionamento da máquina finda, caso contrário, retorna-se para etapa de dimensionamento do rotor. Vale ressaltar que até esta etapa, o projeto de GSIP realizado não possui um objetivo específico (minimizar o custo ou maximizar a eficiência), desse modo, ele poderia ser realizado por um projetista, que determina as dimensões do gerador, até que seus requisitos de desempenho (V_ϕ e P_e) sejam atendidos (BAZZO, MOURA e CARLSON, 2021).

A etapa que caracteriza o projeto, como o projeto ótimo de um GSIP, é quando as escolhas das dimensões do GSIP são feitas de modo a minimizar ou maximizar uma grandeza. Nesse caso, um algoritmo de otimização determina as dimensões do gerador, visando alcançar o melhor valor possível da função de *fitness*. Considerando os valores de V_ϕ e P_e , o cálculo da função de *fitness* é realizado de duas formas, se as especificações foram atendidas, o cálculo da função de *fitness* é baseado apenas no valor da função objetivo do problema, caso contrário, além do valor da função objetivo, há um valor de penalidade atribuído ao valor da função de *fitness*. Por meio do fluxograma, evidencia-se que o projeto ótimo de um GSIP engloba o dimensionamento completo da máquina, que pode ser realizado sem um objetivo específico.

FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DE PROJETO DO GSIP.



FONTE: Adaptado de (BAZZO, MOURA e CARLSON, 2021).

5.10 ELABORAÇÃO E SOLUÇÃO DOS PROJETOS ÓTIMOS PARA O GSIP

Com o cálculo do custo total e das perdas do GSIP é possível formalizar os problemas de otimização a serem solucionados pelo PSO.

5.10.1 O problema de minimização de custo do GSIP

A minimização do custo do GSIP consiste em reduzir o custo total do GSIP de modo que algumas restrições operativas sejam atendidas. Essas restrições operativas, tornam-se as restrições do problema de otimização, sendo V_t a tensão de linha terminal do gerador, Z o conjunto dos números inteiros e os limites de θ_{rc} sugeridos por (PYRHÖNEN, 2008), o problema de otimização proposto é, matematicamente, apresentado em:

$$\min_{s.a} C_t \quad (106)$$

$$P_e \geq 75 \text{ kW} \quad (107)$$

$$20^\circ \leq \theta_{rc} \leq 50^\circ \quad (108)$$

$$689,5 \text{ V} \leq V_t \leq 690,5 \text{ V} \quad (109)$$

$$N_{ab} \in Z \quad (110)$$

Os limites operativos propostos para a potência elétrica fornecida e a tensão de linha terminal do gerador podem ser alterados dependendo da aplicação do GSIP. O ângulo de inclinação do colarinho da ranhura interfere no cálculo das indutâncias de dispersão e, por isso, possui uma faixa sugerida de valores. Já para N_{ab} é exigido que se assuma um valor inteiro, visto que, não se pode realizar a bobinagem de um gerador para um número não-inteiro de bobinas.

5.10.2 O problema de maximização da eficiência do GSIP

A maximização da eficiência consiste em aumentar a eficiência do GSIP, ou pode ser vista, como a redução das perdas totais do GSIP, pois a potência de saída apresenta pouca variação. Novamente, o problema de otimização considera que algumas restrições operativas devem ser atendidas. A fim de comparar os geradores, as mesmas restrições foram impostas para ambos problemas de otimização. A maximização da eficiência é, matematicamente, formalizada em:

$$\underset{s.a}{\text{máx}} \eta \quad (111)$$

$$P_e \geq 75 \text{ kW} \quad (112)$$

$$20^\circ \leq \theta_{rc} \leq 50^\circ \quad (113)$$

$$689,5 \text{ V} \leq V_t \leq 690,5 \text{ V} \quad (114)$$

$$N_{ab} \in Z \quad (115)$$

5.10.3 Obtenção da Fronteira de Pareto

Os dois problemas de otimização descritos nos itens 5.10.1 e 5.10.2 possuem objetivos contraditórios, ou seja, para melhorar um desses objetivos, o outro tende a piorar. Reduzir o custo do gerador, entre outros fatores, implica na redução da massa de material do gerador, aumentando as densidades de fluxo no gerador e a densidade de corrente dos condutores, e conseqüentemente, as perdas da máquina, piorando seu rendimento.

Uma ferramenta utilizada para a análise nesses casos é a fronteira de Pareto. Ela fornece as soluções dominantes do problema de otimização, desse modo, há um compromisso entre ambos os objetivos. A obtenção da fronteira de Pareto foi realizada por meio das seguintes etapas:

- Obter a solução do problema de otimização descrito no item 5.10.1;
- Obter a solução do problema de otimização descrito no item 5.10.2;
- Calcular o valor do C_t para os dois problema de otimização, desse modo, são obtidos: o custo mínimo (C_{t_min}) e o custo máximo ($C_{t_máx}$) fornecidos pelas soluções dos dois problemas de otimização.
- Calcula-se o passo de custo, subtraindo $C_{t_máx}$ e C_{t_min} e dividindo por 11.
- Obtido o intervalo entre os limites máximos e mínimos da fronteira de pareto, realizam-se dez maximizações da eficiência do gerador, considerando as restrições propostas anteriormente e uma restrição de igualdade para o custo, visto que, para cada otimização o custo deve assumir um valor definido entre os valores $C_{t_máx}$ e C_{t_min} . Esse valor é determinado com base no passo de custo, calculado anteriormente.

A estrutura dos problemas de otimização descrita acima é vista nas Equações (116)-(121). Onde $C_t(i)$ é um vetor que possui dez valores de custo e para cada otimização, a restrição que limita o valor de C_t utiliza um valor desse vetor. Exemplificando, para a primeira

otimização i vale 1, logo o valor de $C_t(1)$ é o C_{t_min} mais o valor do passo de custo, para a segunda otimização, i vale 2 e $C_t(2)$ é o C_{t_min} mais duas vezes o valor do passo de custo. A fronteira de Pareto obtida é apresentada no item 6.4.

$$\underset{s.a}{máx} \eta \quad (116)$$

$$P_e \geq 75 \text{ kW} \quad (117)$$

$$20^\circ \leq \theta_{rc} \leq 50^\circ \quad (118)$$

$$689,5 \text{ V} \leq V_t \leq 690,5 \text{ V} \quad (119)$$

$$C_t = C_t(i) \quad (120)$$

$$N_{ab} \in Z \quad (121)$$

5.10.4 Aplicação do PSO nos projeto ótimos do GSIP

Com a formalização dos problemas de otimização a serem solucionados para projetar GSIP's ótimos, necessita-se escolher quais variáveis do projeto do gerador devem compor as partículas do PSO. Desse modo, cada partícula do algoritmo, possui uma posição X_{id} , que é um vetor contendo informações referentes ao projeto do gerador, ou seja, cada partícula do algoritmo, é uma solução dos problemas de otimização e possui as informações necessárias para projetar um GSIP.

Todos os vetores apresentados nas Equações (11) e (12) possuem a mesma dimensão, que é determinada pelo número de variáveis utilizadas em cada partícula do PSO. As variáveis presentes nas partículas são restritas, possuindo limites máximos e mínimos a serem respeitados. As variáveis escolhidas para compor cada partícula do algoritmo são vistas na Tabela 5.

A Tabela 5 apresenta o conjunto de variáveis que compõem as partículas do PSO, apenas 4 das variáveis escolhidas não são fatores que relacionam um conjunto de dimensões da máquina: D_{re} , P_c , E_a e J_a . O D_{re} é utilizado no cálculo da maioria dos diâmetros vistos no projeto do GSIP, o P_c é usado no cálculo da densidade de fluxo operativa fornecida pelo ímã e no cálculo da altura do ímã. Já E_a ajuda a dimensionar o número de bobinas necessárias para produzir a tensão desejada, enquanto J_a juntamente com a área dos condutores de armadura, determina a corrente de armadura do GSIP. Os demais fatores relacionam algumas dimensões do GSIP, de modo a facilitar a escolha de limites máximos e mínimos para as variáveis.

TABELA 5 – VARIÁVEIS DE CADA PARTÍCULA DA PSO.

Variável	Mínimo	Máximo
k_{ap}	0,35	0,75
D_{re}	200 mm	500 mm
k_{cef}	0,015	0,020
k_{dl}	0,40	1,30
k_{rp}	0,35	1,00
k_{rc}	0,35	1,00
k_{rt}	0,90	1,15
k_{ra}	0,10	0,30
k_{ic}	0,30	0,60
k_{er}	0,10	1,50
P_c	2,0	5,0
E_a	480 V	1200 V
J_a	4,0 A/mm ²	6,5 A/mm ²
k_{cr}	0,33	0,75

FONTE: O autor (2021).

O fator k_{ap} controla o valor do ângulo efetivamente ocupado pelo ímã. Seu ajuste determina a proximidade entre os polos do rotor e caso assuma valores muito altos pode haver uma dispersão de fluxo indesejada entre dois polos adjacentes. Os fatores k_{cef} e k_{dl} controlam os valores do entreferro e do comprimento axial da máquina, respectivamente, com base no valor escolhido para D_{re} . Os fatores k_{rp} e k_{rc} determinam a altura do pescoço da ranhura e a altura do colarinho da ranhura.

Para controlar a largura dos dentes do estator foi usado o fator k_{rt} para determinar a porcentagem ocupada pelo θ_{rt} , com base no valor calculado para α_r . O fator k_{ra} ajusta o valor da largura da abertura da ranhura, baseando-se no valor calculado para L_{rt} . Por fim, o ajuste da altura da coroa do estator e da altura da ranhura são realizados pelas variáveis k_{ic} e k_{er} respectivamente. Sendo que k_{ic} determina a altura da coroa com base na largura de ímã assumida e k_{er} define a altura das ranhuras conforme a altura da coroa é ajustada. O último fator, k_{cr} determina o diâmetro interno do GSIP, baseado na largura do ímã do GSIP.

Os limites das variáveis, que não são fatores, foram definidos partindo de premissas distintas. A faixa de valores adotada para J_a segue os valores recomendados por (PYRHÖNEN, 2008), já os limites de P_c foram estimados considerando que para valores menores que o limite

mínimo proposto, o ímã opera muito próximo à região de desmagnetização, informação obtida com base na análise da curva B-H do material escolhido, e para valores maiores que o limite máximo proposto, o custo e as perdas do GSIP aumentariam muito, tornando a faixa de valores indesejada pelo algoritmo. Tendo em vista que o espaço ocupado pelo GSIP projetado não é limitado, D_{re} possui limites relaxados, enquanto isso, para tensão interna E_a , atribuíram-se limites de modo que a tensão gerada pelo campo principal supra as quedas de tensões presentes no gerador (reação de armadura, indutância própria da bobina e resistência de armadura). Já para os coeficientes presentes na partícula do PSO, os limites foram ajustados de modo que os GSIP's ótimos não apresentassem regiões de saturação que não respeitam os limites de saturação propostos para cada região do gerador (PYRHÖNEN, 2008). Excepcionalmente, no caso de $k_{\alpha p}$, onde os limites propostos visam reduzir a dispersão de fluxo entre polos adjacentes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validar a metodologia de projeto proposta nesta dissertação são consideradas 4 soluções ótimas e analisadas as dimensões dos projetos de GSIP:

- GSIP0: projeto base, feito sem o algoritmo de otimização, com o intuito de servir como comparação para os resultados obtidos com as otimizações.
- GSIP1: projeto ótimo que minimiza o custo do GSIP.
- GSIP2: projeto ótimo que maximiza a eficiência do GSIP.
- GSIP3: melhor solução obtida da fronteira de Pareto.

6.1 PROJETO BASE DE UM GSIP

A modelagem analítica aplicada para o GSIP0 está explanada no fluxograma da Figura 28 e segue a mesma modelagem analítica proposta para os projetos ótimos, entretanto, os valores das constantes foram escolhidos pelo projetista da máquina, sem considerar o método de otimização. A Tabela 6 mostra os valores adotados para realizar o projeto base.

TABELA 6 – VALORES DAS VARIÁVEIS ADOTADAS PARA O PROJETO BASE DO GSIP0.

Variável	GSIP0
k_{ap}	0,66
D_{re}	263 mm
k_{cef}	0,01711
k_{dl}	0,62167
k_{rp}	0,28745
k_{rc}	0,28745
k_{rt}	1,00
k_{ra}	0,2450
k_{ic}	0,5
k_{er}	0,9
P_c	5
E_a	520 V
J_a	5 A/mm ²
k_{cr}	0,495

FONTE: O autor (2021).

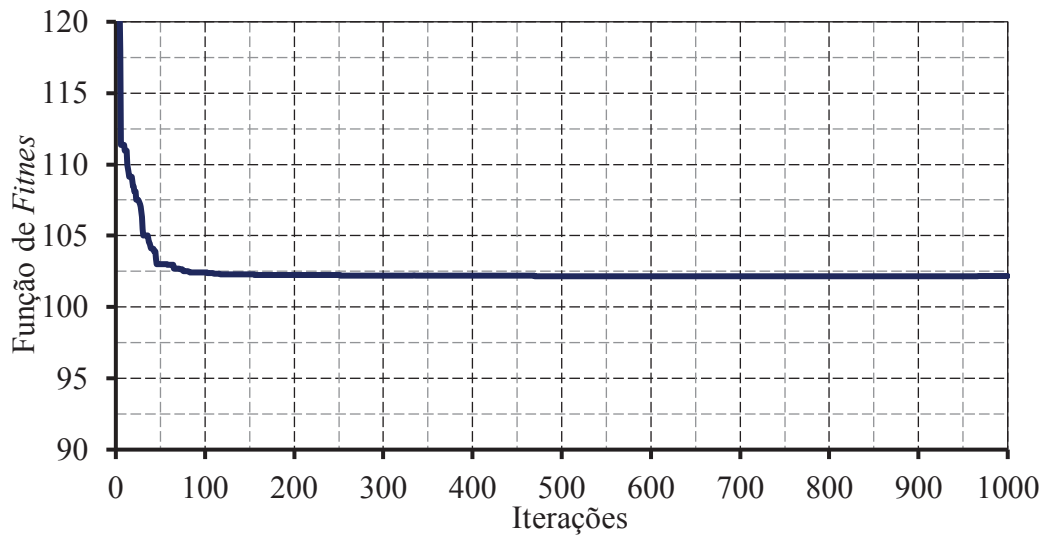
Com as variáveis de projeto definidas, o projeto base foi comparado através de simulações computacionais, utilizando o *software* EFCAD (BASTOS e SADOWSKI, 2008). Os resultados obtidos com a simulação computacional ficaram próximos aos resultados obtidos com a rotina analítica. Assim, considera-se que as hipóteses usadas na rotina analítica são válidas. O maior desvio calculado é para a potência elétrica do GSIP (6,923%) e o menor desvio para a tensão terminal da máquina (3,115%). O desvio da potência elétrica pode ser justificado pelo fato de que os desvios da tensão terminal e da corrente de armadura (3,896%) contribuem no acréscimo de desvio da potência.

6.2 MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS DO GSIP

6.2.1 Solução do problema de otimização

Com a partícula do PSO definida, basta ajustar o valor das constantes do algoritmo evolutivo para encontrar a solução do problema de otimização proposto no item 5.10.1. As constantes C_1 , C_2 e W são ajustadas através de simulações computacionais, analisando o comportamento da função de *fitness*, conforme os valores das constantes eram alterados. O ajuste fino do valor das constantes contribui com que o algoritmo encontre o ótimo global do problema de otimização e atenda todas as restrições operativas impostas. Vale salientar que a função de *fitness* é composta pela função objetivo e as restrições do problema de otimização, Portanto, os valores das restrições e da função objetivo foram normalizados, para estarem na mesma ordem de grandeza, logo, o valor mostrado no gráfico, não corresponde ao valor mínimo de custo encontrado.

O conjunto de valores para as constantes do algoritmo possui 500 partículas como tamanho do enxame, o coeficiente W foi adotado com valor de 0,7 e os coeficientes C_1 e C_2 assumidos como 1,3 e 1,9, respectivamente. Dado o conjunto escolhido, espera-se que o algoritmo evite mínimos locais e mantenha um compromisso entre a busca local e global ao longo da região factível do problema. O critério de parada utilizado foi o número máximo de iterações, definido em 1000 iterações. A Figura 29 apresenta a evolução dos valores de *fitness* ao longo das iterações do PSO.

FIGURA 29 – VALOR DA FUNÇÃO DE *FITNESS* DO CUSTO AO LONGO DAS ITERAÇÕES.

FONTE: O autor (2021).

Pela inspeção da Figura 29, nota-se que até a 50ª iteração o algoritmo apresenta uma rápida redução do valor da função. Entre a 100ª iteração até a 400ª iteração, observa-se uma estagnação do valor de *fitness* até seu último decaimento, próximo à 480ª. A estabilização do valor da função de *fitness* antes de atingir o valor máximo de iterações, confirma que o valor escolhido para número máximo de iterações é adequado. Ademais, dado o comportamento da função de *fitness*, um menor número de iterações poderia ter sido utilizado como critério de parada. Os valores da melhor partícula do PSO são vistos na Tabela 7.

Para reduzir o custo total do gerador, o PSO optou pelos limites mínimos para os coeficientes k_{cef} , k_{rp} , k_{rc} , k_{rt} , k_{ic} e k_{cr} . A opção pelos menores valores possíveis para os coeficientes mostra que o algoritmo compreendeu que para a minimização do custo, há a necessidade de reduzir ao máximo as dimensões geométricas, principalmente, as que contribuem significativamente no cálculo dos volumes dos materiais. O valor mínimo de k_{cef} contribui na redução dos diâmetros da máquina, já o valor mínimo atribuído aos demais coeficientes, reduz a quantidade de ferro utilizada na concepção do gerador. Por exemplo, o valor mínimo de k_{ic} diminui a altura da coroa do estator e o valor mínimo para k_{cr} reduz a coroa do rotor. A escolha da maior densidade de corrente (J_a) permitida, é um indicativo que o algoritmo projetou um gerador que extraísse a maior potência elétrica possível, para a quantidade de material ativo disponível. O fator k_{ra} aumenta a largura da abertura da ranhura, fato que contribui na redução da quantidade de ferro utilizado, justificando o valor máximo escolhido pelo PSO.

TABELA 7 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP1.

Variável	Valor ótimo
$k_{\alpha p}$	0,7500
D_{re}	266,673 mm
k_{cef}	0,0150
k_{dl}	0,5835
k_{rp}	0,350
k_{rc}	0,350
k_{rt}	0,900
k_{ra}	0,300
k_{ic}	0,300
k_{er}	1,1352
P_c	3,4643
E_a	624,039 V
J_a	6,500 A/mm ²
k_{cr}	0,333

FONTE: O autor (2021).

Considerar P_c como variável no processo de otimização, permitiu que o algoritmo testasse um conjunto maior de possíveis geometrias para realizar a redução de custo total. Com o valor intermediário obtido pela otimização, nota-se a dificuldade de determinar o valor do coeficiente de permeância antes de um processo de otimização, além disso, a escolha de um valor fixo para P_c poderia interferir no dimensionamento de outros parâmetros do gerador e afetar o resultado final da otimização. O valor ótimo de $k_{\alpha p}$ mostra que o PSO preferiu empregar a largura máxima de ímã disponível para realizar o projeto e optou por reduzir a altura do ímã, para reduzir os custos do gerador. Os valores sugeridos de D_{re} e k_{dl} mostram que o algoritmo teve a liberdade necessária para testar inúmeros diâmetros e comprimentos para o gerador, já que, nenhuma das grandezas teve seu limite mínimo ou máximo escolhido como dimensão ótima. É possível calcular o valor das restrições impostas ao PSO, com os dados da melhor partícula do PSO. Como esperado, a solução ótima atendeu todas as restrições operativas e os valores são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP1.

Variável	GSIP1
P_e	75,000 kW
θ_{rc}	29,4842 °
V_t	689,998 V
N_{ab}	27,000 espiras

FONTE: O autor (2021).

6.2.2 Redução de custos em relação ao GSIP0

Uma das maneiras de realizar a minimização de custos feita no projeto ótimo do GSIP é por meio da redução de material ativo utilizado na construção do gerador. Analisando-se as dimensões do GSIP1 e comparando-as com as dimensões do GSIP0 percebe-se que algumas reduções na quantidade de material utilizado na construção do GSIP1 são realizadas. O GSIP1 possui ímãs mais baixos quando comparado ao GSIP0, mostrando que o PSO compreendeu que reduzir a massa de ímãs, material mais caro do GSIP, contribuiria na redução do custo total do GSIP. Além disso, a coroa do estator e do rotor do GSIP1 são menores que as coroas do gerador base, evidenciando-se que houve também uma redução da massa de ferro utilizada na construção do GSIP1. Como os geradores não possuem o mesmo comprimento axial e o valor do custo é calculado com base no volume de cada material, uma comparação entre os custos de cada um dos materiais presentes nos GSIP's é proposta, para confirmar que houve redução no custo do GSIP1. A comparação dos custos é vista na Tabela 9.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE MATERIAL DO GSIP0 COM O GSIP1.

Custos	GSIP0 (US\$)	GSIP1 (US\$)	Desvios
C_c	555,12	486,65	-12,33%
C_i	4.785,92	3.232,40	-32,46%
C_f	504,20	367,82	-27,04%
C_t	5.845,24	4.086,80	-30,08%

FONTE: O autor (2021).

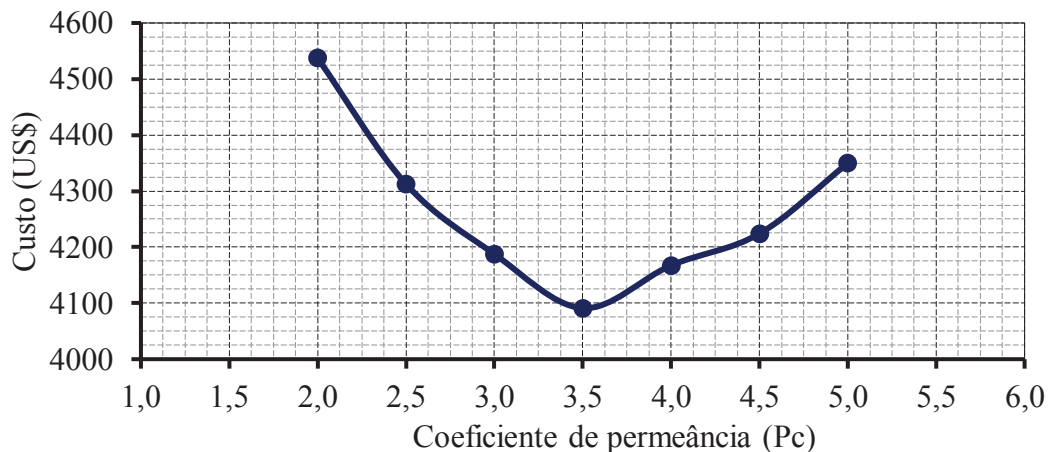
A Tabela 9 ressalta a redução dos custos de material ativo, comparado o GSIP0 e o GSIP1, as reduções percentuais são calculadas considerando os valores dos custos do GSIP0 como referência. Nota-se que a maior redução de custo foi feita no custo dos ímãs utilizados no projeto, visto que, eles são o material mais caro do projeto. Também houveram reduções dos custos de ferro e cobre, sendo que o custo de ferro teve a segunda maior redução. A redução do

custo total do GSIP foi de aproximadamente 30% e mesmo com a redução máxima possível de uso do material N_dF_eB , o valor do ímã é a maior contribuição no custo total do gerador.

6.2.3 Minimizações de custo com valores fixos para o coeficiente de permeância

A fim de avaliar o efeito da inclusão do coeficiente de permeância na resposta do problema de otimização, são solucionados diversos problemas de otimização, seguindo o item 5.10.1, porém, considera-se o mesmo valor para os limites mínimos e máximos atribuídos para a variável P_c . Dessa forma, a minimização de custos é feita com a variável P_c constante durante todo o processo de minimização de custos. São realizadas sete minimizações de custo, com o coeficiente de permeância variando entre [2,0...5,0] com passo de 0,5. O custo mínimo encontrado, considerando o respectivo valor de P_c , para cada uma das otimizações é visto na Figura 30.

FIGURA 30 – CUSTO DO GSIP EM FUNÇÃO DO VALOR DO COEFICIENTE DE PERMEÂNCIA.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 30 fornece os valores ótimos de custo dos GSIP's considerando diversos valores de coeficientes de permeância fixos, ao longo de cada um dos processos de otimização. Sabendo que o valor que fornece o custo mínimo do GSIP para o coeficiente de permeância é 3,4643, valor obtido como resultado da melhor partícula do enxame visto na Tabela 7, nota-se que os custos mínimos obtidos para cada um dos valores de coeficiente de permeância reduzem, conforme o valor fixo do coeficiente de permeância, aproxima-se do valor ótimo, sendo o menor custo para o GSIP, obtido para o coeficiente de permeância fixo em 3,5. Conforme os valores do coeficiente de permeância distaciam-se do valor ótimo, o custo mínimo dos GSIP's aumenta, tanto para maiores valores do coeficiente como para menores valores do coeficiente. Dessa forma, ressalta-se a importância da inclusão do coeficiente de permeância como variável do

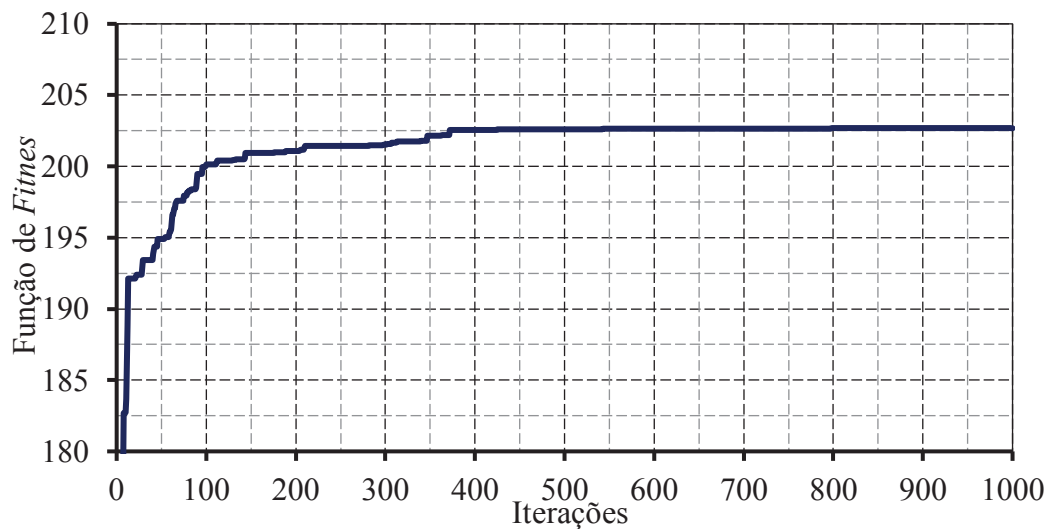
problema de otimização, mostrando que a fixação do coeficiente em um valor constante, limita o universo de soluções possíveis e, para este objetivo, aumentaria o custo do GSIP.

6.3 MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO GSIP

6.3.1 Solução do problema de otimização

Novamente, o ajuste do valor das constantes do algoritmo evolutivo para encontrar a solução do problema de otimização, proposto no item 5.10.2, é feito. O conjunto de constantes que apresenta os melhores valores de função *fitness* são os mesmos propostos na minimização de custos. Desse modo, o enxame possui 500 partículas, o coeficiente W foi adotado com valor de 0,7 e os coeficientes C_1 e C_2 assumidos como 1,3 e 1,9, respectivamente. Outra vez, o critério de parada utilizado foi o número máximo de iterações, definido em 1000 iterações. A Figura 31 apresenta a evolução dos valores de *fitness* ao longo das iterações do PSO.

FIGURA 31 – VALOR DA FUNÇÃO DE FITNESS DA EFICIÊNCIA AO LONGO DAS ITERAÇÕES.



FONTE: O autor (2021).

Examinando a Figura 31, nota-se que até a 150ª iteração o algoritmo apresenta um rápido e significativo aumento do valor da função de *fitness*. Entre a 160ª iteração até a 400ª iteração, observam-se pequenas evoluções do valor de *fitness*, até seu último aumento, próximo à 550ª. Mais uma vez, a estabilização do valor da função de *fitness* antes de atingir o valor máximo de iterações, confirma que o valor estabelecido para o número máximo de iterações como critério de parada é adequado. Os valores da melhor partícula do PSO são vistos na Tabela 10.

TABELA 10 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP2 .

Variável	Valor ótimo
$k_{\alpha p}$	0,750
D_{re}	261,283 mm
k_{cef}	0,0150
k_{dl}	1,179
k_{rp}	0,350
k_{rc}	0,350
k_{rt}	1,150
k_{ra}	0,100
k_{ic}	0,600
k_{er}	0,4525
P_c	3,104
E_a	480,000 V
J_a	4,000 A/mm ²
k_{cr}	0,6212

FONTE: O autor (2021).

Pela análise da Equação (105), para que haja o aumento da eficiência do GSIP, as perdas totais do gerador devem ser minimizadas ao máximo, portanto, o algoritmo altera as dimensões do gerador de modo que as perdas da máquina reduzam. A opção pelos limites máximos para as variáveis k_{rt} e k_{ic} corrobora com essa afirmação, visto que, a opção por esses valores dos limites promove o aumento da massa de ferro nas regiões do dente do estator e na coroa do estator, conseqüentemente, reduzindo as densidades de fluxo nessas regiões e diminuindo as perdas do GSIP.

Outras escolhas do PSO mostram que o algoritmo tenta reduzir todos os tipos de perdas presentes no GSIP. As escolhas anteriores, contribuem na redução das perdas por histerese e Foucault, já a escolha pelo limite mínimo para o coeficiente k_{cef} , é justificada pelo fato de que com o menor valor possível de entreferro, o algoritmo reduz os diâmetros do GSIP, minimizando o arco da cabeça de bobina, de modo que, o valor atribuído para a resistência de armadura diminui as perdas no cobre do GSIP. Outras escolhas do PSO, justificadas pela redução das perdas no cobre são J_a e E_a . Nota-se que o algoritmo optou pela menor densidade possível, reduzindo o valor da corrente de armadura da máquina, e por conseguinte, as perdas no cobre do GSIP. A mesma linha de raciocínio é válida para a tensão interna do GSIP, quanto

menor a tensão interna da máquina, menor o número de bobinas no estator, e novamente, há uma redução no valor das perdas do cobre. Os valores mínimos escolhidos para os coeficientes k_{rp} e k_{rc} são justificados pela tentativa de reduzir a massa de ferro dos dentes do estator, grandeza considerada na formulação das perdas.

Outra vez, o valor escolhido para o coeficiente de permeância é um valor intermediário, enaltecendo a importância da inclusão como variável do problema de otimização. Novamente, o PSO optou pelo projeto do ímã com a maior largura possível, atribuindo ao fator k_{ap} o limite máximo disponível. Os valores sugeridos de D_{re} e k_{dl} ilustram que o algoritmo teve flexibilidade na escolha para os diâmetros e para o comprimento da máquina, desse modo, considera-se a faixa de valores proposta adequada para o projeto da máquina. Com as dimensões ótimas definidas para o GSIP, novamente, são obtidos os valores de todas as restrições do problema de otimização e verifica-se, por meio da Tabela 11, que todas restrições do problema são respeitadas.

TABELA 11 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP2.

Variável	GSIP2
P_e	75,000 kW
θ_{rc}	26,459 °
V_t	689,978 V
N_{ab}	11,000 espiras

FONTE: O autor (2021).

6.3.2 Comparação de Desempenho e Custos entre os GSIP's Ótimos

De modo a determinar a melhor solução entre as duas otimizações propostas, analisam-se as melhores partículas de ambas otimizações, da minimização dos custos e da maximização da eficiência. Notam-se diferenças claras nas escolhas feitas pelo PSO, na minimização de custo, o algoritmo buscou ao máximo reduzir todas as massas dos materiais presentes no GSIP, com foco na massa de ímãs, visto que, é o material com o maior custo. Já na maximização da eficiência, o PSO buscou reduzir as densidades de fluxo na coroa e nos dentes do estator, visando a redução das perdas por histerese e Foucault. Além do mais, para minimizar as perdas no cobre, o algoritmo optou pela menor densidade de corrente possível, exatamente o oposto da minimização de custo. A Tabela 12 apresenta as diferenças de custo e eficiência entre os geradores ótimos projetados.

TABELA 12 – DIFERENÇAS ENTRE CUSTOS E EFICIÊNCIAS DO GSIP1 E GSIP2.

Variável	GSIP1	GSIP2
C_t	US\$ 4.086,80	US\$ 7.124,20
η	0,9524	0,9744

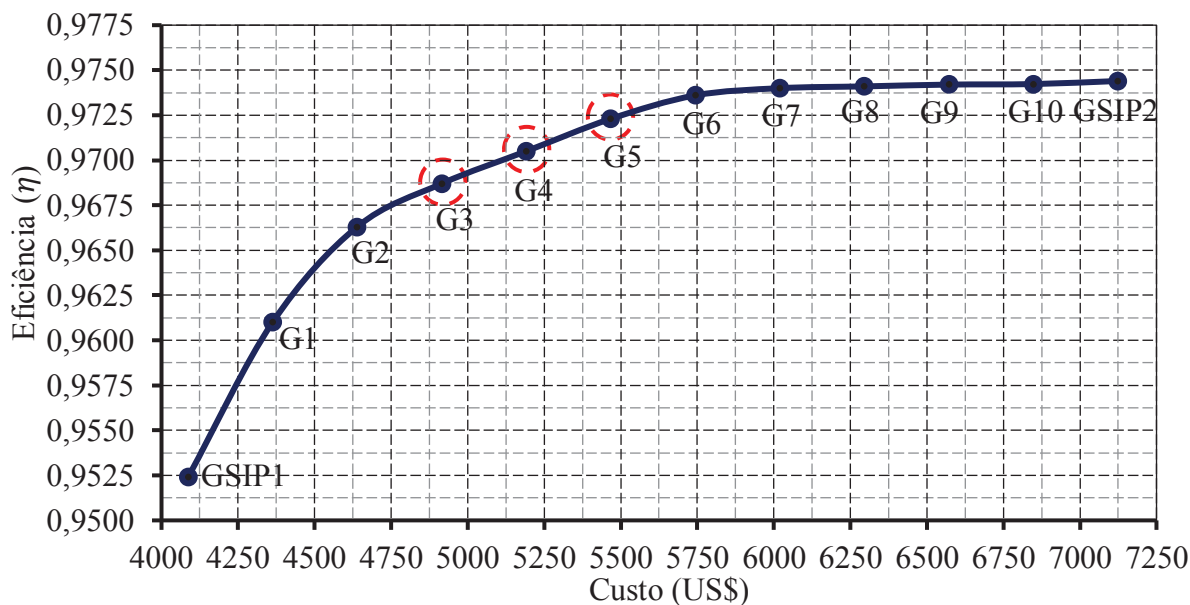
FONTE: O autor (2021).

A análise dos valores de custo e eficiência para os GSIP's ótimos, por meio da Tabela 12, evidencia que a melhora de um objetivo, afeta diretamente o valor do outro. Nota-se que o GSIP1 possui uma eficiência, aproximadamente, 2% menor que o GSIP2. Considerando a quantidade de energia convertida por um gerador ao longo de toda sua vida útil, essa porcentagem pode representar um grande valor de energia e dinheiro (BAZZO, *et al.*, 2016). Entretanto, o valor obtido de custo de material ativo o GSIP2 é 74% maior do que o custo para produzir o GSIP1. Logo, é necessário estabelecer um compromisso entre esses dois objetivos, de modo a se obter as dimensões ótimas para o GSIP, considerando-se a eficiência e o custo do gerador. Este compromisso pode ser avaliado através da construção da fronteira de Pareto.

6.4 ANÁLISE DA FRONTEIRA DE PARETO

Com o intuito de se obter um GSIP de modo que as dimensões ótimas fossem escolhidas considerando o custo e a eficiência do gerador, faz-se necessário a obtenção da fronteira de Pareto, ela fornece um conjunto de soluções possíveis, considerando ambos objetivos. A fronteira de Pareto foi determinada por meio da metodologia proposta no item 5.10.3. Desse modo, são solucionados dez problemas de otimização, visando a maximização da eficiência do GSIP. Porém, todas esses problemas de otimização possuem uma restrição de igualdade para o custo do GSIP. Em vista disso, a fronteira de Pareto obtida possui 12 projetos ótimos de GSIP, os dez projetos obtidos seguindo a metodologia descrita no item 5.10.3 e os limites máximo e mínimo da curva, onde o limite máximo é dado pelo projeto ótimo do GSIP2 e o limite mínimo pelo projeto ótimo do GSIP1. A Figura 32 mostra a fronteira de Pareto obtida, com as 12 soluções indicadas por pontos.

FIGURA 32 – FRONTEIRA DE PARETO.



FONTE: O autor (2021).

Os dez GSIP's projetados seguindo a metodologia proposta no item 5.10.3 são nomeados de G1 até G10, para facilitar a análise dos resultados. Observando-se a fronteira de Pareto, vista na Figura 32, nota-se que a partir de G6 o aumento da eficiência sofre uma forte estagnação, em torno de 0,9725, apresentando pequenas evoluções, enquanto isso, o valor de custo da máquina continua subindo. Dessa maneira, as soluções obtidas com o custo superior a US\$ 5.750,00 não são consideradas soluções que possuam um bom compromisso entre eficiência e custo. Por outro lado, percebe-se que para as primeiras soluções é possível obter um aumento significativo na eficiência, sem acarretar em um acréscimo elevado no valor da máquina. Comparando-se os valores de custo e eficiência dos geradores GSIP1 e G2, percebe-se que aumentando, aproximadamente, US\$ 550,00 no custo do gerador, a eficiência cresce de 0,9525 (eficiência do GSIP1) para 0,9662 (eficiência do G2), o que representa um aumento de 1,45% no valor da eficiência. Além disso, nota-se que a eficiência apresenta um crescimento constante para os geradores G3, G4 e G5 e desse modo, as soluções com eficiência abaixo de G3 não são consideradas.

Portanto, dentre as soluções apresentadas, três se mostram interessantes, com bom compromisso entre os dois objetivos, destacadas na Figura 32 por circunferências vermelhas. Todas apresentam uma boa relação entre custo e eficiência e a escolha da melhor entre as três, não é trivial, dependendo muito da aplicação do GSIP. Caso reduzir o custo do GSIP seja principal meta, recomenda-se o gerador G3, por outro lado, caso a eficiência do GSIP seja o escopo principal do projeto, recomenda-se o gerador G5. Opta-se por analisar as dimensões do

G4, que possui eficiência superior a 0,97 e com um custo inferior a US\$ 5.250,00. Para padronizar o nome das máquinas analisadas e válidas G4 é nomeado como GSIP3, a partir deste ponto.

6.4.1 Análise do GSIP com melhor custo-benefício

Como todas as otimizações realizadas para se obter a fronteira de Pareto são otimizações mono-objetivo, é conhecida a melhor partícula do enxame para cada uma das soluções vistas na curva. O GSIP escolhido possui uma eficiência de 0,9705 e um custo US\$ 5.191,50. Para compreender como uma boa relação entre a eficiência e o custo do GSIP3 altera as dimensões da máquina, a melhor partícula do PSO, para o GSIP3 é vista na Tabela 13.

TABELA 13 – PARÂMETROS DA MELHOR PARTÍCULA DO PSO PARA O GSIP3.

Variável	Valor ótimo
$k_{\alpha p}$	0,750
D_{re}	287,313 mm
k_{cef}	0,0150
k_{dl}	0,673
k_{rp}	0,350
k_{rc}	0,350
k_{rt}	0,937
k_{ra}	0,300
k_{ic}	0,512
k_{er}	0,553
P_c	2,944
E_a	504,930 V
J_a	4,469 A/mm ²
k_{cr}	0,3788

FONTE: O autor (2021).

Comparando-se os parâmetros das melhores partículas, vistos nas Tabela 7, Tabela 10 e Tabela 13, notam-se algumas semelhanças nas escolhas entre o GSIP3 e os geradores GSIP1 e GSIP2. Para os três geradores o PSO optou pelo limite máximo para $k_{\alpha p}$ e o limite mínimo para os coeficientes k_{cef} , k_{rp} e k_{rc} . Claramente, reduzir o entreferro da máquina melhora tanto a eficiência do GSIP, como reduz os custos do gerador, justificando o limite mínimo atribuído ao fator que controla o valor de entreferro. Além disso, como o modelo não considera as

densidades de fluxo nas pontas dos dentes do GSIP, para todas otimizações o algoritmo optou por minimizar a massa de ferro nas pontas dos dentes, decisão representada pela escolha dos limites mínimos para k_{rp} e k_{rc} . O valor máximo para o fator que controla o passo efetivo do polo mostra que o algoritmo prefere sempre projetar um GSIP com o ímã mais largo, do que aumentar sua altura.

As primeiras diferenças nas escolhas são vistas para os valores de D_{re} e P_c , onde nota-se que entre os três GSIP analisados, para o GSIP3 o valor adotado para P_c é o menor e para D_{re} é o maior. Comparando-se, novamente, as três melhores partículas vistas na Tabela 7, Tabela 10 e Tabela 13, percebe-se que os valores atribuídos para E_a , J_a , k_{er} , k_{rt} e k_{ic} mostram que o GSIP3 possui dimensões que visam o aumento da eficiência, buscando reduzir as perdas, por meio da redução das densidades de fluxo, porém, considera-se também o valor máximo de custo que o GSIP pode assumir, visto que, todas as variáveis citadas acima possuem valores entre os valores indicados na partícula do GSIP1 e a partícula do GSIP 2. Para facilitar as comparações entre os três geradores projetados, algumas dimensões das máquinas, valores de massa, custo e eficiência de cada um dos geradores são apresentados na Tabela 14.

TABELA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS GRANDEZAS DOS GERADORES ÓTIMOS PROJETADOS.

Variável	GSIP1	GSIP2	GSIP3
M_f	97,30 (kg)	310,95 (kg)	192,14 (kg)
M_c	35,08 (kg)	32,10 (kg)	36,48 (kg)
M_i	10,16 (kg)	17,30 (kg)	12,44 (kg)
C_t	(US\$) 4.086,80	(US\$) 7.124,20	(US\$) 5.191,50
η	0,9524	0,9744	0,9705
D_{re}	266,67 (mm)	261,28 (mm)	287,31 (mm)
C_{ax}	155,60 (mm)	308,05 (mm)	193,21 (mm)
E_f	4,00 (mm)	3,91 (mm)	4,31 (mm)
L_d	11,78 (mm)	13,04 (mm)	12,97 (mm)
H_{ec}	31,45 (mm)	61,56 (mm)	57,75 (mm)
L_{im}	104,72 (mm)	102,60 (mm)	112,82 (mm)
H_{im}	13,85 (mm)	12,16 (mm)	12,68 (mm)
P_c	3,46	3,10	2,94
R_a	0,192 (Ω)	0,066 (Ω)	0,094 (Ω)
J_a	6,50 (A/mm ²)	4,00 (A/mm ²)	4,47 (A/mm ²)

FONTE: O autor (2021).

A Tabela 14 apresenta valores de dimensões, densidade de corrente, resistência, custo, eficiência e as massas dos materiais para os três geradores ótimos projetados, a fim de estabelecer algumas comparações entre as máquinas. Partindo dos valores das massas dos materiais, nota-se que o GSIP1 possui os menores valores de massa de ímãs e massa de ferro, visando a redução de custos, enquanto isso, o GSIP2 apresenta o maior valor de massa de ferro entre os três geradores, fato atrelado à redução da densidade de fluxo no ferro, buscando a redução das perdas. Nota-se, claramente, que o GSIP3 buscou valores para as variáveis que apresentassem uma boa relação entre a maximização da eficiência e a minimização do custo. Além dos valores de custo e eficiência do GSIP3 estarem dentro da faixa de valores assumidos pelo GSIP1 e pelo GSIP2, a massa de ferro, a massa de ímãs e algumas dimensões do GSIP3 (J_a , R_a , H_{ec} e L_d) apresentam-se entre os valores vistos nas dimensões dos GSIP1 e GSIP2.

Considerando H_{ec} e L_d , nota-se que o algoritmo busca reduzir as perdas no ferro do GSIP3, aumentando a quantidade de ferro utilizada em comparação com o GSIP1, mas sem ultrapassar a quantidade de ferro utilizada no GSIP2. Raciocínio análogo pode ser estabelecido considerando as perdas no cobre, já que J_a e R_a são menores que os valores vistos no GSIP1, mas não ultrapassam os valores mínimos assumidos pelo GSIP2. À vista disso, indica-se que há um equilíbrio entre a maximização da eficiência e a minimização dos custos. Por fim, de posse da melhor partícula, é visto que as demais restrições do problema de otimização também são respeitadas, como mostra a Tabela 15.

TABELA 15 – VALORES DAS RESTRIÇÕES OPERATIVAS PARA O GSIP3.

Variável	GSIP3
P_e	75,005 kW
θ_{rc}	29,963 °
V_t	690,327 V
N_{ab}	17,040 espiras

FONTE: O autor (2021).

6.5 COMPARAÇÃO DOS PROJETOS DO GSIP

As comparações dos resultados apresentados pelas otimizações são realizadas através de simulações computacionais com o Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* EFCAD (BASTOS e SADOWSKI, 2008). Dessa forma, é possível avaliar a robustez da modelagem proposta para o projeto do GSIP, visto que, o *software* considera a presença do ferro e os efeitos de sua saturação.

6.5.1 Comparação do projeto ótimo de minimização de custos do GSIP.

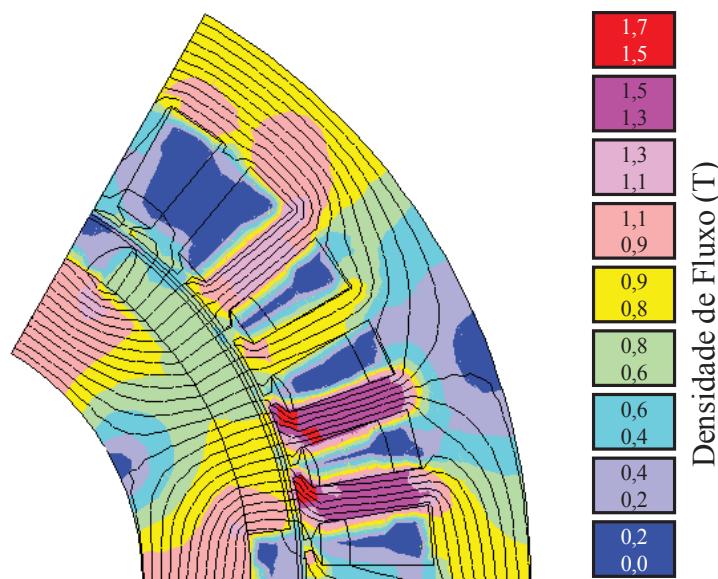
Para o GSIP1, são calculados os desvios entre o modelo analítico proposto e as simulações numéricas. Os desvios apresentados na Tabela 16 são relativos, usando como base o valor obtido na simulação. O menor desvio é o da tensão terminal, mesmo com o desvio da significativo visto na indutância síncrona. O maior desvio ocorre no cálculo da indutância síncrona, mostrando que mesmo a modelagem analítica do gerador sendo bem fundamentada (HENDERSHOT e MILLER, 2010) e (PYRHÖNEN, 2008), um refinamento do modelo, através do uso de rede de relutâncias, poderia ser pautado dependendo das exigências do projeto. De modo geral, os desvios são pequenos considerando a simplicidade do modelo utilizado.

TABELA 16 – DESVIO ENTRE O GSIP1 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Variável	GSIP1	MEF	Desvios
V_t	689,99 V	679,50 V	1,55%
I_a	69,73 A	68,07 A	2,44%
P_e	75,00 kW	72,52 kW	3,42%
L_s	12,45 mH	11,245 mH	10,71%

FONTE: O autor (2021).

FIGURA 33 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP1 OPERANDO EM PLENA CARGA.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 33 apresenta a densidade de fluxo magnético do GSIP1, operando em carga nominal, obtida através da simulação computacional com o MEF. A simulação permite analisar

fenômenos eletromagnéticos devido à presença do ferro, que é desconsiderada no modelo, e os efeitos de sua saturação. Os valores de saturação obtidos com a simulação devem ter seu valor avaliado na fase de validação do projeto. Considerando os limites de densidade de fluxo sugeridos por (PYRHÖNEN, 2008), para os principais pontos do gerador, evidencia-se que mesmo na região mais saturada do GSIP1 (as laterais das pontas dos dentes do estator) o valor de indução sugerido é respeitado, entre 1,5 – 2,0T. A coroa do estator é a região do GSIP1 que opera com a menor saturação, visto que o limite máximo sugerido é 1,5T, e a maior parte da coroa opera na faixa de 0,6 – 0,9T. Já a coroa do rotor, situada abaixo dos ímãs, é a região que mais se aproxima do limite máximo de saturação, 1,5 T, entretanto, nota-se que a maior parte da coroa do estator opera na faixa de 0,8 – 1,1T. Com isso, pode-se concluir que os limites, mínimos e máximos, propostos para cada uma das variáveis que compõe as partículas do PSO, vistos no item 5.10.4, asseguram que o GSIP opere dentro de uma faixa de saturação sugerida pela bibliografia.

6.5.2 Comparação do projeto ótimo de maximização da eficiência do GSIP.

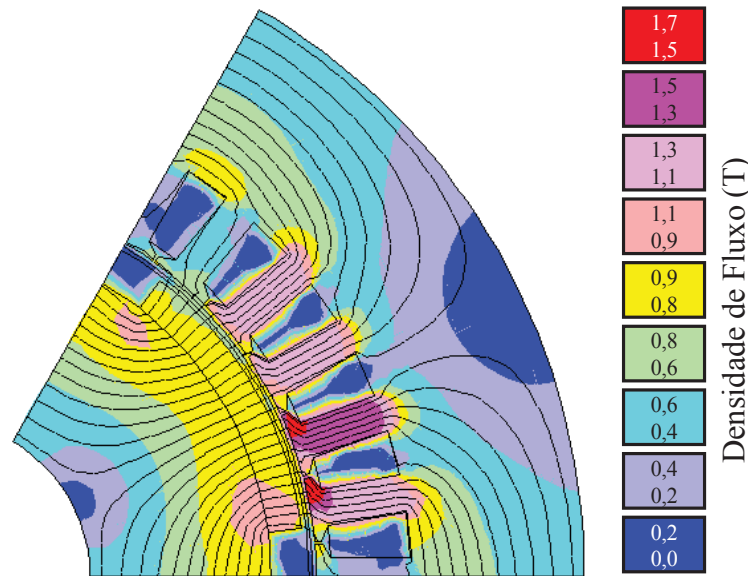
Considerando o GSIP2, seguindo a mesma metodologia de comparação aplicada no item 6.5.1, logo, são calculados os desvios entre a otimização e o método dos elementos finitos, apresentados na Tabela 17. Outra vez, o maior desvio ocorre no cálculo da indutância síncrona, mesmo com o erro reduzindo para 8,36%. O aumento de, aproximadamente, 0,5% no desvio de tensão terminal, comparando-se com o caso anterior, pode explicar o aumento de 1% no desvio da potência elétrica, visto que, os desvios de tensão e corrente contribuem diretamente no cálculo da potência. Vale salientar, que mesmo com os aumentos dos desvios, todas as variáveis elétricas do GSIP2, seguem com desvios menores que 5%, exceto a indutância. Vale ressaltar que os valores das perdas, utilizados no cálculo da função objetivo do GSIP2 e calculados de forma analiticamente, não foram comparados com os valores obtidos com as simulações numéricas, pois a versão do *software* utilizada neste trabalho não possui essa opção.

TABELA 17 – DESVIO ENTRE O GSIP2 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Variável	GSIP2	MEF	Desvios
V_t	689,97 V	676,33 V	2,01%
I_a	69,73 A	67,71 A	2,98%
P_e	75,00 kW	71,74 kW	4,54%
L_s	5,33 mH	4,92 mH	8,36%

FONTE: O autor (2021).

FIGURA 34 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP2 OPERANDO EM PLENA CARGA.



FONTE: O autor (2021).

A Figura 34 apresenta a densidade de fluxo magnético do GSIP2. De modo geral, claramente, a otimização reduziu os valores das densidades de fluxo nos dentes e coroa do estator, de modo que, as perdas por histerese e Foucault reduzissem, conseqüentemente, aumentando a eficiência do GSIP2. Verifica-se que a maior parte da coroa do estator opera em uma faixa de 0,4 – 0,8T, uma redução significativa de fluxo, quando comparada ao caso anterior, onde os níveis de saturação chegam até 1,1T, para a mesma região do gerador. Nos dentes do estator do GSIP2, também há uma redução de densidade de fluxo, tendo como base o GSIP1, nota-se que a área de pontos com maior saturação (1,5 – 1,7T) reduziram, além disso, dos quatro dentes por onde circulam os caminhos mais significativos de fluxo, três operam com densidade na faixa de 1,1 – 1,3T, diferentemente do GSIP1, onde dois dentes possuem induções magnéticas na faixa de 1,3 – 1,5T. Os níveis de densidade de fluxo em que opera o GSIP2 estão todos em conformidade com os limites máximos de densidade de fluxo magnético sugeridos pela bibliografia.

6.5.3 Comparação do projeto ótimo considerando a fronteira de Pareto.

O GSIP3 também teve seus desvios entre a otimização e o método dos elementos finitos calculados, esses são apresentados na Tabela 18. Nota-se um aumento em todos os valores de desvio de modo geral, comparando-se com os dois GSIP's anteriores, os maiores desvios de tensão, corrente e potência são apresentados por este gerador, entretanto, os aumentos nos desvios são pequenos, de modo que, os desvios na tensão e corrente superam,

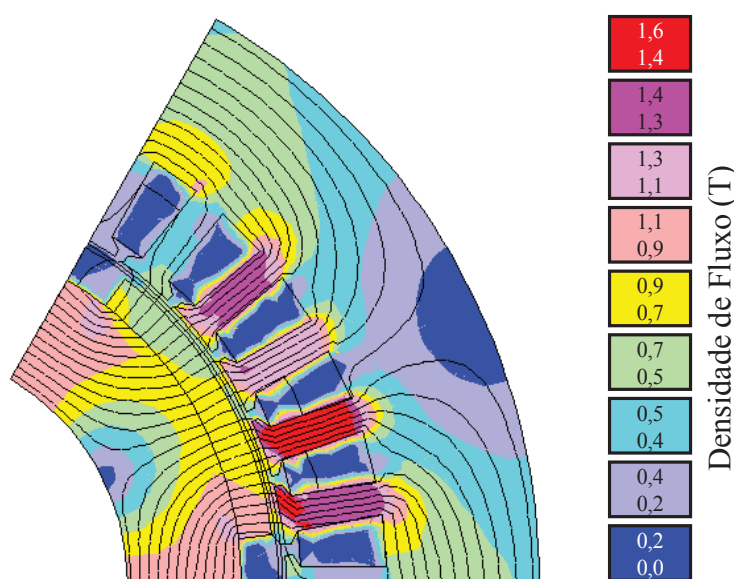
ligeiramente, os valores de 2% e 3%, respectivamente. Por conseguinte, o desvio da potência também aumentou, porém, não ultrapassou os 5%. A indutância síncrona continua sendo a variável que possui o maior desvio, dessa vez, 11%. Mesmo apresentando os maiores desvios entre os três GSIP's, o modelo analítico proposto continua em uma faixa de desvios aceitável, tensão próxima a 2% e potência não ultrapassando os 5%.

TABELA 18 – DESVIO ENTRE O GSIP3 E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Variável	GSIP3	MEF	Desvios
V_t	690,32 V	675,8 V	2,14%
I_a	69,70 A	67,61 A	3,09%
P_e	75,00 kW	71,66 kW	4,66%
L_s	6,65 mH	5,99 mH	11,01%

FONTE: O autor (2021).

FIGURA 35 – DENSIDADE DE FLUXO DO GSIP3 OPERANDO EM PLENA CARGA.



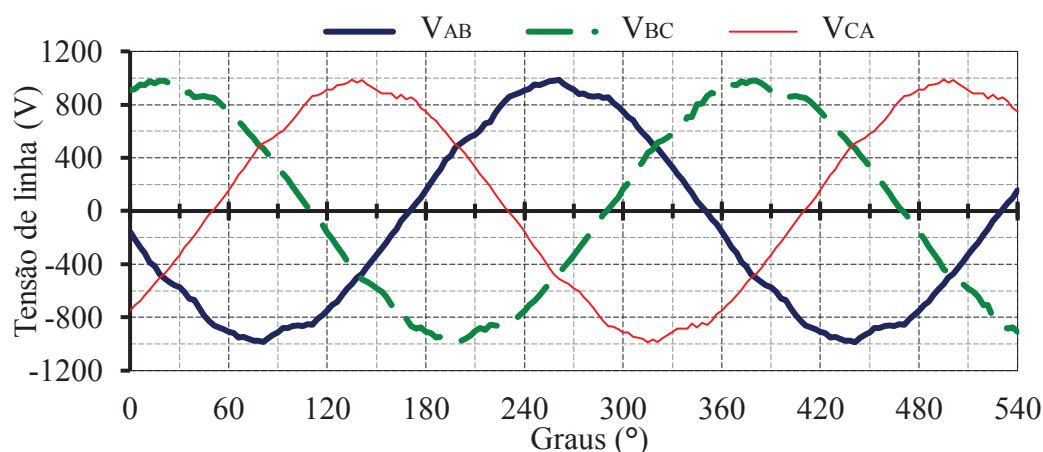
FONTE: O autor (2021).

As densidades de fluxo do GSIP3 obtido a partir da fronteira de Pareto são vistas na Figura 35. Examina-se o mapa de densidades de fluxo do GSIP3, comparando-o com os resultados obtidos para o GSIP1 e o GSIP2. Em relação ao GSIP2, nota-se que esse gerador possui maior densidade de fluxo, ressaltando-se a coroa do rotor, que opera em sua maior parte na faixa de 0,7 – 1,1T, e os dentes do estator, considerando os quatro dentes por onde passa a maior do fluxo da máquina, com a densidade entre 1,1 – 1,6T. Já para a coroa do estator, nota-se que a densidade de fluxo aproximasse dos valores obtidos anteriormente, entre 0,4 – 0,9T,

em relação ao GSIP2. Em relação ao GSIP1, percebe-se que a solução da fronteira de Pareto possui uma semelhança, principalmente, na saturação da coroa do rotor, já que, as perdas nesta região não são consideradas, o algoritmo optou por aumentar a saturação nesta parte da máquina e nos dentes do estator, que possuem menos massa de ferro, quando comparados à coroa do estator. O mapa das densidades de fluxo também ilustra o compromisso assumido pela solução da fronteira de Pareto entre a redução de custos e aumento da eficiência, visto que, o mapa de densidade de fluxo do GSIP3 possui densidades de fluxo entre os pontos operativos do GSIP1 e do GSIP2.

De modo que o GSIP3 é o gerador projetado que apresenta o melhor compromisso entre a maximização da eficiência e a redução de custos, os sinais de potência elétrica e tensão terminal do GSIP são analisados, buscando avaliar o conteúdo harmônico presente nesses sinais da máquina. As Figura 36 e Figura 37 apresentam os sinais de saída do GSIP3, considerando o gerador operando sob carga nominal.

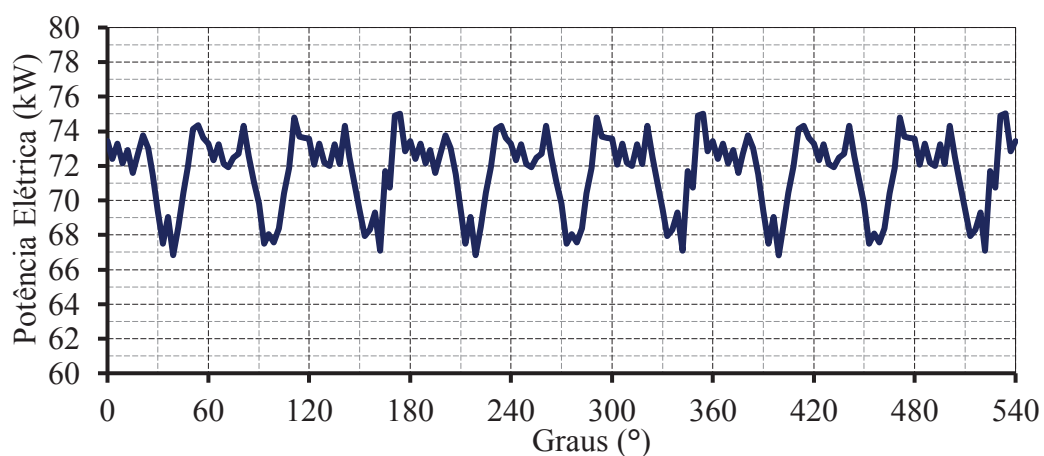
FIGURA 36 – TENSÕES TERMINAIS DO GSIP3.



FONTE: O autor (2021).

Pela análise das Figura 36 e Figura 37 que apresentam os sinais de tensão terminal do gerador e potência elétrica fornecida, respectivamente, onde notam-se as distorções harmônicas em ambos sinais da máquina. Por meio da simulação numérica obtem-se os valores da distorção harmônica considerando cada uma das frequências, no sinal de saída da tensão terminal, as maiores harmônicas são as de 5^a, 7^a e 11^a ordem, todas superiores a 1% e inferiores a 2%, sendo a maior a de ordem 7, com 1,75% em relação à fundamental. Todo o conteúdo harmônico presente na tensão do GSIP, afeta o sinal de saída potência, visto que, na potência, somam-se os conteúdos harmônicos de tensão e corrente do GSIP, resultando em um *ripple* de 9,77%, que pode ser visto na Figura 37.

FIGURA 37 – POTÊNCIA ELÉTRICA FORNECIDA PELO GSIP3.



FONTE: O autor (2021).

Como o objeto de estudo central do trabalho é projeto do gerador síncrono de ímãs permanentes, não houve preocupação em reduzir o conteúdo harmônico do GSIP, entretanto, caso a redução do conteúdo harmônico seja necessária, alterações nos critérios iniciais do projeto, vistos na Tabela 1, podem ser alterados de modo a reduzir o conteúdo harmônico visto nos sinais de saída do GSIP.

7 CONCLUSÕES

A revisão de bibliografia sobre o princípio de funcionamento dos geradores síncronos, as curvas de histerese e de magnetização dos ímãs, os métodos de otimização, as simulações computacionais com o método dos elementos finitos e os trabalhos que apresentam algumas metodologias de projeto de GSIP's, propiciam a elaboração de uma metodologia analítica para o projeto ótimo de GSIP's, podendo ser utilizada para minimização de custos, maximização da eficiência ou contemplar um bom compromisso entre estes dois objetivos, através da análise da fronteira de Pareto. A elaboração dos problemas de otimização flexibiliza a escolha das variáveis que participam do problema de otimização, ademais, a determinação dos limites mínimos e máximos das variáveis auxilia no controle das densidades de fluxo do GSIP, sem a utilização de uma rede de relutâncias na modelagem do projeto ótimo.

As dimensões ótimas encontradas para os três GSIP's avaliados corroboram os objetivos de cada uma das otimizações. Nota-se para a primeira otimização, que o algoritmo reduziu ao máximo as dimensões da máquina, principalmente a massa de ímãs, buscando uma redução significativa do custo do GSIP. No segundo caso, observa-se que o algoritmo de otimização alterou os coeficientes da partícula, de modo que, as densidades de fluxo na coroa e nos dentes do estator diminuíssem, com isso, reduzindo as perdas da máquina e aumentando a eficiência. Por fim, as dimensões definidas para o GSIP da fronteira de Pareto, claramente, possuem um compromisso entre ambos objetivos estabelecidos, já que, a maioria das dimensões assumiu uma faixa intermediária, entre os valores estabelecidos para os dois GSIP's analisados anteriormente.

A inclusão do coeficiente de permeância como uma variável dos problemas de otimização mostra-se como uma vantagem da modelagem proposta em relação a outros trabalhos, visto que, ao longo dos projetos ótimos desenvolvidos, percebe-se a dificuldade da escolha desse parâmetro antes do dimensionamento completo do GSIP, haja vista, os valores intermediários assumidos por esse coeficiente para os três projetos ótimos estudados. Além disso, os resultados obtidos com os projetos ótimos mostram que os objetivos analisados são contraditórios, ressaltando-se a importância de uma análise que considere os dois objetivos, como a fronteira de Pareto.

As simulações computacionais com o método dos elementos finitos permitiram comparar os resultados numéricos com os analíticos para os três projetos ótimos estudados e ainda corroboram as escolhas feitas para os limites mínimos e máximos das variáveis dos problemas de otimização, já que, os limites operativos de densidade de fluxo são respeitados

para os três geradores projetos. Além disso, as simulações computacionais auxiliam ao longo do desenvolvimento da metodologia de cálculo, de modo que, algumas equações e fatores são ajustados verificando os resultados obtidos com as simulações numéricas.

Portanto, uma modelagem para o projeto ótimo para um gerador síncrono de ímãs permanentes, considerando o coeficiente de permeância como uma variável do problema de otimização, é proposta e a comparação de resultados numéricos e analíticos apresentou boa concordância. A modelagem proposta permite a elaboração de inúmeros problemas de otimização, podendo diversificar os objetivos e restrições aplicadas ao projeto ótimo da máquina.

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas melhorias na modelagem proposta e alterações na topologia de gerador síncrono de ímãs permanentes são propostas como sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de uma rede de relutâncias com o campo do rotor e do estator, incluindo o ferro e a saturação no modelo. Com isso, calcula-se as densidades de fluxo em diversos pontos da máquina, permitindo que as densidades sejam controladas por restrições e possibilitando a flexibilização dos limites das variáveis do problema de otimização;
- Utilização de um modelo térmico do GSIP, para que a temperatura atualize-se ao longo do processo de otimização e possa ser incorporada ao modelo. Desse modo, atualizando o valor da resistividade dos condutores em função da temperatura e atualizando o valor da densidade de fluxo remanente do ímã permanente;
- Otimização considerando outras topologias de GSIP, com ímãs enterrados no rotor ou máquinas de rotor externo.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. 1ª. ed. Florianópolis: Marcel Dekker, Inc, v. Único, 2003.
- BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N. **EFCAD - Electromagnetic Fields Computer Aided Design**. 1ª. ed. Florianópolis: UFSC, v. Único, 2008.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2ª. ed. Watertown: Prentice Hall, Pearson Education Inc, v. Único, 2016.
- BAZZO, T. D. P. M. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes para Aerogeradores considerando a Curva de Ocorrência do Vento**. 1ª. ed. Florianópolis: Tese de Doutorado, UFSC, v. Único, 2017.
- BAZZO, T. D. P. M.; MOURA, V. D. O.; CARLSON, R. A Step-by-Step Procedure to Perform Preliminary Designs of Salient-Pole Synchronous Generators. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 1-23, 2021.
- BAZZO, T. et al. Multidisciplinary design optimization of direct-drive PMSG considering the site wind profile. **Electric Power Systems Research**, v. 141, n. 1, p. 467-475, Setembro 2016. ISSN 0378-7796.
- BAZZO, T. et al. Multiphysics Design Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Generator. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 64, n. 12, p. 9815-9823, Dezembro 2017. ISSN 0278-0046.
- BERTSEKAS, D. **Nonlinear Programming**. II. ed. Belmont: Athena Scientific, v. Único, 1999.
- BOLDEA, I. **Synchronous Generator**. II. ed. Timisoara: CRC Press, v. único, 2016.
- CAETANO, R. D. C. **Análise de Uma Máquina Síncrona de Ímã Permanente com Tensão Não Senoidal**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ, v. Único, 2013.
- CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering**. 7ª. ed. New York: John Wiley & Sons, v. I, 2007.
- CHAPMAN, S. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. I. ed. Porto Alegre: McGraw-bookman, v. único, 2013.
- COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. 1ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, v. Único, 2009.
- EBAY. Wind Turbines and Kits. **Ebay**, 2020. Disponível em: <<https://www.ebay.co.uk/itm/332495413215>>. Acesso em: 28 Junho 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2020-2024**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Nota Técnica EPE DEA 0012/2020, v. Único, 2020. 1-33 p. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT%2020%20C2%AA%20Revis%C3%A3o%20Quadrimestral%202020_final.pdf>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021 - Relatório Síntese**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, v. Único, 2021. 1-77 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf>.

FRATILA, R. **Modélisation numérique de la perte d'aimantation d'aimants permanents sous les contraintes magnétique et thermique rencontrées dans les dispositifs électriques**. 1ª. ed. Lille: Tese de doutorado da Ecole Centrale de Lille, v. Único, 2014.

GAO, J. et al. Multi-Interval Efficiency Design Optimization for Permanent Magnet Synchronous Generators Used in Hybrid Electric Special Vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, n. 6, p. 4646-4656, Junho 2021. ISSN 0278-0046.

GILL, P.; MURRAY, W. **Practical Optimization**. 11ª. ed. Palo Alto: Academic Press, v. Único, 1997.

GOLDBERG, D. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. 1ª. ed. Tuscaloosa: Wesley Publishing Company, v. Único, 1989.

GRAUERS, A. **Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines**. 1ª. ed. Göteborg: Tese de Doutorado, v. Único, 1996.

GÜNDOĞDU, T. **The Design and Comparison of Salient Pole and Permanent Magnet Synchronous Machine**. VII International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Bursa: IEEE. 2011. p. 371-375.

HANSELMAN, D. **Brushless Permanent Magnet Motor Desing**. 2ª. ed. Ohio: Magna Physics Publishing, v. Único, 2003.

HENDERSHOT, J.; MILLER, T. J. **Desing of Brushless Permanent-Magnet Machines**. 2ª. ed. Venice: Motor Desing Book, v. Único, 2010.

HUA, Y.; ZHU, H.; XU, Y. Multi-Objective Optimization Design of Bearingless Permanent Magnet Synchronous Generator. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY**, v. 30, n. 4, p. 1-5, Junho 2020. ISSN 1558-2515.

HUGHES, A. **Electric Motors and Drivers**. 3ª. ed. Burlington: Elsevier Ltda, v. Único, 2006.

IDA, N.; BASTOS, J. P. A. **Electromagnetics and Calculation of Fields**. 2ª. ed. New York: Springer, v. Único, 1997.

K&J MAGNETICS. Demagnetization (BH) Curves for Neodymium Magnets. **K&J Magnetics**, 2021. Disponível em: <<https://www.kjmagnetics.com/bhcurves.asp>>. Acesso em: 2021.

KAKANI, S.; KAKANI, A. **Material Science**. 1ª. ed. New Delhi: NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS, v. Único, 2004.

KARNAVAS, Y. L.; KORKAS, C. D. **Optimization methods evaluation for the design of radial flux surface PMSM**. International Conference on Electrical Machines (ICEM). Berlin: IEEE. 2014. p. 1-8.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization**. IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. p. 1942-1948.

KENNEDY, J.; SHI, R. E. E. Y. **Swarm Intelligence**. 1ª. ed. San Francisco: Academic Press, v. Único, 2001.

KOLZER, J. et al. **Using Reluctance Networks in the Optimal Design of Spoke Ferrite Magnets Synchronous Generators**. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Porto Alegre: Anais do XII MOMAG. 2016. p. 1-6.

KÖLZER, J. F. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos com Ímãs Permanentes de Ferrite para Microgeração Eólica**. Única. ed. Florianópolis: UFSC, v. I, 2017.

LI, H.; CHEN, Z.; POLINDER, H. Optimization of Multibrid Permanent-Magnet Wind Generator Systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, n. 1, p. 82-92, Março 2009. ISSN 0885-8969.

LOBATO, F. S. **Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia**. 1ª. ed. Uberlândia: Tese de Doutorado UFU, v. Único, 2008.

LUENBERGER, D.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 4ª. ed. Palo Alto: Springer International Publishing, v. Único, 2016.

LUZ, M. V. F. D. **Desenvolvimento de um Software para Cálculo de Campos Magnéticos 3D utilizando Elementos de Aresta, levando em conta o Movimento e o Circuito de Alimentação**. 1ª. ed. Florianópolis: Tese de Doutorado, UFSC, v. Único, 2003.

MALAGONI, J. A. **Os Elementos Finitos no Estudo de Eletromagnetismo utilizando o software GMSH/GETDP**. 1ª. ed. Uberlândia: Dissertação de Mestrado, UFU, v. Único, 2012.

MALAGOLI, J. A. **Otimização Multiobjetivo Aplicada aos Motores de Indução Validade via Elementos Finitos**. 1ª. ed. Uberlândia: Tese de Doutorado, UFU, v. Único, 2016.

MI, C. et al. Analytical Method for Predicting the Air-Gap Flux of Interior-Type Permanent-Magnet Machines. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 40, n. 1, p. 50-58, Janeiro 2004. ISSN 0018-9464.

NOVACON. Tabela de fios AWG. **Tabela de fios AWG**, 2021. Disponível em: <<http://www.novacon.com.br/audiotabawg.htm>>. Acesso em: junho 2021.

PARPINELLI, R.; LOPES, H.; FREITAS, A. Data Mining With an Ant Colony Optimization Algorithm. **IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTING**, v. 6, n. 4, p. 321-332, Agosto 2002. ISSN 1089778X.

PEREIRA, G. D. S.; FERNANDES, T. S. P.; AOKI, A. Allocation of Capacitors and Voltage Regulators in Three-Phase Distribution Networks. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 29, p. 238-249, Janeiro 2018. ISSN 2195-3880.

PINTO, R.; UNSIHUAY-VILA, C.; FERNANDES, T. Multi-objective and multi-period distribution expansion planning considering reliability, distributed generation and self-healing. **IET Generation, Transmission e Distribution**, v. 13, n. 2, p. 219-228, Outubro 2018. ISSN 1751-8687.

PYRHÖNEN, J. **Desing of Rotating Eletrical Machines**. 1^a. ed. Lappeenranta: John Wiley e Sons, Ltd, v. Único, 2008.

RESMINI, F. **Projeto e Otimização de Geradores Síncronos a Ímãs Permanentes e Introdução a Otimização de Gamas**. 1^a. ed. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, UFSC, v. único, 2013.

SARIKHANI, A.; MOHAMMED, O. **A multi-physics multi-objective optimal design approach of PM synchronous machines**. International Conference on Electrical Machines (ICEM). Berlin: IEEE. 2014. p. 1-7.

SILVA, I. N. D. **Criação de Interface Gráfica para Software de Análise por Flementos Finitos voltada ao Projeto de Geradores Síncronos**. 1^a. ed. Curitiba: Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR, v. Único, 2020.

UMANS, S. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7^a. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, v. Único, 2014.

VALLE, Y. D. et al. Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION**, Berlin, v. 302, n. 2, p. 295-324, 2010. ISSN 978-3-642-14012-9.

WILLIAMS, P. **Model Building in Mathematical Programming**. 5^a. ed. Winchester: John Wiley & Sons Ltd, v. Único, 2013.

WIRMOND, V.; FERNANDES, T.; TORTELLI, O. L. TCPST allocation using optimal power flow and Genetic Algorithms. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 33, n. 4, p. 880-886, Maio 2011. ISSN 0142-0615.

ZHANG, W. et al. Optimal design of hydro permanent magnet synchronous generators for improving annual cycle efficiency. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 131, p. 1-8, Abril 2021. ISSN 0142-0615.

ZHANG, Y.; JI, S. W. E. G. A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications. **Mathematical Problems in Engineering**, p. 1-38, Fevereiro 2015. ISSN 1563-5147.

ZHU, L. et al. Analytical Modeling of Open-Circuit Air-Gap Field Distributions in Multisegment and Multilayer Interior Permanent-Magnet Machines. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, v. 45, n. 8, p. 3121-3130, Agosto 2009. ISSN 0018-9464.