



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DUANI TEDESCO

**PROJETO ÓTIMO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES**

FLORIANÓPOLIS

2019

Duani Tedesco

**PROJETO ÓTIMO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng

Coorientador: Prof. Dr. Jean Viane Leite

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tedesco, Duani

Projeto ótimo de um gerador síncrono de polos salientes /  
Duani Tedesco ; orientador, Patrick Kuo-Peng,  
coorientador, Jean Viane Leite, 2019.  
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Algoritmo de otimização. 3.  
Gerador síncrono. 4. Cálculo analítico . 5. Elementos  
finitos . I. Kuo-Peng, Patrick. II. Leite, Jean Viane.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Duani Tedesco

**Projeto Ótimo De Um Gerador Síncrono De Polos Salientes**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica

---

Prof. Dr.(a) Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho  
Coordenador(a) do Programa

---

Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng  
Orientador

---

Prof. Dr. Jean Viane Leite  
Coorientador

Florianópolis, 25 de outubro de 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus pais Irineu e Bernadete, minha esposa Patrícia e minha irmã Érica, que sempre me apoiaram durante esta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Irineu e Bernadete e minha irmã Érica, por sempre me apoiarem nas decisões que tomei durante toda minha vida, pela assistência, suporte, amor e carinho.

A minha esposa Patrícia, que sempre me apoiou, sem ela esta conquista não seria possível foi ela quem sempre me deu força nesta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Patrick Kuo-Peng, pela orientação, assistência e por sempre compartilhar seu conhecimento e experiência.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Jean Viane Leite, por todo o conhecimento repassado e por sempre me auxiliar quando necessitei.

Aos colegas do GRUCAD, pelo auxílio e convívio durante a pós-graduação.

Aos demais professores do GRUCAD, pelo acolhimento no grupo e por todo o conhecimento repassado.

A empresa Automatic Ind. e Com. De Equipamentos LTDA, que possibilitou e viabilizou meus estudos durante o período em que estive em Florianópolis.

Finalmente, agradeço a todos os colegas, amigos, familiares que de alguma forma contribuíram nesta trajetória.

## RESUMO

Geradores síncronos de polos salientes (GSPS) são equipamentos não seriados que possuem alto valor agregado. Neste trabalho buscou-se desenvolver um algoritmo para dimensionar um gerador, determinar seu desempenho e por fim otimizá-lo. Um modelo analítico para a máquina foi desenvolvido, sendo o mesmo validado através de comparação com simulação numérica através do método de elementos finitos (MEF). A otimização é baseada em algoritmos genéticos multiobjetivo, sendo os objetivos maximizar o rendimento e minimizar o custo da máquina. Também foram impostas restrições para determinar a faixa de desempenho do gerador. Para calcular o custo da máquina foi criada a variável fator custo que leva em consideração a influência do material ferromagnético e do cobre no cálculo da máquina. Ao fim da execução do algoritmo é apresentada um gráfico que relaciona todas as soluções encontradas e são destacadas as soluções não dominadas. A partir das soluções não dominadas é feita a simulação e escolhida a melhor solução para o problema apresentado. Por fim, é feita a comparação da geometria inicial com as geometrias otimizadas não dominadas.

**Palavras-chave:** Algoritmo de otimização. Gerador síncrono. Cálculo analítico. Elementos finitos.

## ABSTRACT

Salient pole synchronous generators (GSPS – in portuguese) are non-serial equipment and have high added value. This work aims to develop an algorithm to size a generator, determine its performance and finally optimize it. An analytical model for the machine was developed and validated by comparing it with numerical simulation based on the finite element method (FEM). The optimization is based on multiobjective genetic algorithms, being the objectives maximization of the yield and minimization of the machine cost. Restrictions were also imposed to determine the generator performance range. To calculate the cost of the machine, a cost factor variable which takes into account the influence of ferromagnetic material and copper in the calculation of the machine was defined. At the end of the algorithm execution, a graph is presented that lists all the solutions found and the non-dominated solutions are highlighted. From the non-dominated solutions the simulation is made and the best solution for the presented problem is chosen. Finally, the initial geometry is compared with the non-dominated optimized geometry.

**Keywords:** Optimization algorithm. Synchronous generator Analytical calculation. Finite Elements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Chapa de aço do estator .....	20
Figura 2-2 Isolação em condutores retangulares. ....	21
Figura 2-3 Bobina do enrolamento estatórico .....	22
Figura 2-4 Vista superior da bobina .....	23
Figura 2-5 Passo de bobinagem.....	23
Figura 2-6 Conjunto do polo saliente .....	25
Figura 2-7 Conjunto do rotor.....	25
Figura 2-8 Polo saliente.....	29
Figura 2-9 Configuração do enrolamento.....	33
Figura 3-1 Caminho magnético .....	37
Figura 3-2 Linhas de fluxo. ....	38
Figura 3-3 Efeito pelicular.....	41
Figura 3-4 Campo magnético devido à histerese.....	46
Figura 3-5 Curva de histerese obtida com o modelo de Jiles-Atherton.....	46
Figura 3-6 Campo magnético criado pela circulação de corrente induzida no ferro magnético. .....	47
Figura 3-7 Campo magnético criado pelo descolamento das paredes dos domínios magnéticos .....	48
Figura 3-8 Curva BH contendo os efeitos das correntes induzidas, histerese e perdas excedentes. .....	49
Figura 4-1 Fronteira ótima de Pareto.....	55
Figura 4-2 Fluxograma das etapas do algoritmo desenvolvido.....	57
Figura 5-1 Malha de elementos finitos aplicada ao problema.....	63
Figura 5-2 Distribuição da indução no gerador. ....	63
Figura 5-3 Detalhe das induções, vetores, linhas equipotenciais e fluxo magnético no polo. .	64
Figura 5-4 Soluções dominadas e não dominadas.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Isolação em condutores retangulares.....	22
Tabela 2-2 Dados necessários para o início do dimensionamento.....	26
Tabela 2-3 Valores pretendidos da indução magnética no GSPS .....	27
Tabela 2-4 Valores típicos de tensão tangencial para máquinas síncronas de polos salientes refrigerados a ar.....	28
Tabela 3-1 Dados de entradas gerais .....	35
Tabela 3-2 Induções de pico.....	38
Tabela 3-3 Campo magnético de pico .....	39
Tabela 3-4 FMM à vazio.....	40
Tabela 3-5 Reatâncias.....	43
Tabela 4-1 Variáveis da otimização .....	58
Tabela 4-2 Restrições .....	59
Tabela 5-1 Comparação do cálculo analítico com o numérico.....	61
Tabela 5-2 Geometria inicial <i>versus</i> geometria da solução 1.....	66
Tabela 5-3 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial <i>versus</i> a geometria encontrada na solução 1.....	67
Tabela 5-4 Geometria inicial <i>versus</i> geometria da solução 2.....	69
Tabela 5-5 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial <i>versus</i> a geometria encontrada na solução 2.....	70
Tabela 5-6 Geometria inicial <i>versus</i> geometria da solução 3.....	72
Tabela 5-7 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial <i>versus</i> a geometria encontrada na solução 3.....	73
Tabela 5-8 Comparação das soluções não dominadas.....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAOCH	Associação brasileira de pequenas centrais hidrelétricas e centrais geradoras hidrelétricas	[-]
CGH	Centrais geradoras hidrelétricas	[-]
$\vec{B}$	Indução magnética	[T]
$b_{01}$	Largura da ranhura	[mm]
$B_{c1}$	Indução na coroa do estator	[T]
$B_{c2}$	Indução na coroa do rotor	[T]
$B_{gi}$	Indução no entreferro	[T]
$b_{n1}$	Número de condutores em paralelo na largura da espira do estator	[-]
$b_{n2}$	Número de condutores em paralelo na largura da espira do polo	[-]
$b_{n11}$	Largura do condutor do estator	[mm]
$b_{n12}$	Largura do condutor do rotor	[mm]
$b_{sch}$	Largura da sapata polar	[mm]
$b_{pko}$	Largura do corpo do polo	[mm]
$D$	Diâmetro externo do rotor	[mm]
$D_1$	Diâmetro interno do estator	[mm]
$D_{e1}$	Diâmetro externo do estator	[mm]
$D_{i2}$	Diâmetro interno do rotor	[mm]
$d_{s1}$	Passo médio do enrolamento	[-]
$E_{qaux}$	Equação auxiliar	[-]
$f$	Frequência de operação	[Hz]
$FC$	Fator de custo	[-]
$F_{c1}$	Força magnetomotriz na coroa do estator	[Ae]
$F_{c2}$	Força magnetomotriz na coroa do rotor	[Ae]
$F_{d1}$	Força magnetomotriz no dente do estator	[Ae]
$F_{g1}$	Força magnetomotriz no entreferro	[Ae]
$F_{g1c}$	Força magnetomotriz no entreferro corrigida	[Ae]
$FMM_{Vaz}$	Força magnetomotriz em vazio	[Ae]
$FMM_{React}$	Força magnetomotriz de reação de armadura	[Ae]
$FMM_{ReactD}$	Força magnetomotriz de reação de armadura de eixo direto	[Ae]
$FMM_{ReactQ}$	Força magnetomotriz de reação de armadura de eixo em quadratura	[Ae]
$f_p$	Fator de potência	[-]
$f_w$	Fator de bobinagem	[-]
$g_i$	Comprimento do entreferro	[mm]
$g_{máx}$	Comprimento máximo do entreferro	[mm]
$\vec{H}$	Campo magnético	[A/m]
$H_{c1}$	Campo magnético na coroa do estator	[A/m]
$H_{c2}$	Campo magnético na coroa do rotor	[A/m]
$H_{d1}$	Campo magnético no dente do estator	[A/m]
$H_{gi}$	Campo magnético no entreferro	[A/m]
$H_{sch}$	Campo magnético no copo do polo	[A/m]

$h_{n1}$	Altura da ranhura	[mm]
$h_{pk}$	Altura do corpo do polo	[mm]
$h_{sch}$	Altura da sapata polar	[mm]
$h_{n11}$	Altura do condutor do estator	[mm]
$h_{n12}$	Altura do condutor do rotor	[mm]
$h_{ys}$	Altura da coroa do estator	[mm]
$I_1$	Corrente nominal	[A]
$j_{h1}$	Número de condutores em paralelo na largura da espira do estator	[-]
$j_{h2}$	Número de condutores em paralelo na largura da espira do polo	[-]
$K_c$	Coefficiente de Carter	[-]
$K_{D1}$	Fator para o cálculo da reatância de eixo direto	[-]
$K_{Q1}$	Fator para o cálculo da reatância de eixo em quadratura	[-]
$K_h$	Fator de cálculo da sapata polar	[-]
$L_1$	Comprimento do pacote	[mm]
$L_2$	Comprimento do pacote efetivo	[mm]
$L_{w1}$	Comprimento médio do condutor	[mm]
$N_1$	Número de ranhuras no estator	[-]
$N_{cp}$	Número de caminhos paralelos no estator	[-]
$N_{cp2}$	Número de caminhos paralelos no rotor	[-]
$N_{cv}$	Número de canais de ventilação	[-]
$m$	Número de fases	[-]
$M_{cobre\ r}$	Massa do cobre do rotor	[kg]
$M_{cobre\ s}$	Massa do cobre do estator	[kg]
$M_{fmr}$	Massa do ferro magnético no rotor	[kg]
$M_{fms}$	Massa do ferro magnético no estator	[kg]
$p$	Número de pares de polos	[-]
PCH	Pequenas centrais hidrelétricas	[-]
$P_{el}$	Perdas elétricas	[W]
$P_{ex}$	Perdas excedentes	[W/kg]
$P_f$	Perdas no ferro	[W/kg]
$R$	Resistência do condutor	[ $\Omega$ ]
$R_{d1}$	Relutância do dente do estator	[A/Wb]
$R_{gi}$	Relutância do entreferro	[A/Wb]
$R_{bsch}$	Relutância da sapata do polo	[A/Wb]
$R_{bpko}$	Relutância do corpo do polo	[A/Wb]
$R_{c1}$	Relutância da coroa do estator	[A/Wb]
$R_{c2}$	Relutância da coroa do rotor	[A/Wb]
$rpm$	Velocidade nominal	[rpm]
$S$	Potência nominal	[VA]
$s_{c1}$	Seção transversal do condutor	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	Torque eletromagnético	[N.m]
$V_1$	Tensão nominal	[V]
$V_{tg}$	Tensão tangencial	[Pa]
$V_r$	Volume do rotor	[m <sup>3</sup> ]
$W_a$	Número de espiras por caminho e por fase calculada	[-]
$W_1$	Número de espiras por caminho e por fase executada	[-]

$W_d$	Comprimento do canal de ventilação	[mm]
$X_1$	Reatância de dispersão	[ $\Omega$ ]
$X_c$	Reatância de dispersão na cabeça da bobina	[ $\Omega$ ]
$x_d$	Reatância síncrona	[pu]
$X_D$	Reatância síncrona	[ $\Omega$ ]
$X_M$	Reatância magnetizante	[ $\Omega$ ]
$X_{ran}$	Reatância de dispersão na ranhura	[ $\Omega$ ]
$Z_1$	Número de espiras por bobina	[-]
$Z_b$	Impedância de base	[ $\Omega$ ]
$Z_{pol}$	Número de espiras por polo	[-]
$\alpha_i$	Coefficiente de cobertura do polo corrigido	[-]
$\alpha$	Coefficiente de cobertura do polo	[-]
$\beta$	Coefficiente de temperatura do condutor	[-]
$\Delta T$	Variação de temperatura	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\mu$	Permeabilidade do meio	[H/m]
$\mu_0$	Permeabilidade do vácuo	[H/m]
$\rho$	Resistividade do condutor	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\tau$	Passo correspondente à região ocupada por um polo	[mm]
$\tau_p$	Passo polar	[mm]
$\tau_s$	Passo ranhura	[mm]
$\phi$	Fluxo magnético	[Wb]
$\omega_r$	Velocidade angular	[rad/s]
$\theta$	Ângulo de carga	[-]

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	DIMENSIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES (GSPS) .....	19
2.1	GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES.....	19
2.1.1	Características construtivas do estator.....	20
2.1.2	Características construtivas do rotor.....	24
2.2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
2.3	DIMENSIONAMENTO DO GSPS.....	26
2.3.1	Dimensionamento dos polos salientes.....	29
2.3.2	Geometrias do estator.....	30
2.3.3	Dimensionamento dos enrolamentos do estator.....	33
2.3.4	Enrolamentos do rotor.....	34
3	ANÁLISE DE INDICADORES DE DESEMPENHO DO GSPS.....	35
3.1	DADOS DE ENTRADA PARA A ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GSPS. ....	35
3.2	CÁLCULO DO CIRCUITO MAGNÉTICO.....	36
3.2.1	Indução e campo magnético no gerador.....	37
3.2.2	Força magnetomotriz em vazio.....	39
3.2.3	Resistências elétricas e reatâncias.....	40
3.2.3.1	Resistências Elétricas.....	40
3.2.3.2	Reatâncias.....	42
3.2.4	Força magnetomotriz com carga.....	43
3.3	CÁLCULOS DAS PERDAS ELETROMAGNÉTICAS, RENDIMENTO E CUSTO .	

3.3.1	Perdas elétricas .....	44
3.3.2	Perdas no núcleo magnético .....	44
3.3.2.1	Perdas por histerese .....	45
3.3.2.2	Perdas por Correntes de Foucault.....	47
3.3.2.3	Perdas excedentes .....	48
3.3.3	Perdas totais e rendimento.....	49
3.3.4	Custo Financeiro.....	50
4	OTIMIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO .....	52
4.1	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	52
4.1.1	Criação da população inicial .....	53
4.1.2	Seleção.....	53
4.1.3	Crossover.....	53
4.1.4	Mutação .....	53
4.1.5	Elitismo .....	54
4.1.6	Nova geração .....	54
4.1.7	Objetivos e restrições .....	54
4.1.8	Soluções dominadas e não dominadas .....	54
4.2	ALGORITMO IMPLEMENTADO .....	56
5	VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	61
5.1	VALIDAÇÃO DO CÁLCULO ANALÍTICO.....	61
5.1.1	Cálculo de Campos.....	62
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS APRESENTADOS PELO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.....	64
5.2.1	Solução 1 .....	65
5.2.2	Solução 2 .....	69
5.2.3	Solução 3 .....	71
5.2.4	Comparação entre soluções .....	74
6	CONCLUSÃO.....	76

6.1	MELHORIAS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	77
6.1.1	Introdução das barras de amortecimento nos polos.....	77
6.1.2	Cálculo da distorção harmônica total produzida no enrolamento estatórico.....	77
6.1.3	Cálculo do efeito pelicular e suas consequências na resistência do enrolamento estatórico.....	77
6.1.4	Introdução de novos critérios de parada para o algoritmo genético.....	77
	REFERÊNCIAS .....	79
	APÊNDICE 1 – Determinação da seção para cálculo das induções .....	83
	APÊNDICE 2 – Cálculo do volume dos dentes e da coroa do estator .....	86
	APÊNDICE 3 – Cálculo da massa do GSPS.....	87
	APÊNDICE 4 – Código para desenho automático programa FEMM.....	90

## 1 INTRODUÇÃO

Geradores síncronos são amplamente utilizados na conversão eletromecânica de energia. Seu projeto depende de características do sistema de potência no qual a máquina será interligada e da máquina primária responsável pela potência mecânica entregue ao eixo do gerador. Os geradores síncronos projetados para operar em centrais hidrelétricas são produtos não seriados, ou seja, cada máquina depende de um projeto específico para determinar suas condições mecânicas e eletromagnéticas de operação. Diferentes métodos de projeto analítico são encontrados na literatura e têm como objetivo determinar as dimensões da máquina respeitando algumas condições de operação, tais como: níveis de indução magnética, densidade de corrente elétrica, rendimento, reatância síncrona, etc.

A quantidade de polos magnéticos no rotor do gerador síncrono se dá em função da velocidade de rotação da turbina e da frequência da rede. Geradores que possuem o número de polos magnéticos maior que quatro são comumente construídos com polos protuberantes ao raio do rotor (polos salientes), geradores com quatro e dois polos são construídos com polos coincidentes ao raio (polos lisos) [8, 26]. Neste trabalho serão estudados somente geradores síncronos de polos salientes (GSPS), que são utilizados em maior escala em hidrelétricas quando comparados aos geradores de polos lisos.

Com a evolução no projeto de máquinas elétricas e a concorrência entre fabricantes, o mercado exige máquinas de alto rendimento e preço competitivo. Para que se mantenha a competitividade é necessário o emprego de materiais de alta qualidade e projetos otimizados que utilizam de forma eficiente os recursos materiais e financeiros durante a concepção da máquina.

Métodos de otimização podem ser classificados em multiobjetivos e monoobjetivos [9]. Problemas de otimização em projeto de máquinas elétricas são multidisciplinares, multiobjetivos, não lineares e possuem alto nível de complexidade. A otimização destes dispositivos compreende duas etapas: a primeira consiste na análise inicial do projeto e a segunda em otimizar a performance da máquina. A análise pode ser feita por meio de métodos analíticos, modelos de circuito magnético ou por métodos numéricos como, por exemplo, o método de elementos finitos. Parâmetros como fluxo

concatenado, força eletromotriz produzida, indutâncias e perdas são utilizados para validar os indicadores de desempenho e a eficiência da máquina. Para otimizar a máquina, é necessário determinar quais e quantos são os objetivos do projeto e as restrições para a definição do modelo. Possíveis objetivos e restrições em geradores síncronos de polos salientes são: custo financeiro, dimensões, massa e rendimento [5].

Este trabalho se limitou ao estudo de um método de projeto de um gerador síncrono clássico, de polos salientes, para aplicação em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). O modelo analítico foi baseado em modelos encontrados nas literaturas [7], [8], [27] e [28].

Estudos relacionados ao dimensionamento, análise, e otimização de máquinas síncronas trifásicas foram realizados pelo Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e são base para o presente estudo. Dentre estes, podem ser citados os trabalhos realizados por [5], [11], [12], [13], [25] e [34].

Em [5] foram realizados estudos para o projeto de geradores síncronos utilizando ímãs permanentes por meio de conceitos de otimização multiobjetivo. Em [11] foi realizado o estudo para o dimensionamento ótimo de um gerador síncrono com ímãs permanentes utilizando um método monobjetivo. Em [12], foi desenvolvido estudo para redução do coeficiente de curto circuito através do projeto e otimização de geradores síncronos de polos lisos. Em [13] foi apresentado o projeto ótimo de geradores com ímãs permanentes. Em [25] foi proposto um algoritmo que utiliza metodologias analíticas para a determinação dos parâmetros de geradores síncronos em regime permanente e feita a comparação dos resultados com os obtidos em programas de elementos finitos e experimentais. Em [34] foi desenvolvido o estudo de metodologia analítica para o cálculo do adensamento de corrente em condutores aplicados em máquinas trifásicas de alta potência, utilizando o método de elementos finitos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para o projeto e otimização de geradores síncronos de polos salientes, utilizando algoritmo de otimização numérica. Almeja-se desenvolver um algoritmo que, por meio de dados iniciais como potência, tensão e velocidade de rotação, permita a obtenção do projeto ótimo do gerador.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Levantar o estado da arte sobre geradores síncronos de polos salientes e métodos analíticos de dimensionamento e projeto.
- Realizar a modelagem analítica do dispositivo.
- Definir um método de otimização numérica a ser estudado e implementado para obter o projeto ótimo do gerador.
- Analisar as diferenças entre o projeto otimizado e o projeto inicial.
- Validar a metodologia com simulação numérica de elementos finitos, comparando os modelos inicial e otimizado do gerador.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos. Inicialmente, neste capítulo, são apresentadas as considerações iniciais, objetivos e contribuições do estudo.

No capítulo 2, é mostrado o dimensionamento inicial de um GSPS não ótimo, onde por meio de alguns dados de entrada são determinadas as geometrias iniciais.

No capítulo 3 é feito o cálculo analítico do desempenho do gerador, considerando a geometria calculada no capítulo anterior.

No capítulo 4 é apresentada a técnica de otimização que será utilizada no trabalho, restrições e objetivos impostos ao algoritmo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados da otimização e sua comparação com a geometria calculada no capítulo 2. A validação do método é feita simulando o gerador otimizado com o método de elementos finitos.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 DIMENSIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES (GSPS)**

Neste capítulo é feita a apresentação da estrutura clássica de um gerador síncrono de polos salientes e seu dimensionamento inicial para aplicação em uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). O dimensionamento é realizado a partir dos dados da máquina primária (turbina) e do sistema elétrico ao qual o gerador será interligado.

### **2.1 GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES**

Geradores síncronos são máquinas robustas e complexas, possuem a função de transformar energia mecânica em energia elétrica. A energia mecânica é disponibilizada no eixo do gerador por meio de uma turbina que gira a uma velocidade fixa. Essa velocidade, juntamente com o fluxo magnético criado nos polos do gerador, induz tensão nos enrolamentos de armadura. A tensão gerada é alternada e deve sempre estar em sincronia com a rede elétrica em que o gerador está conectado [8].

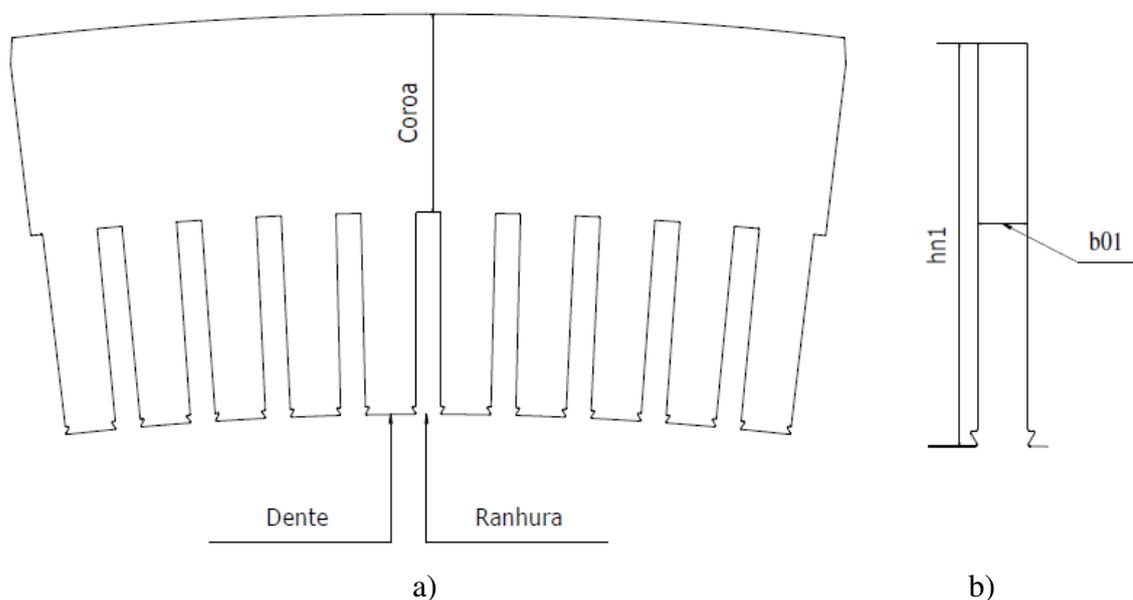
O estator do gerador síncrono é constituído por chapas de ferro magnético laminado, enrolamento de armadura e material isolante. O rotor é composto por chapas de aço laminado, enrolamento de campo, enrolamento de amortecimento, material isolante e eixo. Para que o gerador converta a potência mecânica em potência elétrica é necessário que seja acoplado ao eixo da máquina uma fonte de potência mecânica e o enrolamento de campo deve ser alimentado com corrente contínua. Assim, o campo magnético visto pelas bobinas de armadura varia com o movimento do rotor, induzindo tensão nessas bobinas. A corrente utilizada para excitar o campo do rotor é chamada de corrente de excitação [34].

Para que a corrente de excitação chegue aos enrolamentos de campo é necessário desenvolver um sistema de excitação. O sistema de excitação pode ser estático, ou dinâmico. Sistemas de excitação estáticos são compostos por anéis coletores e escovas de carbono. Sistemas de excitação dinâmicos são compostos por um gerador responsável por gerar a potência de excitação necessária na máquina principal e uma ponte retificadora.

### 2.1.1 Características construtivas do estator

O estator do gerador síncrono é composto por segmentos de chapas de aço silício laminadas, nas chapas estão localizadas as ranhuras que abrigam as bobinas do enrolamento de armadura. Na Figura (2-1a) é mostrado um segmento de chapa de aço silício e o local geométrico dos dentes, das ranhuras e da coroa do estator.

Figura 2-1 Chapa de aço do estator



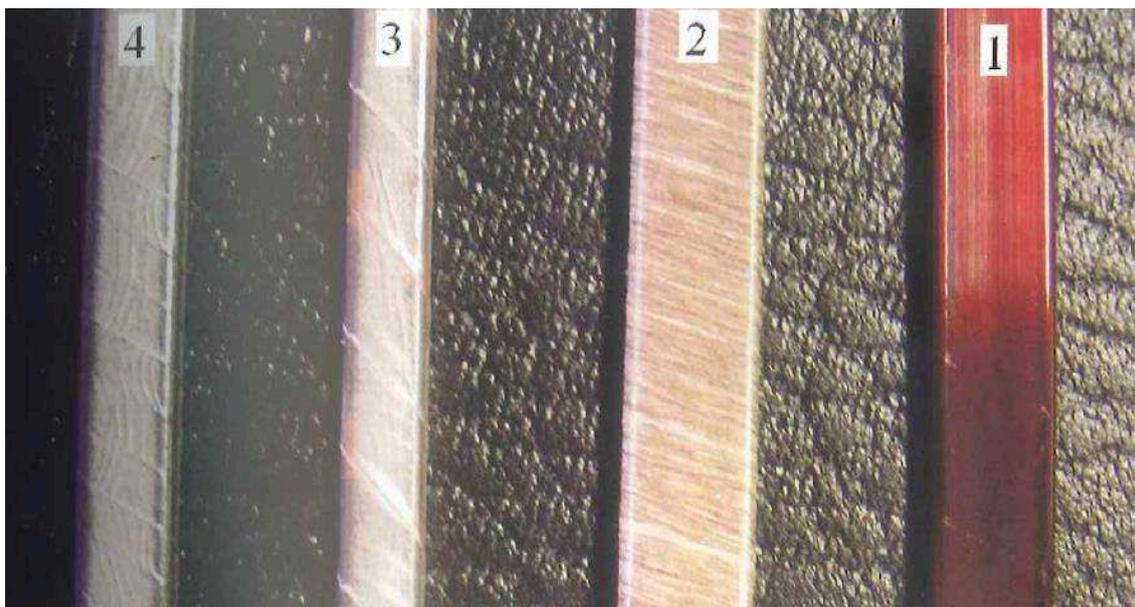
Fonte: O autor.

A segmentação da chapa do estator ocorre para que se tenha melhor aproveitamento do material no momento do corte. Em detalhe na Figura (2-1b) é mostrada a ranhura juntamente com as variáveis que serão utilizadas para o dimensionamento da mesma.

A altura da ranhura ( $h_{n1}$ ) e a largura da ranhura ( $b_{01}$ ) são definidas em função do cobre necessário em cada bobina. O enrolamento estatórico é constituído por grupos de bobinas, cada bobina pode possuir uma ou mais espiras e cada espira pode ser constituída de um ou mais condutores em paralelo [28]. Os condutores de cobre do enrolamento estatórico podem ter seção transversal circular, quando a tensão nominal da máquina for menor que 1kV, ou retangular quando a tensão for superior a 1 kV [34].

A isolação do condutor tem a função de evitar contato elétrico do enrolamento com o núcleo da máquina e que surtos de tensão externos possam curto circuitar as espiras do gerador. Condutores circulares possuem isolação de esmalte e são utilizados em máquinas de baixa tensão, condutores retangulares podem receber incrementos de isolação conforme o projeto. Na Figura (2-2) são mostrados alguns condutores retangulares diferentemente isolados. O condutor (1) é revestido por uma camada de esmalte a base de poliéster. O condutor (2) é revestido por esmalte a base de poliéster e por duas camadas de fibra de vidro. O condutor (3) é isolado somente com fita de mica com base de poliéster. O condutor (4) possui uma camada de esmalte e fita de mica. A rigidez dielétrica de cada condutor isolado é mostrada na Tabela (2-1). A escolha do condutor deve ser feita para evitar a necessidade de adição de isolamento entre espiras [28].

Figura 2-2 Isolação em condutores retangulares.



Fonte: [28].

Tabela 2-1 Isolação em condutores retangulares

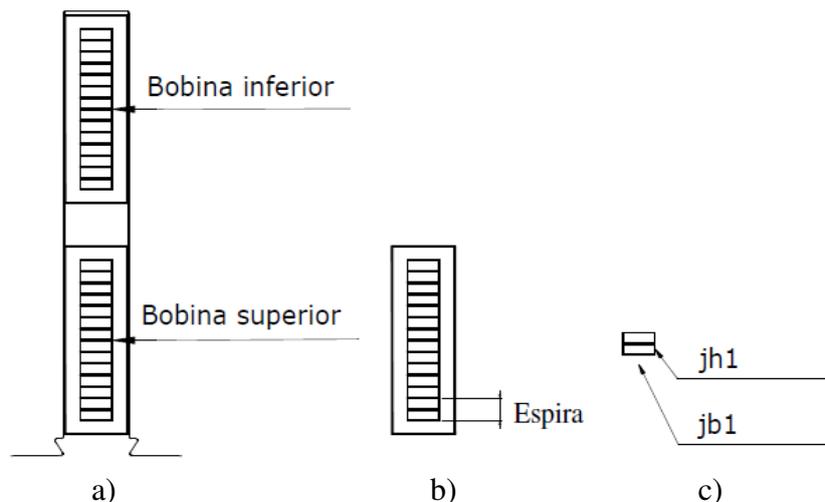
Fio	Isolação	Valor
Número 1	Esmalte à base de poliéster	$E_{esmalte} = 100 \text{ kV/mm}$
Número 2	Esmalte à base de poliéster Fita de mica	$E_{esmalte} = 100 \text{ kV/mm}$ $E_{mica} = 70 \text{ kV/mm}$
Número 3	Fita de mica	$E_{mica} = 70 \text{ kV/mm}$
Número 4	Esmalte à base de poliéster Fita de mica com base de poliéster	$E_{esmalte} = 100 \text{ kV/mm}$ $E_{mica} = 70 \text{ kV/mm}$

Fonte: [28].

Uma espira pode ser feita com um ou mais condutores em paralelo. A utilização de condutores em paralelo facilita a formatação da bobina. Na Figura (2-3a) é mostrada uma ranhura com duas bobinas, característica de enrolamento de camada dupla. Em detalhe na Figura (2-3b) é mostrado o corte transversal de uma bobina que mostra um total de 7 espiras, e cada espira é composta por dois condutores de altura ( $j_{h1}$ ) e base ( $j_{b1}$ ).

O espaço mostrado entre a bobina inferior e a bobina superior e também a quantidade de isolante da bobina até as paredes da ranhura são calculados em função da tensão do gerador e tem a função de prevenir fugas de corrente de uma bobina para a outra e da bobina para a massa-terra [29].

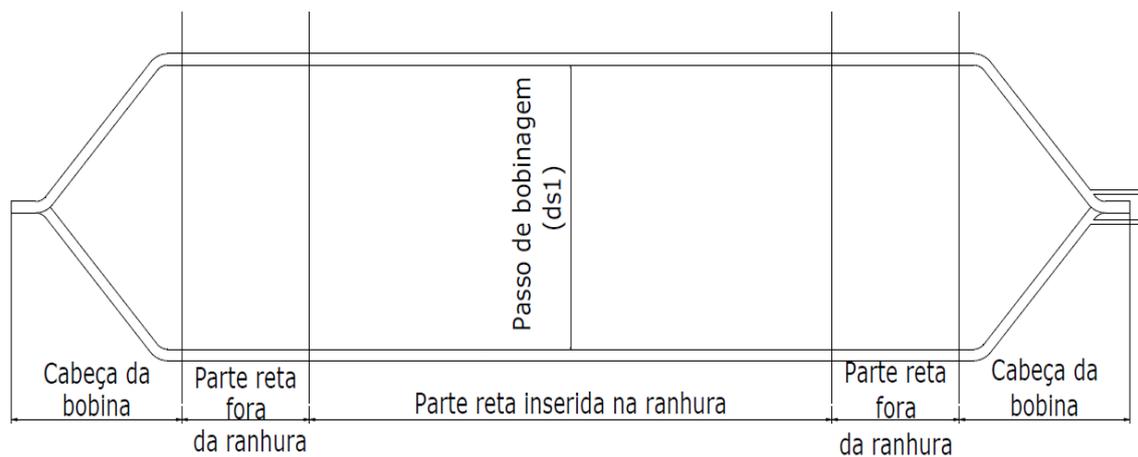
Figura 2-3 Bobina do enrolamento estático



Fonte: O autor.

A bobina vista de cima é mostrada na Figura (2-4), nesta figura é possível ver as regiões da cabeça da bobina, a parte reta e o passo de bobinagem ( $d_{s1}$ ) que será calculado nos próximos capítulos.

Figura 2-4 Vista superior da bobina



Fonte: O autor.

Para melhor demonstrar o passo de bobinagem, na Figura (2-5) é mostrado um corte de uma bobina inserida em um estator. É característico de enrolamentos que utilizam camada dupla que a bobina em uma das ranhuras fique localizada na parte superior e na outra fique localizada na parte inferior.

Figura 2-5 Passo de bobinagem



Fonte: O autor.

### 2.1.2 Características construtivas do rotor

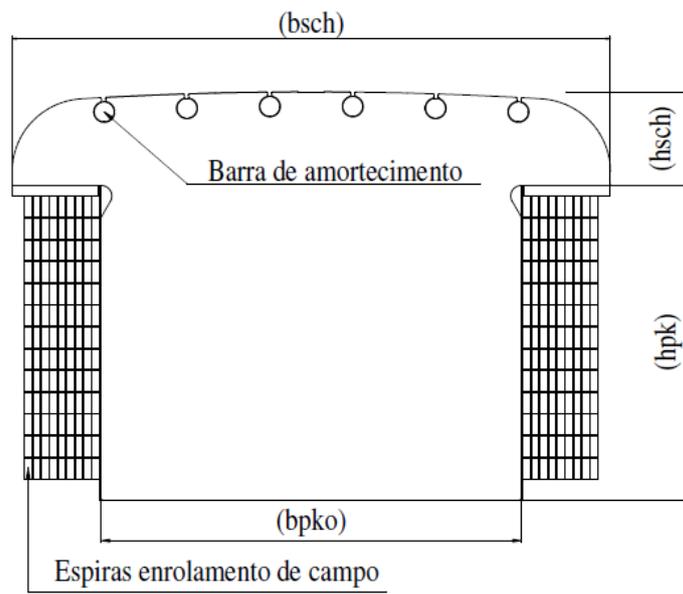
O rotor de geradores síncronos de polos salientes é composto pela roda polar com os polos magnéticos protuberantes ao eixo da máquina, enrolamento de excitação, enrolamento de amortecimento e eixo. O conjunto do polo saliente é composto pelo enrolamento de campo, barras de amortecimento e chapa polar. Na Figura (2-6) é mostrado o conjunto completo do polo saliente, o enrolamento de campo é formado por condutores de cobre isolados, onde cada condutor corresponde a uma espira.

As barras que compõem parte do enrolamento de amortecimento são concebidas para auxiliar o amortecimento de transitórios mecânicos. As barras de amortecimento produzirão o mesmo efeito da gaiola de esquilo de um motor de indução, acelerando ou desacelerando o rotor para que o mesmo mantenha o sincronismo com a rede [27]. Caso se restabeleça o sincronismo entre a tensão induzida nas bobinas e a tensão da rede, não haverá circulação de corrente nas barras de amortecimento. As barras de amortecimento são curto-circuitadas entre si e são utilizadas quando o rotor é feito com chapas empilhadas. Quando o rotor é sólido, o próprio rotor agirá no sentido de amortecer estes transitórios. Neste trabalho não são levadas em consideração possíveis oscilações na velocidade do rotor e não serão calculadas as barras de amortecimento, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

A chapa do polo pode ser dividida em duas partes que são conhecidas como corpo e sapata do polo. As dimensões do corpo do polo são caracterizadas pela altura do corpo do polo ( $h_{pk}$ ) e largura do corpo do polo ( $b_{pk0}$ ). As dimensões da cabeça do polo são caracterizadas pela altura da sapata polar ( $h_{sch}$ ) e largura da sapata polar ( $b_{sch}$ ), conforme é mostrado na Figura (2-6).

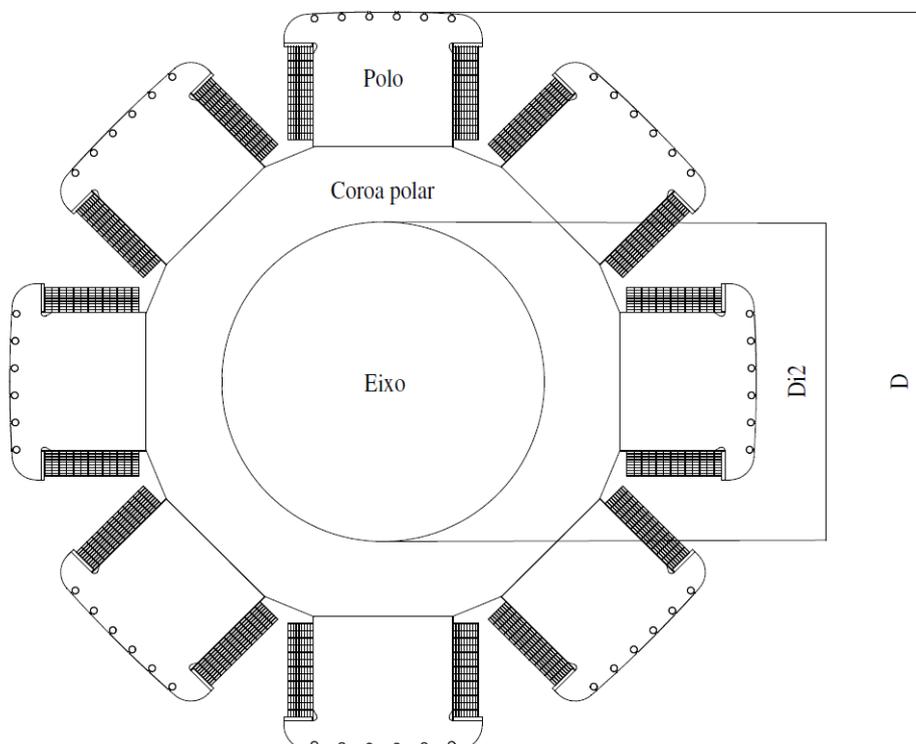
O conjunto completo do rotor de um gerador de oito polos é mostrado na Figura (2-7). A variável  $D$  corresponde ao diâmetro externo do rotor, e a variável  $D_{i2}$  ao diâmetro interno do rotor. A quantidade de polos no rotor do GSPS depende da velocidade de rotação da unidade mecânica que será acoplada ao eixo do gerador e da frequência da rede [28].

Figura 2-6 Conjunto do polo saliente



Fonte: O autor.

Figura 2-7 Conjunto do rotor



Fonte: O autor.

A distância entre o centro de um polo e o centro do polo adjacente é chamada de passo polar ( $\tau_p$ ).

## 2.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para determinar as dimensões de um gerador é necessário conhecer os dados da máquina primária que irá fornecer a potência mecânica. A máquina primária fornecerá o torque e rotação ao conjunto gerador que, por sua vez, converterá a potência mecânica em potência elétrica com alguma perda. Também são necessários os valores de tensão e frequência que serão entregues à rede. A corrente elétrica será definida a partir da potência nominal e da tensão de trabalho da máquina. O fator de potência mínimo é uma função da corrente máxima de excitação. Estas informações são a base para o início do cálculo. Para o decorrer do dimensionamento do gerador proposto neste trabalho serão utilizados os parâmetros mostrados na Tabela (2-2), sendo os mesmos valores típicos de máquinas utilizadas em PCHs.

Tabela 2-2 Dados necessários para o início do dimensionamento.

Parâmetro	Sigla	Valor
Tensão nominal	$V_1$	6900 [V]
Corrente Nominal	$I_1$	405.8 [A]
Potência Nominal	$S$	4850 [kVA]
Velocidade Nominal	$rpm$	400 [rpm]
Frequência de operação	$f$	60 [Hz]
Fator de potência	$f_p$	0,9

Fonte: O autor.

## 2.3 DIMENSIONAMENTO DO GSPS

O primeiro passo para calcular as dimensões do rotor do GSPS é determinar os valores pretendidos de indução magnética em diferentes partes da máquina, número de polos e torque eletromagnético. Os valores de indução pretendidos são mostrados na

Tabela (2-3), e o número de pares de polos necessário no rotor é calculado conforme Equação (2-1) [27].

$$p = \frac{60f}{rpm} = \frac{3600}{400} = 9 \quad (2-1)$$

Onde  $p$  é o número de pares de polos,  $f$  a frequência em Hertz e  $rpm$  representa a velocidade do rotor em rotações por minuto.

Tabela 2-3 Valores pretendidos da indução magnética no GSPS

Parâmetro	Sigla	Valor
Indução no entreferro	$B_{gi}$	0,85 [T]
Indução no dente do estator	$B_{ds}$	1,4 [T]
Indução na coroa do estator	$B_{ys}$	1,1 [T]
Indução na coroa do rotor	$B_{yr}$	1,3 [T]

Fonte: O autor.

Com os valores de potência elétrica e velocidade da máquina é possível calcular o torque ( $T$ ), conforme Equação (2-3) [27].

$$T = \frac{S * f p}{\frac{2\pi}{60} rpm} = 104206,70 \text{ [Nm]} \quad (2-2)$$

O diâmetro do rotor pode ser determinado através do valor do torque magnético da máquina e do valor da tensão tangencial ( $V_{tg}$ ). A escolha do valor da tensão tangencial é feita levando-se em consideração as características mecânicas e construtivas da máquina. Para geradores síncronos de polos salientes refrigerados a ar, os valores típicos de tensão tangencial são mostrados na Tabela (2-4) [27].

Tabela 2-4 Valores típicos de tensão tangencial para máquinas síncronas de polos salientes refrigerados a ar

Parâmetro	Sigla	Valor
Tensão tangencial mínima	$V_{tg}$	21000 [Pa]
Tensão tangencial média	$V_{tg}$	33500 [Pa]
Tensão tangencial máxima	$V_{tg}$	48000 [Pa]

Fonte: [26].

Utilizando o valor médio da tensão tangencial, obtém-se o volume do rotor da máquina conforme Equação (2-3) [27].

$$V_r = \frac{T}{2V_{tg}} = 1,5553[m^3] \quad (2-3)$$

Para determinar o diâmetro ( $D$ ) e o comprimento da máquina ( $L_1$ ) é necessário conhecer a relação entre eles. Para o GSPS com número de pares de polos maior que 1, a relação entre diâmetro e comprimento pode ser descrita pela Equação (2-4) [27].

$$E_{qaux} = \frac{L_1}{D} = \frac{\pi}{4p} \sqrt{p} = \frac{\pi}{36} \sqrt{9} = 0,261799 \quad (2-4)$$

Tendo em vista que o volume do rotor está relacionado com o diâmetro e com o comprimento do pacote conforme Equação (2-5), é possível chegar ao valor do diâmetro e ao comprimento efetivo do pacote, utilizando as equações (2-6) e (2-7) [27].

$$V_r = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L_1 \quad (2-5)$$

$$D = \left( 4 \frac{V_r}{\pi E_{qaux}} \right)^{\frac{1}{3}} = 1963[\text{mm}] \quad (2-6)$$

$$L_1 = D E_{qaux} = 514[\text{mm}] \quad (2-7)$$

Com os valores de diâmetro e comprimento do rotor é iniciado o dimensionamento dos polos do gerador.

### 2.3.1 Dimensionamento dos polos salientes

São mostradas na Figura (2-8) as variáveis a serem calculadas no polo saliente. O passo polar ( $\tau_p$ ) é calculado conforme Equação (2-8). O coeficiente de cobertura do polo ( $\alpha_i$ ) é a diferença entre o valor do passo polar ( $\tau_p$ ) e o tamanho da sapata polar ( $b_{sch}$ ). O coeficiente de cobertura do polo é calculado conforme Equação (2-9). O valor do coeficiente de cobertura do polo influencia diretamente na forma de onda da distribuição do fluxo magnético e, conseqüentemente, na tensão induzida nas bobinas do estator [8].

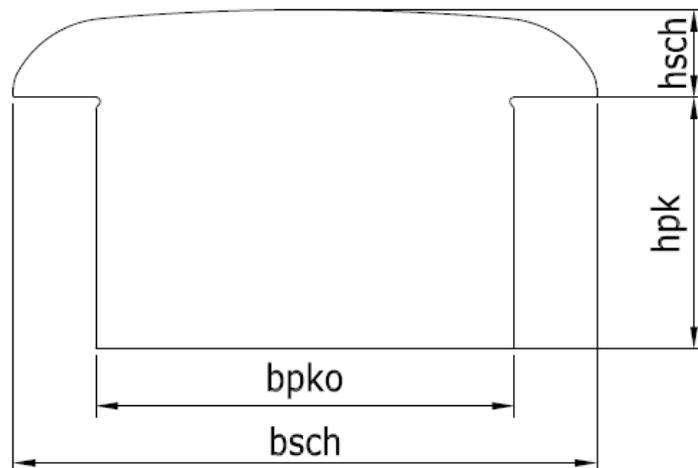
$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} = 342,61 \text{ [mm]} \quad (2-8)$$

$$\alpha_i = \frac{b_{sch}}{\tau_p} \approx 0,66 - 0,75 \quad (2-9)$$

Para o dimensionamento inicial da largura da sapata do polo saliente ( $b_{sch}$ ), optou-se por trabalhar com  $\alpha_i$  médio e variá-lo durante a otimização, portanto o valor de  $b_{sch}$  é dado pela Equação (2-10) [8].

$$b_{sch} = \tau_p \alpha_i = 244 \text{ [mm]} \quad (2.10)$$

Figura 2-8 Polo saliente.



Fonte: O autor.

A largura do corpo do polo ( $b_{pko}$ ) pode ser dimensionada conforme Equação (2-11). A largura da base do polo ( $b_{pk}$ ) pode variar de 0,45 a 0,55 do valor total de  $\tau_p$ , de modo que foi optado por adotar o valor de 0,45 e variá-lo durante a otimização [8].

$$b_{pko} = 0,45\tau_p = 153[\text{mm}] \quad (2-11)$$

O fator  $K_h$  mostrado na Equação (2-12), relaciona a altura do corpo do polo ( $h_{pk}$ ), pelo passo polar ( $\tau_p$ ). Segundo [8], o valor de  $K_h$  decresce com o aumento do passo polar, iniciando em 0,3 com  $\tau_p \leq 0,4[m]$  e terminando em 0,1 quando  $\tau_p \geq 1[m]$  [8].

$$K_h = \frac{h_{pk}}{\tau_p} \therefore h_{pk} = K_h\tau_p \approx 87[\text{mm}] \quad (2-12)$$

A altura da sapata polar ( $h_{sch}$ ) é proporcional a 10% do valor de  $\tau_p$ , quando  $\tau_p \leq 0,4[m]$  e proporcional a 20% quando  $\tau_p \geq 1[m]$ . Segundo [27], a variação entre os intervalos é linear. Para o gerador em projeto o valor de  $h_{sch}$  é mostrado na Equação (2-13).

$$h_{sch} = 0,1\tau_p = 35[\text{mm}] \quad (2-13)$$

### 2.3.2 Geometrias do estator

Utilizando o valor de indução no entreferro mostrado na Tabela (2-3) é possível calcular o fluxo magnético de pico, conforme Equação (2-14) [8].

$$\phi = \frac{2}{\pi} B_{gi}\tau_p L_1 = 0,095277[\text{Wb}] \quad (2-14)$$

A partir do fluxo é calculada a quantidade de espiras por caminho e por fase necessária para gerar a tensão da máquina. Para o cálculo do número de espiras por caminho e por fase ( $W_a$ ) é utilizada a Equação (2-15). A variável  $f_{w1}$  é chamada de fator de dispersão no enrolamento e será considerada inicialmente igual a 0,96 [8]. A variável  $V$  corresponde à tensão de fase de máquina e é multiplicada por 1,07 para que seja

considerada a dispersão de fluxo causada no entreferro e no próprio circuito magnético [8].

$$W_a = \left( \frac{1,07V}{\pi\sqrt{2}f_{w1}\phi} \right) = 163 \quad (2-15)$$

Inicialmente foi optado por utilizar o número de bobinas por polo e por fase ( $q$ ) igual a 3, e variá-lo durante a otimização.

Com o número de bobinas por polo e por fase é possível determinar a quantidade de ranhuras ( $N_1$ ) no estator da máquina [8].

$$N_1 = qm2p = 162. \quad (2-16)$$

Para o projeto inicial o valor do fator de curto-circuito da máquina ( $SCR$  - *Short Circuit Ratio*) será considerado igual a 0,9. Com isso, o valor da reatância síncrona é obtido conforme Equação (2-17) [8].

$$x_d = \frac{1}{SCR} = 1,111[\text{pu}] \quad (2-17)$$

O entreferro do gerador é calculado conforme Equação (2-18) [8].

$$g_i = 4.10^{-7} \frac{6W_a I_1}{(x_d - 0,1)2pB_{g_i}} = 12[\text{mm}] \quad (2-18)$$

O passo polar atualizado considerando o valor do entreferro é mostrado na Equação (2-19) [8].

$$\tau_p = \frac{\pi(D+2g_i)}{2p} = 346,81[\text{mm}] \quad (2-19)$$

Para manter refrigerado o núcleo do estator, a cada 60 milímetros de pacote é adicionado um canal livre para ventilação de 10 milímetros. Esta metodologia é aplicada

pela empresa Automatic. Desta forma, o número total de canais de ventilação para este gerador é igual a 9. Considerando os canais de ventilação, o comprimento total do pacote do estator ( $L_2$ ) é mostrado na Equação (2-20).

$$L_2 = L_1 + 90 = 604[\text{mm}]. \quad (2-20)$$

Para dimensionamento da ranhura serão considerados os parâmetros de densidade de corrente no enrolamento do estator ( $A_{in1}$ ) igual a  $5 \text{ A/mm}^2$  e o coeficiente de enchimento da ranhura ( $k_{fill}$ ) como sendo de 0,4. Desta forma, a área total da ranhura do estator ( $A_{slotu}$ ) é calculado conforme Equação (2-21) [8].

$$A_{slotu} = \frac{6W_a I_1}{N_1 k_{fill} A_{in1}} = 0,00111[\text{m}^2] \quad (2-21)$$

Para determinar a relação entre base e altura das ranhuras é feito o cálculo do passo de cada ranhura [8].

$$\tau_s = \left( \frac{\pi D + 2g_i}{N_1} \right) = 38,53[\text{mm}] \quad (2.22)$$

Os valores do tamanho da abertura da ranhura ( $b_{01}$ ) e a altura da ranhura ( $h_{n1}$ ) são mostrados na Equações (2.23) e na Equação (2.24) respectivamente [8].

$$b_{01} = \tau_s k_{fill} = 15 [\text{mm}] \quad (2.23)$$

$$h_{n1} = \frac{A_{slotu}}{b_{01}} = 72[\text{mm}] \quad (2.24)$$

Por fim, calcula-se a altura da coroa ( $h_{ys}$ ) e o diâmetro externo do estator ( $D_{e1}$ ) [8].

$$h_{ys} = \frac{B_{gl} \tau_s}{B_{ys} \pi} = 94[\text{mm}] \quad (2.25)$$

$$D_1 = D + 2g_i = 1987 \text{ [mm]} \quad (2.26)$$

$$D_{e1} = D_1 + 2(h_{n1} + h_{ys}) \approx 2319 \text{ [mm]} \quad (2.27)$$

### 2.3.3 Dimensionamento dos enrolamentos do estator

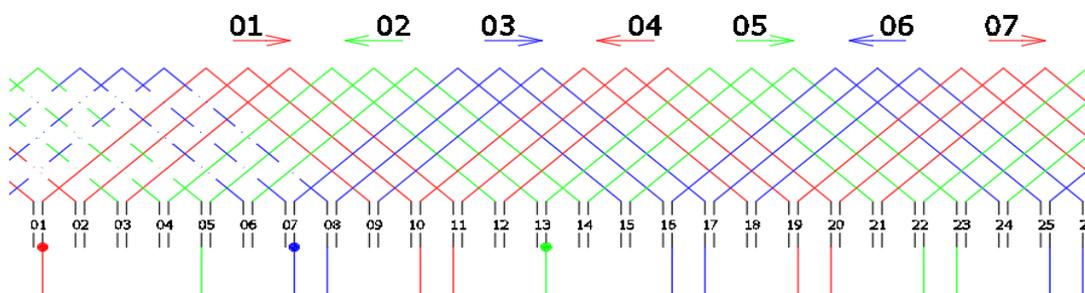
O enrolamento estatórico utilizado é do tipo imbricado, com bobinas idênticas, distinguindo uma fase da outra através das ligações feitas após as bobinas terem sido inseridas no estator da máquina. O enrolamento é feito com camada dupla, sendo o número de bobinas igual ao número de ranhuras.

Para o início do dimensionamento do enrolamento do estator é necessário identificar qual o passo médio do enrolamento ( $d_{s1}$ ). O passo  $d_{s1}$  pode ser calculado conforme Equação (2.28). Na Figura (2-3), é mostrada a distribuição das bobinas das fases A, B e C em algumas ranhuras do estator [8, 27].

$$d_{s1} = \left(\frac{N_1}{2p}\right) - 1 = 8 \quad (2.28)$$

Com a determinação de  $d_{s1}$  resta determinar a quantidade de espiras por bobina ( $Z_1$ ). O valor total de  $Z_1$  multiplicado pela quantidade de bobinas por fase é chamado de  $W_1$ , e deverá ser sempre igual ou maior que  $W_a$  [8, 27].

Figura 2-9 Configuração do enrolamento.



Fonte: O autor.

### **2.3.4 Enrolamentos do rotor**

O dimensionamento do enrolamento do rotor depende da força magnetomotriz necessária para produzir o fluxo magnético do circuito. O dimensionamento do circuito do rotor não será feito neste primeiro momento, cabendo assim determinar suas características na análise do desempenho do gerador e estabelecer restrições durante a otimização para que seja possível encontrar o enrolamento adequado.

No próximo capítulo, é iniciado o cálculo do desempenho elétrico e magnético das geometrias encontradas, onde são calculadas as induções, campo magnético, reatâncias, resistências, força magnetomotriz com e sem carga e densidade de corrente nos condutores.

### 3 ANÁLISE DE INDICADORES DE DESEMPENHO DO GSPS

No capítulo 2 foi obtido o dimensionamento de um GSPS. Com as geometrias encontradas serão calculadas as características de funcionamento da máquina em regime permanente.

Após finalizada a primeira etapa, inicia-se a análise do desempenho do gerador em função da geometria encontrada calculando as variáveis do circuito magnético e suas características para que seja possível determinar a corrente de excitação da máquina à vazio e em carga, valores de densidade de fluxo, densidade de corrente e os valores de resistência e reatância.

#### 3.1 DADOS DE ENTRADA PARA A ANÁLISE DE DESEMPENHO DO GSPS.

Na Tabela (3-1) são mostrados os dados das dimensões calculadas no capítulo anterior. A partir destes dados será feito o cálculo analítico do desempenho em regime permanente do GSPS.

Tabela 3-1 Dados de entradas gerais

<b>Parâmetro</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro externo estator	$D_{e1}$	2319 [mm]
Diâmetro interno do estator	$D_1$	1987 [mm]
Diâmetro do eixo	$D_{i2}$	1425 [mm]
Comprimento do pacote	$L_1$	514 [mm]
Comprimento total do pacote	$L_2$	604 [mm]
Comprimento do canal de ventilação	$W_d$	10 [mm]
Número de canais de ventilação	$N_{cv}$	9
Entreferro	$g_i$	12 [mm]
Entreferro máximo	$g_{máx}$	18 [mm]
Número de ranhuras	$N_1$	162
Número de fases	$m$	3
Número de ranhuras por polo e por fase	$q$	3

Passo de enrolamento	$d_{s1}$	8
Altura do corpo do polo	$h_{pk}$	87 [mm]
Altura da sapata do polo	$h_{sch}$	35 [mm]
Base do corpo polar	$b_{pko}$	153 [mm]
Base da sapata polar	$b_{sch}$	244 [mm]
Número de espiras por bobina	$Z_1$	4
Número de caminhos paralelos	$N_{cp}$	1
Largura da ranhura	$b_{01}$	15 [mm]
Altura da ranhura	$h_{n1}$	72 [mm]

Fonte: O autor.

### 3.2 CÁLCULO DO CIRCUITO MAGNÉTICO

Com os dados da geometria é possível determinar as condições de funcionamento do GSPS em regime permanente. Os objetivos desta etapa são:

- Determinar o fluxo magnético necessário a ser gerado por polo para se obter a tensão nominal da máquina.
- Determinar a relutância bem como os níveis de indução indução e o campo magnético no gerador.
- Determinar a força magnetomotriz necessária no circuito.
- Determinar a corrente de excitação a vazio.
- Determinar as reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura bem como a de dispersão.
- Determinar a força magnetomotriz levando em consideração a reação de armadura.
- Determinar a corrente de excitação com carga e o rendimento da máquina.

O fluxo magnético ( $\phi$ ) necessário para gerar a tensão nominal da máquina, levando em consideração a forma construtiva mostrada na Tabela (3-1), é mostrado na Equação 3-1 [8].

$$\phi = \frac{V}{f_{w1} f W_1 \sqrt{2} \pi} \quad (3-1)$$

Para o cálculo do fluxo magnético necessário por polo são utilizados o valor da tensão nominal em cada fase ( $V$ ), fator de bobinagem ( $f_{w1}$ ), a frequência de operação da máquina ( $f$ ) e o número de espiras por caminho e por fase ( $W_1$ ).

Com o valor do fluxo magnético necessário é possível determinar a indução no circuito magnético da máquina.

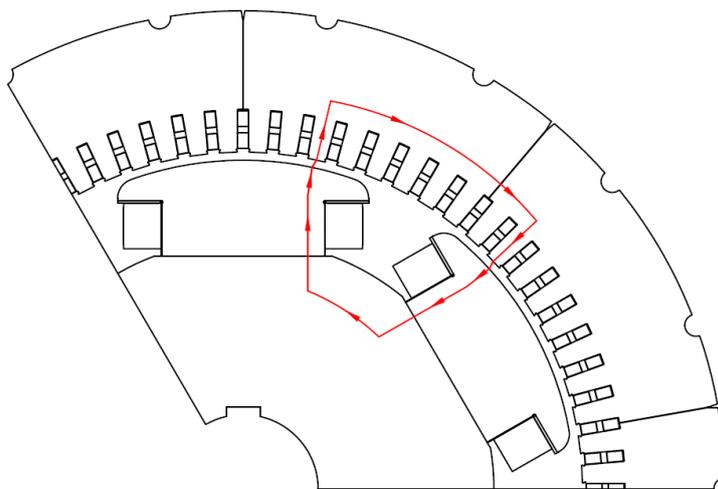
### 3.2.1 Indução e campo magnético no gerador

O fluxo magnético gerado por polo descrito na Equação (3.1) deve percorrer o circuito magnético conforme apresentado na Figura (3-1).

As linhas de distribuição do fluxo magnético são mostradas na Figura (3-2). O fluxo magnético produzido por polo deve ser igual a  $\phi$ , o valor da indução magnética é calculado conforme Equação (3-2). O valor da seção transversal à direção do fluxo magnético é representado pela variável  $s$  [3]. O método de cálculo da seção é mostrado no Apêndice 1.

$$\phi = \int_s \vec{B} d\vec{s} \therefore B = \frac{\phi}{s} \quad (3-2)$$

Figura 3-1 Caminho magnético



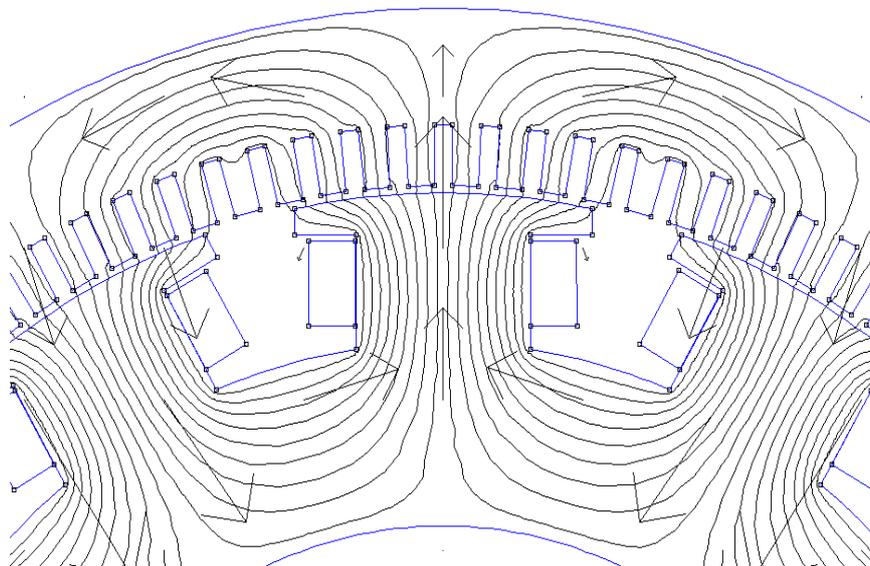
Fonte: O autor.

O cálculo do campo magnético foi realizado considerando o material ferromagnético como sendo linear e sua permeabilidade ( $\mu$ ) igual a  $2100\mu_0$ . Com isso, podem ser calculados os campos magnéticos no gerador conforme Equação (3-3) [3].

$$B = \mu H \therefore H = \frac{B}{\mu} \quad (3-3)$$

Os valores das induções e dos campos magnéticos calculados analiticamente são mostrados nas Tabelas (3-2) e (3-3) respectivamente.

Figura 3-2 Linhas de fluxo.



Fonte: O autor.

Tabela 3-2 Induções de pico

Parâmetro	Sigla	Valor
Coroa do estator	$B_{c1}$	0,8269 [T]
Dente estator	$B_{d1}$	0,8123 [T]
Entreferro	$B_{gi}$	0,63 [T]
Corpo polo	$B_{sch}$	1,097 [T]
Coroa rotor	$B_{c2}$	0,53 [T]

Fonte: O autor.

Quando comparada a Tabela (3-2) com a Tabela (2-3), que previa as induções no gerador é possível perceber que houve uma significativa redução nos valores de indução. Isso ocorreu pois o número total de espiras por fase depende da quantidade de espiras por bobina. Para que fosse possível calcular o valor de  $W_1$ , foi levado em consideração que a quantidade de espiras em uma bobina deveria resultar sempre em um valor igual ou maior de espiras em série por fase que o valor de  $W_a$ , encontrado na Equação (2-15). Nos cálculos realizados, a quantidade de espiras em série por fase ficou 1,32 vezes maior que  $W_a$ .

Com o valor da indução e levando em consideração a permeabilidade linear é calculado o campo magnético, mostrado na Tabela (3-3)

Tabela 3-3 Campo magnético de pico

Parâmetro	Sigla	Valor
Coroa do estator	$H_{c1}$	104,46 [Ae/m]
Dente estator	$H_{d1}$	307,83 [Ae/m]
Entreferro	$H_{gi}$	503063,26 [Ae/m]
Corpo polo	$H_{sch}$	415,86 [Ae/m]
Coroa rotor	$H_{c2}$	200,38 [Ae/m]

Fonte: O autor.

### 3.2.2 Força magnetomotriz em vazio

A partir do cálculo do campo magnético ( $H$ ) é possível calcular o valor da força magnetomotriz ( $FMM$ ) necessária para gerar o fluxo magnético em cada parte ativa da máquina. O cálculo da FMM em vazio é feito utilizando a Equação (3-5). Para o cálculo deve ser levado em consideração o caminho ( $l$ ) que o campo magnético irá percorrer [3], [7], [28].

$$FMM_{Vaz} = \oint \vec{H} d\vec{l} = Hl \quad (3-5)$$

Os valores da  $FMM_{Vaz}$  nas regiões de interesse são mostrados na Tabela (3-4).

Tabela 3-4 FMM à vazio.

Parâmetro	Sigla	Valor
Coroa do estator	$F_{c1}$	25,192 [Ae]
Dente estator	$F_{d1}$	21,726 [Ae]
Entreferro	$F_{gi}$	6549,8 [Ae]
Corpo polo	$F_{sch}$	36,18 [Ae]
Coroa rotor	$F_{c2}$	42,217 [Ae]
FMM Total a vazio	$FMM_{vaz}$	6680,9 [Ae]

Fonte: O autor.

### 3.2.3 Resistências elétricas e reatâncias

#### 3.2.3.1 Resistências Elétricas

Quanto maior for a temperatura de operação da máquina, maior será a resistência elétrica dos condutores, desta forma, a resistência da máquina deverá ser corrigida para a temperatura de funcionamento do gerador.

Para corrigir a resistência devido à temperatura de funcionamento primeiramente é calculada a resistividade do condutor ( $\rho$ ) para a temperatura  $T_a$ , sendo que os valores de resistividade ( $\rho_{20}$ ) e o coeficiente de temperatura ( $\beta$ ) ambos a 20 graus Celsius são dados conhecidos. A resistividade do condutor é calculada com a Equação (3-6). Além dos coeficientes, para corrigir o valor da resistividade é necessário conhecer a temperatura ambiente esperada ( $T_a$ ) e estipular a maior variação de temperatura em funcionamento ( $\Delta T$ ) [22].

$$\rho = \rho_{20} \left( \frac{\beta + T_a + \Delta T}{\beta + 20} \right) \quad (3-6)$$

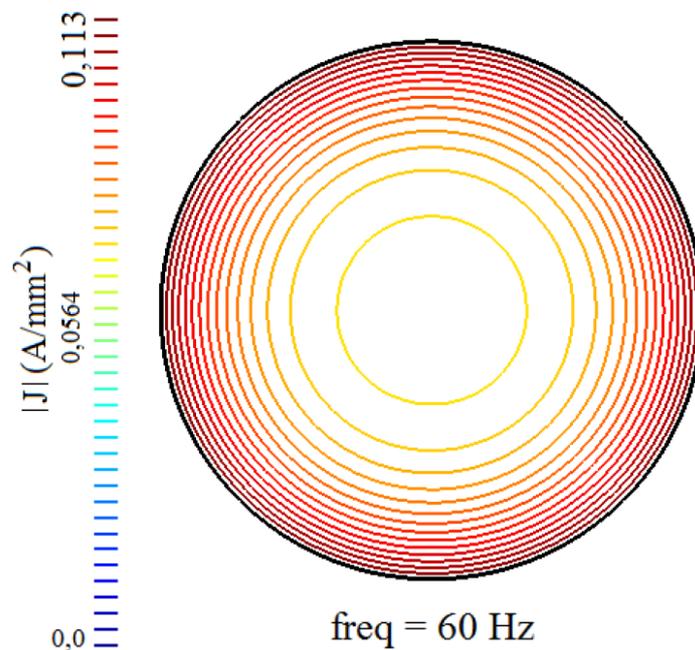
Com o cálculo da resistividade é calculada a resistência ( $R$ ) do condutor através da Equação (3-7). Para o cálculo da resistência é necessário calcular o comprimento médio do condutor ( $L_{w1}$ ) e a seção ( $s_{c1}$ ), além de conhecer o número de caminhos paralelos do enrolamento ( $N_{cp}$ ) [22].

$$R = \rho \left( \frac{W_1 L w_1}{N_{cp} S_{c1}} \right) \quad (3-7)$$

O cálculo da resistência em condutores por onde circulam correntes alternadas também dependem do efeito pelicular. O efeito de adensamento de corrente ocorre, pois, uma parcela do fluxo gerado pela corrente que atravessa os condutores pode atravessar o próprio enrolamento causando assim uma distribuição não homogênea da corrente pelos fios que compõem o condutor [34].

Segundo [34], um condutor percorrido por uma corrente alternada gera um campo magnético alternado rotacional. A Figura (3-3) apresenta um condutor sendo percorrido por corrente alternada de 100 A em 60 Hz. É possível notar que devido ao efeito pelicular a densidade de corrente no interior do condutor é menor do que na periferia do mesmo. Esse efeito faz com que a seção do condutor utilizada pela corrente seja menor, aumentando assim as perdas devido à resistência ser maior.

Figura 3-3 Efeito pelicular



Fonte: [34].

### 3.2.3.2 Reatâncias

A reatância magnetizante do gerador ( $X_M$ ) é a principal reatância da máquina. Os valores de reatância de eixo direto ( $X_D$ ) e em quadratura ( $X_Q$ ) são proporcionais à geometria da máquina e dependentes da reatância de magnetização e da reatância de dispersão ( $X_1$ ), conforme mostrado na Equação (3-8) e na Equação (3-9) [8, 27].

$$X_D = (X_M K_{D1}) + X_1 \quad (3-8)$$

$$X_Q = (X_M K_{Q1}) + X_1 \quad (3-9)$$

A reatância magnetizante para máquinas de polos salientes é calculada utilizando os valores da velocidade angular do gerador ( $\omega_r$ ), número de espiras em série por fase ( $W_1$ ), fator de bobinagem ( $f_{w1}$ ), passo polar total ( $\tau$ ), comprimento total do pacote do GSPS ( $L_2$ ), fator de Carter ( $K_c$ ), entreferro ( $g_i$ ), fator de saturação ( $K_s$ ) e o número de pares de polo ( $p$ ), conforme Equação (3-10) [8, 27].

$$X_M = \frac{6\mu_0\omega_r (W_1 f_{w1})^2 \tau L_2}{\pi^2 K_c g_i (1+K_s) p} \quad (3-10)$$

Os coeficientes  $K_{D1}$  e  $K_{Q1}$  dependem da geometria do gerador e são calculados conforme segue [8, 27].

$$K_{D1} = \frac{\tau_p}{\tau} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\tau_p}{\tau} \pi\right) \quad (3-11)$$

$$K_{Q1} = \frac{\tau_p}{\tau} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\tau_p}{\tau} \pi\right) + \frac{2}{3\pi} \cos\left(\frac{\tau_p}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) \quad (3-12)$$

O cálculo da reatância de dispersão é feito conforme Equação (3-13), que leva em consideração a reatância de dispersão na ranhura ( $X_{ran}$ ) e a reatância de dispersão na cabeça da bobina ( $X_c$ ). Os valores das reatâncias são mostrados na Tabela (3-5) [8,27].

$$X_1 = X_{ran} + X_c \quad (3-13)$$

Tabela 3-5 Reatâncias

Parâmetro	Sigla	Valor
Reatância magnetizante	$X_M$	25,415 [ $\Omega$ ]
Reatância de dispersão	$X_1$	0,2746 [ $\Omega$ ]
Reatância síncrona de eixo direto	$X_D$	29,427 [ $\Omega$ ]
Reatância síncrona de eixo em quadratura	$X_Q$	17,079 [ $\Omega$ ]
Impedância de base	$Z_B$	9,82 [ $\Omega$ ]
Reatância síncrona de eixo direto	$x_D$	2,99 [pu]
Reatância síncrona de eixo em quadratura	$x_Q$	1,74 [pu]

Fonte: O autor.

### 3.2.4 Força magnetomotriz com carga

Para determinar a força magnetomotriz com carga é necessário calcular a reação da armadura devido à passagem de corrente pelo enrolamento estatórico. O valor da força magnetomotriz necessária com carga ( $FMM_{Carg}$ ), leva em consideração os valores de reação de armadura em eixo direto ( $FMM_{Re actD}$ ) e em quadratura ( $FMM_{Re actQ}$ ), também são considerados os ângulos da carga ( $\theta$ ) e o ângulo correspondente ao fator de potência do gerador ( $\phi$ ). O valor da  $FMM_{Carg}$  é calculado conforme [8, 27]

$$FMM_{Re actB} = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_1 \left( \frac{W_1 f w_1}{2p} \right) \quad (3-14)$$

$$FMM_{Re actD} = FMM_{Re actB} \sin(|\theta| + \phi) K_{D1} \quad (3-15)$$

$$FMM_{Re actQ} = FMM_{Re actB} \cos(|\theta| + \phi) K_{Q1} \quad (3-16)$$

$$FMM_{Re act} = \sqrt{FMM_{Re actD}^2 + FMM_{Re actQ}^2} \quad (3-17)$$

$$FMM_{Carg} = FMM_{Vazio} FMM_{Re actCarg} \quad (3-18)$$

Com os valores da  $FMM_{carg}$ , número de espiras no polo ( $Z_{pol}$ ) e o número de caminhos paralelos no enrolamento de excitação ( $N_{cp_2}$ ), é possível calcular a corrente de excitação necessária nos polos ( $I_e$ ).

$$I_e = \frac{FMM_{carg} N_{cp_2}}{Z_{pol}} \quad (3-19)$$

### 3.3 CÁLCULOS DAS PERDAS ELETROMAGNÉTICAS, RENDIMENTO E CUSTO

As perdas em máquinas trifásicas podem ser divididas em 3 grupos distintos, são eles: perdas mecânicas, perdas elétricas e perdas magnéticas. As perdas mecânicas acontecem devido ao atrito dos mancais e dos ventiladores, para o cálculo do rendimento da máquina as perdas mecânicas serão estimadas.

#### 3.3.1 Perdas elétricas

As perdas elétricas ocorrem devido ao efeito Joule o que origina o aquecimento dos condutores com a passagem de corrente. As perdas elétricas ( $P_{el}$ ) são determinadas pela Equação (3-20), onde  $I$  representa a corrente eficaz que circula pelo condutor e  $R$  a resistência corrigida no condutor [28].

$$P_{el} = I^2 \times R \quad (3-20)$$

Neste primeiro momento, não são levadas em consideração as perdas elétricas para o cálculo do rendimento, tendo em vista que o enrolamento será definido na otimização. Qualquer informação de cálculo de rendimento apresentando as perdas elétricas só é válida com a definição do condutor utilizado e da quantidade de caminhos paralelos.

#### 3.3.2 Perdas no núcleo magnético

As perdas no núcleo devido à variação do fluxo magnético são divididas em grupos, são estes: perdas por histerese, perdas devidas às correntes de Foucault e perdas suplementares.

### 3.3.2.1 Perdas por histerese

O processo de magnetização dos materiais ferromagnéticos é realizado pela movimentação das paredes dos domínios magnéticos e por suas rotações. As perdas por histerese são atribuídas às descontinuidades no movimento das paredes dos domínios, são independentes da frequência e dependentes do valor máximo da indução. Para o cálculo da histerese, neste trabalho, foi utilizado o modelo escalar de Jiles-Atherton. Este modelo numérico é amplamente utilizado e possui baixo custo computacional.

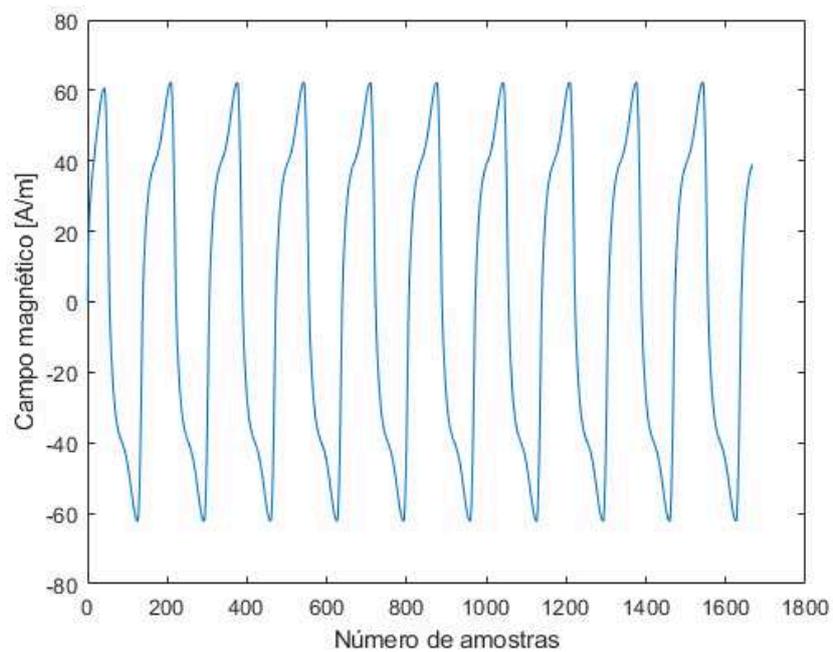
Para utilizar o método de Jiles-Atherton é necessário se ter o material caracterizado, ou seja, é necessária a obtenção dos parâmetros dos modelos para aquele material. O modelo de Jiles-Atherton necessita de cinco parâmetros:  $M_s$ ,  $k$ ,  $c$ ,  $a$  e  $\alpha$ , todos obtidos a partir de dados experimentais.

Na Equação (3-20) é mostrado o modelo utilizado para a obtenção da curva de histerese. O valor das variáveis  $M_s$ ,  $k$ ,  $c$ ,  $a$  e  $\alpha$ , foram obtidos durante a disciplina de Materiais Magnéticos ofertada pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, e representam um laço BH típico de aços para fins elétricos.

$$\frac{dM}{dB} = \frac{(1-c)\frac{dM_{irr}}{dB_e} + \frac{c}{\mu_0} \frac{dM_{an}}{dH_e}}{1 + c\frac{dM_{an}}{dH_e}(1-\alpha) + \mu_0(1-c)(1-\alpha)\frac{dM_{irr}}{dB_e}} \quad (3-20)$$

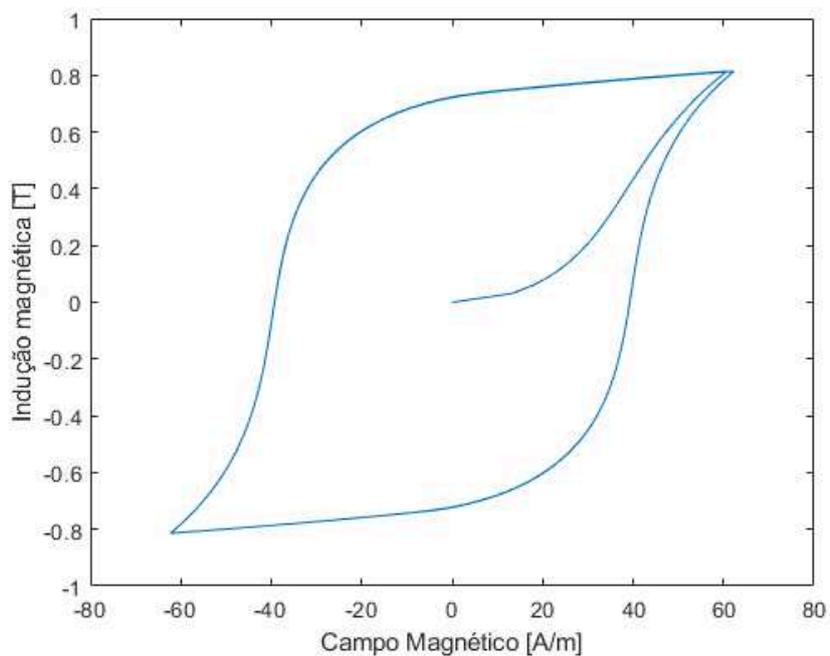
Para o cálculo do campo magnético devido à histerese foram utilizados os dados obtidos a partir de um quadro de Epstein, e a alimentação do fluxo magnético utilizada no modelo foi senoidal. Com isso, o campo magnético considerando a histerese magnética é mostrado na Figura (3-4). A curva de histerese calculada por meio do modelo de Jiles-Atherton é mostrada na Figura (3-5). A partir da curva é realizada a integral da área e retirado o valor da energia dissipada [J/m<sup>3</sup>].

Figura 3-4 Campo magnético devido à histerese



Fonte: O autor.

Figura 3-5 Curva de histerese obtida com o modelo de Jiles-Atherton



Fonte: O autor.

### 3.3.2.2 Perdas por Correntes de Foucault

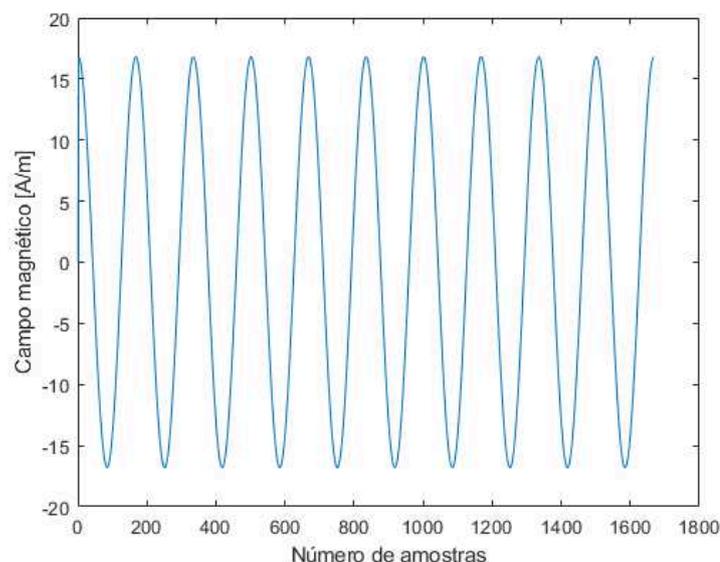
As perdas magnéticas por Correntes de Foucault são consequência das correntes induzidas no núcleo ferromagnético gerada pelo fluxo magnético variável no tempo. Com a variação são criados anéis de correntes induzidas perpendiculares ao fluxo [4]. A equação que define a perda no ferro devido às correntes induzidas é a Equação (3-21), e leva em consideração a condutividade do material ( $\sigma$ ), a espessura da chapa de ferro magnético ( $d$ ) e a densidade volumétrica do material ( $m_v$ ).

$$P_f = \frac{\sigma d^2}{12m_v T} \int_0^T \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 dt \text{ [W/kg]} \quad (3-21)$$

As perdas no ferro estão diretamente ligadas às características do material, à espessura da chapa e variação da indução. Como as perdas variam com a espessura da chapa ao quadrado, busca-se minimizar as perdas diminuindo a espessura do material [4].

Para incluir o efeito das correntes parasitas foi calculado, junto com o modelo de Jiles-Atherton, o campo magnético que é gerado devido à circulação destas correntes. Na Figura (3-6) é mostrado o campo magnético devido à circulação de correntes parasitas na chapa de ferro silício [4].

Figura 3-6 Campo magnético criado pela circulação de corrente induzida no ferro magnético.



Fonte: O autor.

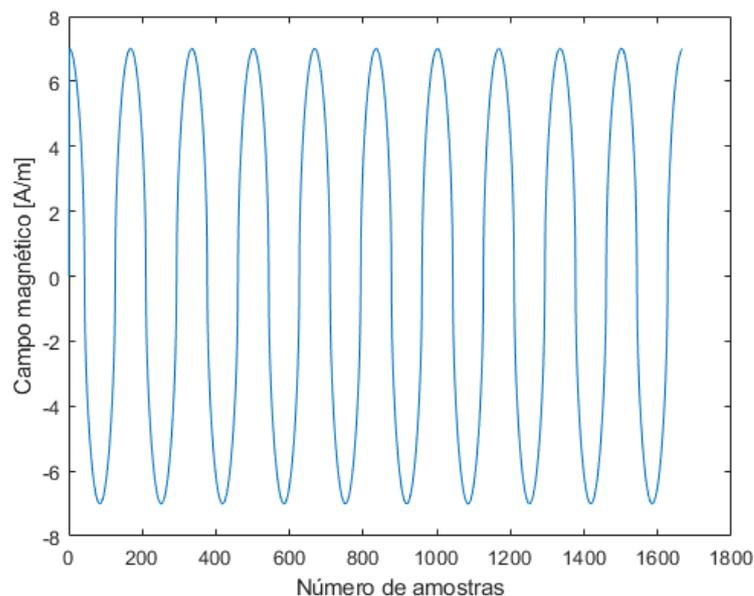
### 3.3.2.3 Perdas excedentes

As perdas suplementares ou perdas excedentes têm sua origem no fenômeno de deslocamento das paredes dos domínios magnéticos. Uma chapa magnética quando submetida a uma indução magnética variável no tempo gera correntes induzidas. O deslocamento das paredes dos domínios magnéticos também origina correntes induzidas e conseqüentemente um campo magnético excedente ( $H_e$ ) [6]. A Equação que descreve o valor das perdas excedentes ( $P_{ex}$ ) é a Equação (3-22), que leva em consideração o coeficiente admissional relacionado ao atrito do deslocamento das paredes dos domínios ( $G$ ), a caracterização da distribuição estática do campo coercitivo local ( $V_0$ ) e a seção da chapa ( $S$ ) [6].

$$P_{ex} = \frac{1}{m_v} \sqrt{\sigma G V_0 S} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1,5} dt \quad [\text{W/kg}] \quad (3-22)$$

O campo magnético criado pelo deslocamento das paredes dos domínios magnéticos é mostrado na Figura (3-7).

Figura 3-7 Campo magnético criado pelo descolamento das paredes dos domínios magnéticos

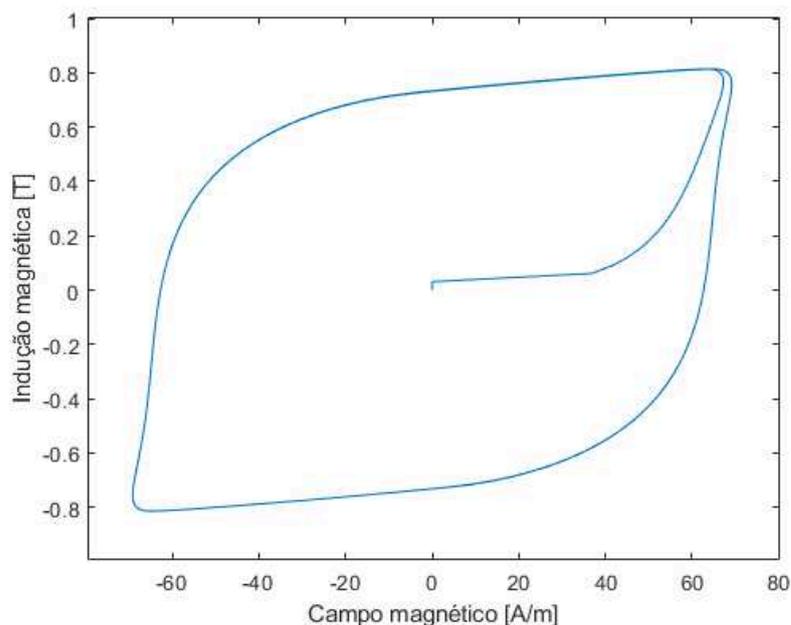


Fonte: O autor.

### 3.3.3 Perdas totais e rendimento

O cálculo das perdas totais no ferro silício pode ser feito obtendo-se uma curva com a soma do campo magnético originado pela histerese, pelas correntes de Foucault e perdas excedentes *versus* a indução magnética, conforme Figura (3-8). A densidade volumétrica da energia perdida por ciclo pode ser obtida pela integral da área da curva BH resultante.

Figura 3-8 Curva BH contendo os efeitos das correntes induzidas, histerese e perdas excedentes.



Fonte: O autor.

O cálculo das perdas foi realizado somente no estator da máquina pois foi considerado que o fluxo magnético no rotor é contínuo. O circuito magnético do estator foi separado em dente e coroa, foi utilizada a indução de pico na seção e variado a mesma senoidalmente. O cálculo da integral da área do laço BH mostrado na Figura (3-8) resulta na densidade de perda de origem magnética em  $[J/m^3]$  logo, para o cálculo das perdas

totais foi necessário calcular o volume dos dentes e da coroa do estator. Este cálculo encontra-se no Apêndice 2.

Com o cálculo das perdas magnéticas é possível calcular o rendimento da máquina. As perdas mecânicas que compõem o cálculo do rendimento foram estimadas em 3 kW levando em consideração ensaios em máquinas deste porte pela empresa Automatic. As perdas totais podem ser calculadas conforme Equação (3-23).

$$P_{Total} = P_{el} + P_{ferro} + P_{mec} \quad (3-23)$$

Com o valor das perdas totais calculadas é possível então calcular o rendimento do gerador ( $Rend$ ), conforme Equação (3-24).

$$Rend = 100 \frac{Sf_p}{(Sf_p) + P_{total}} = 51,81 \% \quad (3-24)$$

### 3.3.4 Custo Financeiro

O custo financeiro da máquina será calculado em função do material utilizado. Neste trabalho somente será considerado como custo os valores gastos com a compra de aço magnético e cobre, desprezando-se os custos de produção, transporte, etc.

As massas serão divididas em quatro variáveis, seu cálculo é apresentado no Apêndice 3, e são:

- $M_{cobrer}$  = Massa do cobre do rotor;
- $M_{cobres}$  = Massa do cobre do estator;
- $M_{fmr}$  = Massa do material ferro magnético do rotor;
- $M_{fms}$  = Massa do material ferro magnético do estator;

O fator custo da máquina leva em consideração o material ferromagnético utilizado e o cobre conforme a Equação (3-25)

$$FC = \frac{(M_{cobrer} + M_{cobres})62 + (M_{fmr} + M_{fms})38}{1000} = 240,61 \quad (3-25)$$

O valor de 62 que multiplica a massa do cobre e o valor de 38 que multiplica a massa do gerador são valores que expressam o percentual de influência de cada material no custo final da máquina. A divisão por 1000 é somente um fator de escala.

Os valores de rendimento e fator custo serão utilizados como objetivo durante a otimização da máquina.

## 4 OTIMIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO

Neste capítulo será apresentada a metodologia de otimização utilizada neste trabalho bem como as variáveis de entrada e restrições utilizadas.

A otimização de um processo é a ação de encontrar soluções que minimizem ou maximizem um ou mais objetivos que satisfaçam todas as restrições impostas ao processo. Um problema de otimização que possui somente um objetivo resulta em uma única solução e quando se trabalha com mais de um objetivo existe um conjunto de alternativas de soluções [32].

### 4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os estudos com algoritmos genéticos iniciaram por volta da década de 1970 na Universidade de Michigan e foram propostos por John Holland em seu livro “*Adaption in Natural and Artificial Systems*”. A otimização baseava-se em técnicas naturais de seleção e obteve grande atenção dos pesquisadores devido ao seu alto potencial para a resolução de problemas complexos [32].

Algoritmos genéticos são inspirados na forma como os seres vivos sobrevivem e passam seu material genético para as próximas gerações, utilizando princípios propostos por Charles Darwin. A teoria propõe que espécies sobrevivem devido a sua aptidão e reprodução. Quanto melhor a adaptação de um indivíduo melhor será a sua chance de sobreviver e gerar descendentes [32].

O algoritmo genético inicia com uma população de indivíduos randômicos, cada um representando uma possível solução. Durante as iterações que se seguem, os indivíduos são avaliados por meio de algumas medidas de adequação e a partir da avaliação é criada a próxima geração. A geração de novos indivíduos só é finalizada quando algum critério de parada é atingido.

Os termos chaves que definem um algoritmo genético segundo [2], são:

- Indivíduo = qualquer solução possível;
- Cromossomo = codificação das características de um indivíduo;
- População = grupo de indivíduos;
- Espaço de busca = todas as soluções possíveis para o problema;

- Genoma = coleção de todos os cromossomos de um indivíduo;

#### **4.1.1 Criação da população inicial**

A população inicial é gerada randomicamente e todos os indivíduos são considerados possíveis soluções do problema. Por meio das funções objetivo a população é avaliada e recebe uma classificação que indica qual seu nível de aptidão. Os objetivos são o marco de onde o algoritmo deve levar a solução, se houver mais de um objetivo e se estes forem conflitantes o programa busca encontrar pontos onde a solução não é dominada e apresentar os pontos para que seja feita a escolha da resposta adequada [2].

#### **4.1.2 Seleção**

Para que seja possível a recombinação ou criação de novas gerações é necessário selecionar os pais dos novos indivíduos. Esta escolha deve ser feita privilegiando os membros que possuem mais chance de se adaptar ao ambiente e apresentem um valor de função 'fitness' maior. Porém, a próxima geração também contará com a participação de indivíduos que apresentem um valor 'fitness' menor para que as opções de solução não venham a convergir para um máximo ou mínimo local [2].

#### **4.1.3 Crossover**

O crossover é a troca de genes entre os pais selecionados com a função de gerar filhos ou novos indivíduos que tenham maior prospecção de serem a melhor solução para o problema [2]

#### **4.1.4 Mutação**

A mutação tem o objetivo de alterar uma informação genética a fim de garantir a diversidade do espaço de busca. Esta atuação previne que todas as soluções acabem coincidindo em um ponto ótimo local. Diferente do crossover, a mutação faz alterações sem relacionar um indivíduo com o outro [2].

#### **4.1.5 Elitismo**

Segundo [2], dada uma população gerada aleatoriamente cada indivíduo será analisado e uma cópia do melhor ponto, ou seja, do ponto no qual se obteve o melhor desempenho é guardada em uma posição extra do algoritmo. Em seguida os operadores genéticos atuam sobre os primeiros pontos e comparam com a cópia guardada. Caso algum dos indivíduos da nova geração possuir uma função fitness menor que a cópia guardada, esse valor será substituído.

#### **4.1.6 Nova geração**

Após a execução dos processos anteriores, surge uma nova população. Essa população passará pelo mesmo processo. Inicialmente será testada e caso não atinja a condição de parada do algoritmo o processo se inicia novamente.

#### **4.1.7 Objetivos e restrições**

Algoritmos multiobjetivo possuem dois ou mais objetivos a serem alcançados. Os objetivos do algoritmo são maximizar ou minimizar as variáveis de desempenho. Em algoritmos multiobjetivo as soluções apresentadas ocorrem dentro de um conjunto de soluções dominadas e não dominadas.

As soluções são válidas somente quando obedecem às restrições impostas no problema. As restrições são faixas que restringem o resultado para convergir somente naquele caso. Se após a iteração do algoritmo genético as variáveis de restrição não ficaram na faixa desejada os objetivos são descartados [2].

#### **4.1.8 Soluções dominadas e não dominadas**

A maioria dos problemas reais possui mais de um objetivo. Por isso, as soluções multiobjetivo apresentam diversas soluções que se encaixam dentro das restrições impostas ao problema. Para determinar qual a melhor solução, devem ser definidos as prioridades e os pesos entre os diversos objetivos de interesse, assim encontrando uma solução ótima baseada nas informações fornecidas. Também existe a possibilidade de não

definir prioridades. Neste caso o algoritmo encontrará um conjunto de soluções não dominadas. As soluções não dominadas superam as outras soluções e posteriormente é feita a escolha de uma solução dentro deste conjunto [35].

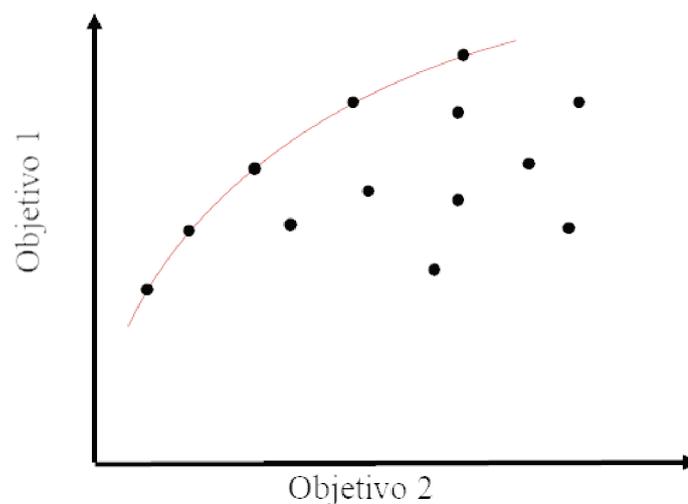
Soluções dominadas possuem todos os objetivos piores que outras soluções. Neste caso são soluções válidas, porém não apresentam o melhor desempenho em nenhum aspecto. Soluções não dominadas possuem no mínimo um objetivo melhor que outra solução e também no mínimo um objetivo pior. Caso não se tenha critério para a seleção, todas as soluções não dominadas serão apresentadas como soluções válidas. Para que a solução seja considerada não dominada ela deve obedecer às relações mostradas na Equação (4-1) e Equação (4-2), onde  $(\vec{x})$  e  $(\vec{y})$  são os vetores com os objetivos de duas solução que estão sendo comparadas,  $i$  e  $j$  especificam qual o objetivo dentro do vetor será comparado e  $k$  é o número total de objetivos [1].

$$f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{y}) \text{ para todos os índices } i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (4-1)$$

$$f_j(\vec{x}) < f_j(\vec{y}) \text{ para qualquer índice } j \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (4-2)$$

Na Figura (4-1) são mostradas as soluções dominadas e não dominadas juntamente com a fronteira ótima de Pareto para um exemplo onde o algoritmo de otimização tem a função de maximizar o objetivo 1 e minimizar o objetivo 2. Todas as soluções que se encontram sobre a linha vermelha são soluções não dominadas [1].

Figura 4-1 Fronteira ótima de Pareto



Fonte: [1].

## 4.2 ALGORITMO IMPLEMENTADO

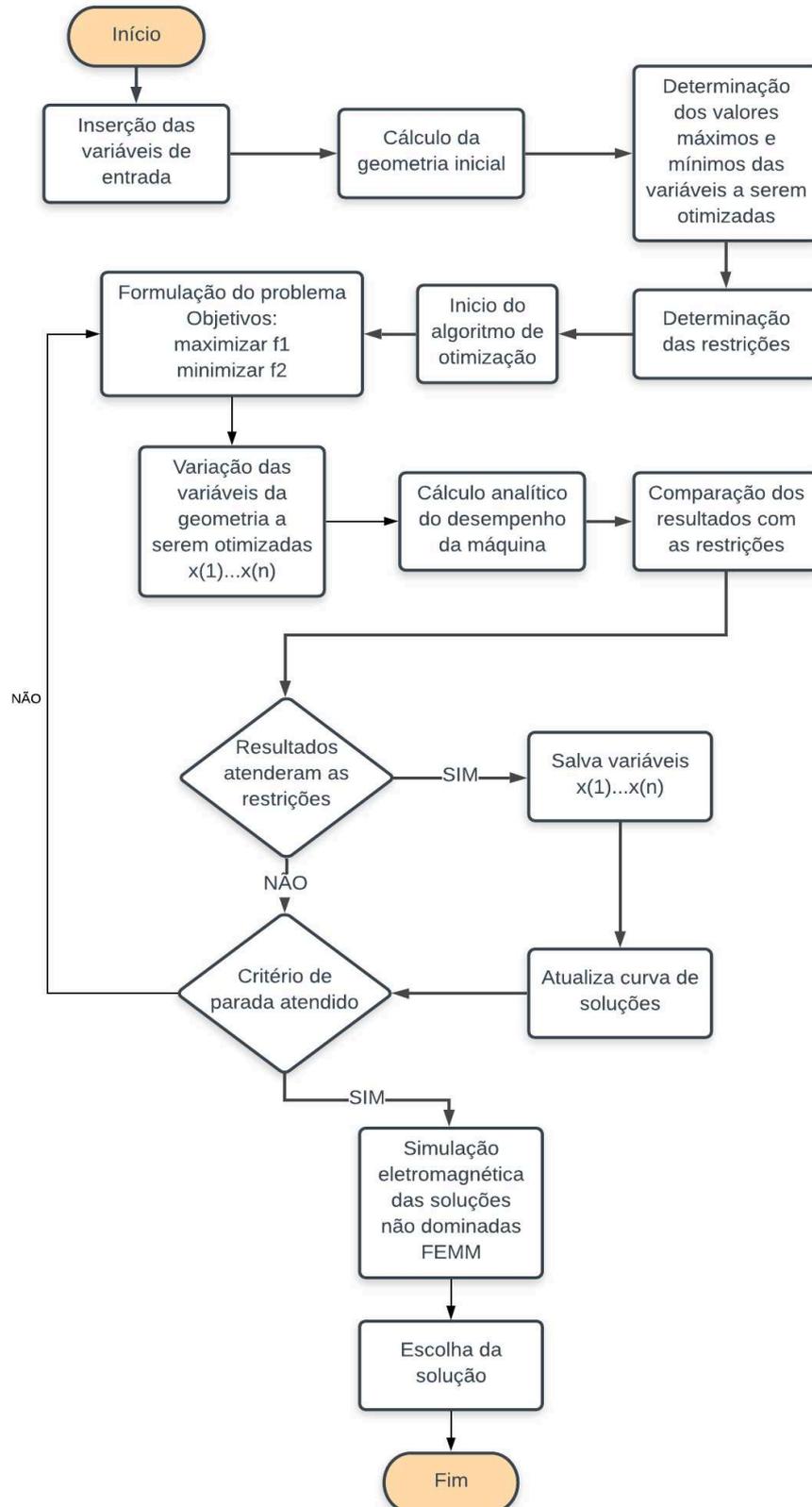
Os objetivos do trabalho são minimizar o FC apresentado na Equação (3-25), e maximizar o rendimento da máquina. No algoritmo foi optado por trabalhar com a maximização de ambos os objetivos, para isso foi alterado o sinal do fator custo ao final do cálculo.

Um algoritmo foi desenvolvido em linguagem Matlab, baseado em algoritmos genéticos multiobjetivos clássicos [20]. A sequência executada é apresentada no fluxograma da Figura (4-2). Inicialmente são inseridos pelos usuários os valores de potência, tensão, rotação e frequência da máquina. Com estas informações e as equações descritas no capítulo 2, o algoritmo calcula a geometria inicial. Após o cálculo da geometria são definidas as variáveis que serão otimizadas, seus limites máximos e mínimos e as restrições.

Conforme a Figura (4-2), o algoritmo de otimização inicia verificando a função objetivo e armazena os valores, a partir disso faz a variação da geometria aleatoriamente e calcula as variáveis de desempenho da máquina conforme capítulo 3. Caso as restrições sejam atendidas, o algoritmo salva as dimensões e os valores objetivos, atualiza a curva de soluções e verifica se os critérios de parada foram atendidos.

Portanto, se os critérios de parada não foram atendidos, o algoritmo analisa os valores objetivos obtidos na geração anterior e modifica as variáveis da geometria conforme a variação da função objetivo. Ao atingir um critério de parada, o algoritmo seleciona os resultados com melhor função de desempenho, os seleciona na curva de soluções não dominadas e salva as geometrias. As geometrias não dominadas são em seguida simuladas usando o método de elementos finitos para que seja feita a análise da distribuição dos campos na máquina.

Figura 4-2 Fluxograma das etapas do algoritmo desenvolvido



Fonte: O autor.

O problema tem um total de 18 variáveis de geometria que serão otimizadas. Inicialmente é feito o cálculo das dimensões da máquina em função dos dados de entrada conforme apresentado no capítulo 2. Com os valores de cálculo é atribuída uma porcentagem de variação para as variáveis, conforme apresentado na Tabela (4-1), estes serão os valores limites máximo e mínimo que cada variável poderá atingir. Neste trabalho foi utilizada uma taxa de variação em torno de 20% para mais e para menos para cada variável. Em alguns casos específicos como, altura dos condutores, entreferro e número de caminhos paralelos foi deixada uma faixa de variação maior devido às características da variável e considerações tomadas no início do dimensionamento.

Tabela 4-1 Variáveis da otimização

<b>Parâmetro</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Valor máximo</b>
Diâmetro externo estator	$D_{e1}$	1855 [mm]	2319 [mm]	2783 [mm]
Diâmetro externo rotor	$D$	1590 [mm]	1987 [mm]	2384 [mm]
Diâmetro eixo	$D_{i2}$	1140 [mm]	1425 [mm]	1710 [mm]
Comprimento do pacote	$L_1$	411 [mm]	514 [mm]	616 [mm]
Altura do corpo do polo	$h_{pk}$	70 [mm]	87 [mm]	105 [mm]
Altura da sapata do polo	$h_{sch}$	28 [mm]	35 [mm]	42 [mm]
Largura do corpo do polo	$b_{pko}$	123 [mm]	153 [mm]	184 [mm]
Largura da ranhura	$b_{01}$	12 [mm]	15 [mm]	18 [mm]
Altura da ranhura	$h_{n1}$	57 [mm]	72 [mm]	87 [mm]
Altura do condutor enrolamento estatórico	$h_{n11}$	1 [mm]	1 [mm]	10 [mm]
Largura do condutor enrolamento estatórico	$b_{n11}$	1 [mm]	1 [mm]	10 [mm]
Número de espiras por bobina	$Z_1$	1	4	10
Número de bobinas por polo e por fase	$q$	1	3	4
Número de caminhos paralelos estator	$N_{cp}$	1	1	6

Número de espiras por polo	$Z_{pol}$	10	150	300
Entreferro	$g_i$	2 [mm]	12 [mm]	18 [mm]
Altura do condutor enrolamento rotor	$h_{n12}$	1	1	10
Altura do condutor enrolamento rotor	$b_{n12}$	1	1	10

Fonte: O autor.

Após determinar os valores mínimos e máximos das variáveis é necessário estabelecer as restrições, ou, condições ao qual a solução pode ser considerada válida. Foram utilizadas um total de 8 restrições, que estão mostradas na Tabela (4-2). Para as restrições que levam em consideração a indução, se o resultado ficar maior que a restrição, o material irá apresentar maiores perdas e sairá da linearidade levada em consideração no cálculo. Assim os valores de campo magnético e corrente de excitação não condizem com a realidade, por outro lado. Caso a indução ficar menor que a restrição o material estará sendo subutilizado gerando maior custo e menor aproveitamento. A reatância síncrona está diretamente ligada com a resposta transiente da máquina. Valores de reatância maiores que o valor máximo da restrição fazem com que o sistema de regulação da máquina seja mais robusto em caso de transientes, caso os valores sejam menores que o mínimo, a quantidade de fluxo magnético concatenado pelas bobinas do estator será baixo, resultando em um baixo aproveitamento do material [12]. Quanto maior a densidade de corrente no condutor, maior será a temperatura de trabalho e as perdas por efeito joule, caso a densidade de corrente fique menor que o valor mínimo será sinal que o condutor está sendo subutilizado.

Tabela 4-2 Restrições

Parâmetro	Sigla	Valor mínimo	Valor máximo
Indução no entreferro	$B_{gi}$	0,6 [T]	0,85 [T]
Indução no dente do estator	$B_{d1}$	1,2 [T]	1,45 [T]
Indução na coroa do estator	$B_{c1}$	1,2 [T]	1,55 [T]

Indução no corpo do polo	$B_{pol}$	1 [T]	1,5 [T]
Indução na coroa do rotor	$B_{c2}$	0,6 [T]	1,45 [T]
Reatância síncrona de eixo direto	$x_d$	0,8 [pu]	1,6 [pu]
Densidade de corrente estator	$A_{in1}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]
Densidade de corrente rotor	$A_{in2}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]

---

Fonte: O autor.

A partir da geometria obtida no capítulo 2, do cálculo analítico desenvolvido no capítulo 3, da elaboração de um algoritmo genético multiobjetivo, da definição da variação da geometria como variável de entrada e das restrições no capítulo 4, é executado o algoritmo para a obtenção das geometrias otimizadas levando em consideração o rendimento da máquina e o fator custo.

## 5 VALIDAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A validação do trabalho foi realizada em duas etapas. Inicialmente foi validado o cálculo analítico comparando os valores de indução magnética e fluxo magnético no entreferro com um software de elementos finitos. Para a análise foi utilizado o programa FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), programa gratuito e disponível para *download* no site (<http://www.femm.info/wiki/HomePage>). Foi optado pela utilização deste software devido aos estudos já realizados e pela possibilidade de comunicação direta entre o mesmo e o Matlab.

Na segunda etapa são analisados os resultados apresentados pelo algoritmo de otimização. Devido à otimização ter sido feita com um algoritmo multiobjetivo, o resultado apresenta um conjunto de soluções possíveis que se enquadram dentro das restrições propostas, esse conjunto de soluções é analisado e comparado com os valores obtidos na primeira etapa do dimensionamento.

### 5.1 VALIDAÇÃO DO CÁLCULO ANALÍTICO

Com as geometrias iniciais definidas e os indicadores de desempenho calculados, é realizada a validação do cálculo analítico com a comparação dos resultados de indução e fluxo obtidos com simulação utilizando o programa FEMM. Na Tabela (5-1) são mostradas as variáveis de desempenho utilizadas para a comparação e os valores obtidos na simulação. Para a obtenção dos valores de indução na simulação, foi traçada uma linha transversal ao fluxo na seção de interesse. Devido ao cálculo analítico levar em consideração um valor médio da indução, foi admitido como aceitável uma variação de até 10% na comparação dos resultados.

Tabela 5-1 Comparação do cálculo analítico com o numérico.

<b>Parâmetro</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>Valor simulado</b>	<b>Diferença [%]</b>
Indução no entreferro	$B_{gi}$	0,5914 [T]	0,6111 [T]	3,33
Indução no dente do estator	$B_{d1}$	0,8123 [T]	0,801 [T]	-1,39

Indução na coroa do estator	$B_{c1}$	0,8270	0,7991	-3,37
Indução no corpo do polo	$B_{pol}$	1,10	1,08	-1,818
Indução na coroa do rotor	$B_{c2}$	0,5288	0,55	4,01
Fluxo máximo por polo no entreferro	$\phi$	0,087	0,085	-2,29

---

Fonte: O autor.

Os valores mantiveram-se dentro da faixa de variação estipulada como aceitável. A maior variação aconteceu na coroa do rotor da máquina. Os valores da simulação foram obtidos por meio da integral do fluxo magnético na seção transversal a linha.

### 5.1.1 Cálculo de Campos

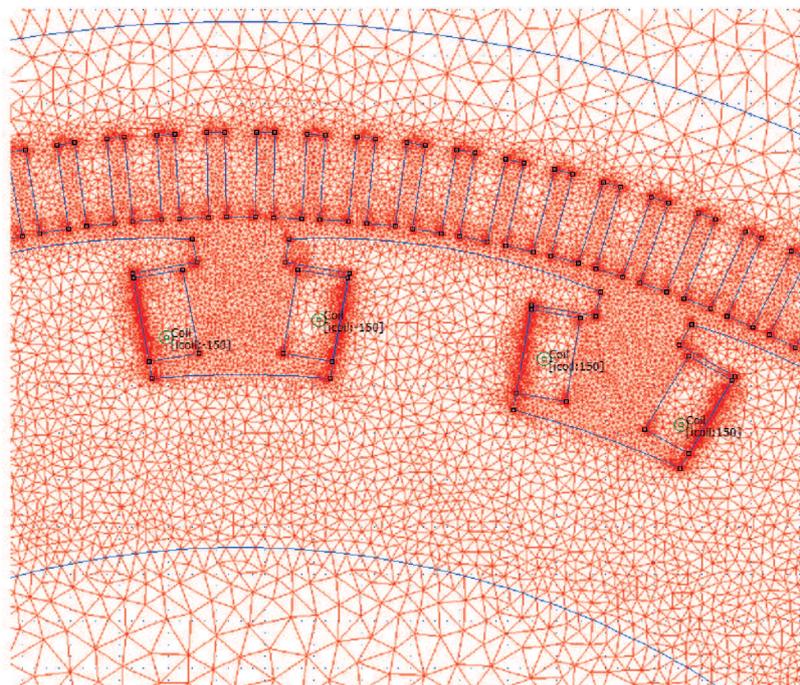
O cálculo de campos foi realizado por meio do programa FEMM, cujo código encontra-se no Apêndice 4.

Como condição de contorno, foi aplicada uma caixa de ar quadrada fora do gerador, na borda desta caixa foi aplicado o vetor potencial magnético nulo no segmento. Foram utilizados elementos de malha menores no entreferro, a malha de um corte do gerador é mostrada na Figura (5-1).

Como o programa foi escrito de forma a gerar o desenho automaticamente, não foi possível aplicar as condições de periodicidade para se trabalhar com seções menores da máquina para a simulação.

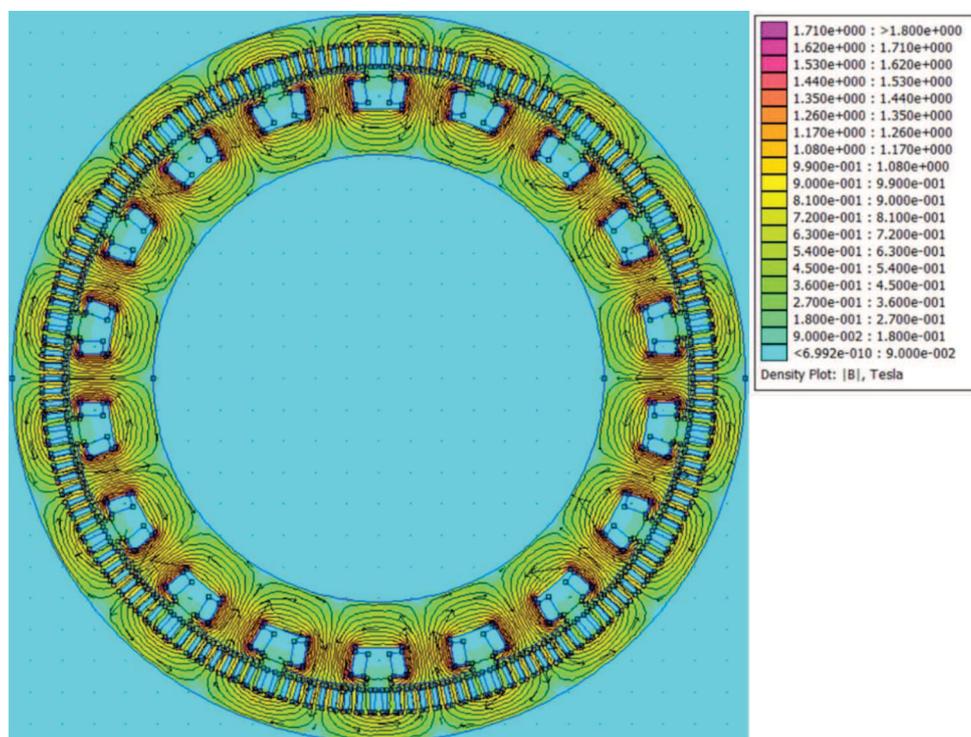
Na Figura (5-2) são mostradas as induções magnéticas encontradas na simulação do gerador. Essa imagem ilustra a distribuição de indução e os valores médios são os mostrados na Tabela (5-1).

Figura 5-1 Malha de elementos finitos aplicada ao problema.



Fonte: O autor.

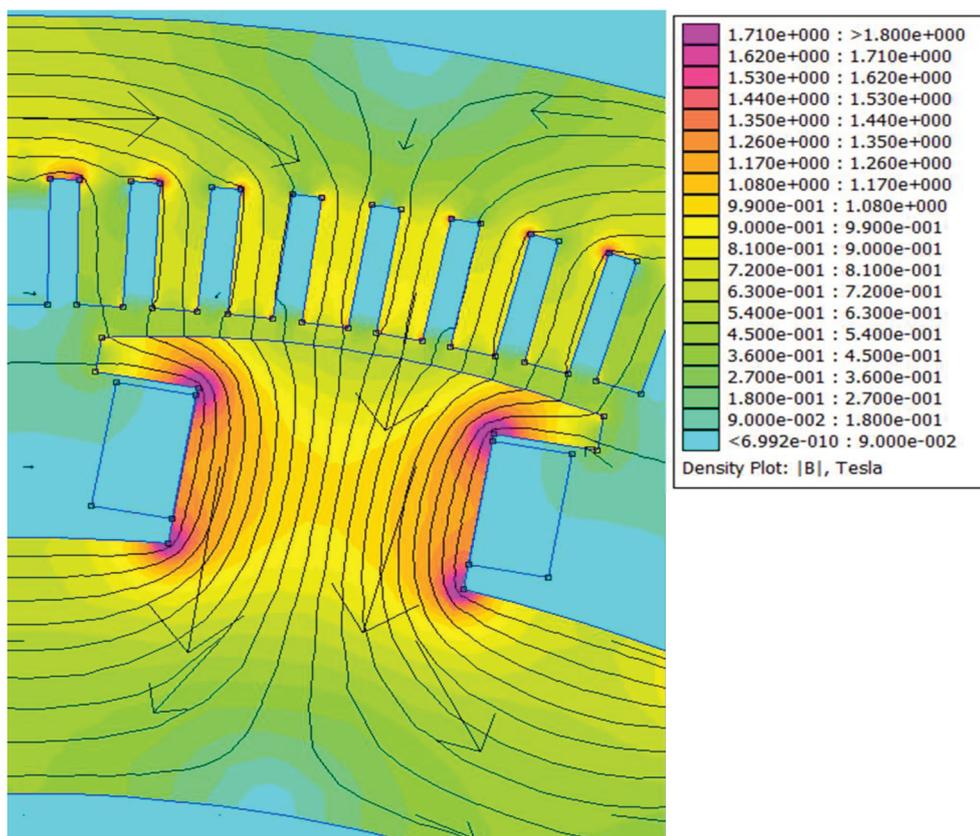
Figura 5-2 Distribuição da indução no gerador.



Fonte: O autor.

Para melhor visualização das induções, dos vetores indicando a direção do fluxo magnético, das linhas equipotenciais de fluxo e do valor do fluxo magnético no centro do polo é apresentada a Figura 5-3

Figura 5-3 Detalhe das induções, vetores, linhas equipotenciais e fluxo magnético no polo.



Fonte: O autor.

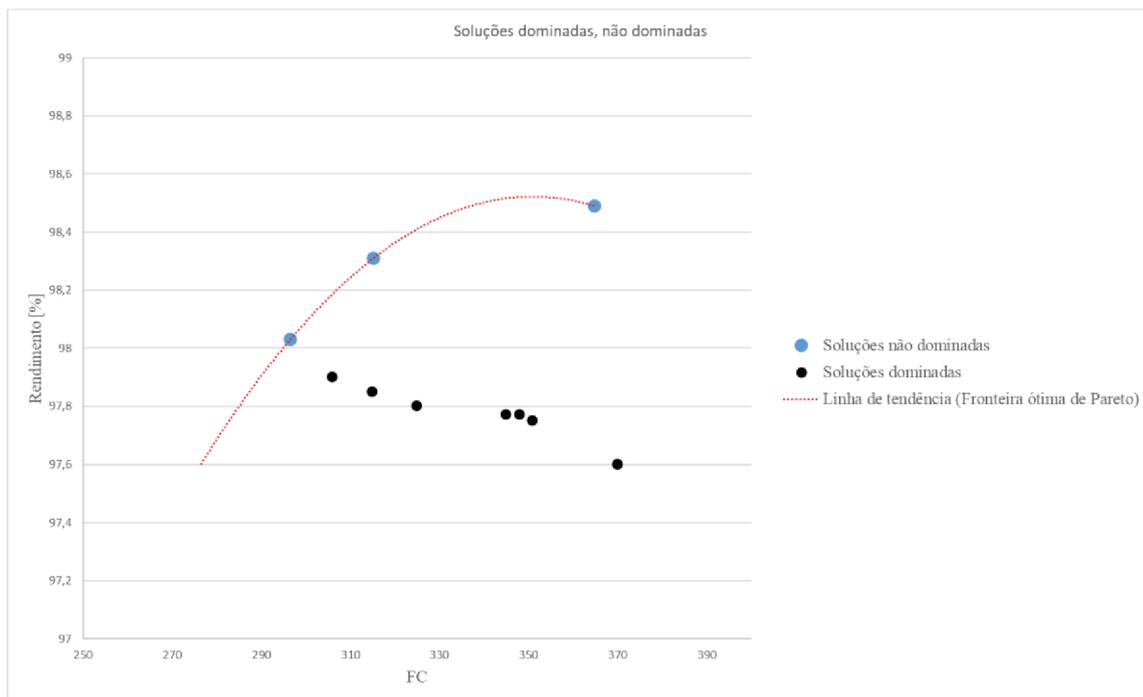
Após a apresentação dos resultados e da validação do cálculo analítico são mostrados na próxima seção os resultados do algoritmo de otimização.

## 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS APRESENTADOS PELO ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O algoritmo de otimização possui como critério de parada o número de gerações, foram utilizadas 15000 gerações para determinar as geometrias ótimas não dominadas a seguir. Durante a execução do algoritmo foram encontradas 10 soluções que se apresentaram adequadas às restrições impostas e dentre estas, 3 soluções foram

determinadas como soluções não dominadas. Na Figura (5-4) são mostradas todas as soluções encontradas após a execução do algoritmo genético, os círculos em preto são as soluções dominadas e os círculos azuis são as soluções não dominadas, em vermelho também é mostrada a fronteira ótima de Pareto que mostra a tendência dos resultados das soluções não dominadas.

Figura 5-4 Soluções dominadas e não dominadas



Fonte: O autor.

As soluções não dominadas são consideradas como resultados do algoritmo de otimização, desta forma as três soluções são apresentadas a seguir.

### 5.2.1 Solução 1

Na Tabela (5-2) são mostradas as geometrias encontradas para a primeira solução. Nesta tabela é feita a comparação entre a dimensão calculada no capítulo 2 e a encontrada na otimização.

Tabela 5-2 Geometria inicial *versus* geometria da solução 1

<b>Parâmetro</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor calculado antes da otimização</b>	<b>Valor encontrado após a otimização</b>
Diâmetro externo estator	$D_{e1}$	2319 [mm]	2237 [mm]
Diâmetro externo rotor	$D$	1987 [mm]	1916 [mm]
Diâmetro eixo	$D_{i2}$	1425 [mm]	1557 [mm]
Comprimento do pacote	$L_1$	514 [mm]	527 [mm]
Altura do corpo do polo	$h_{pk}$	87 [mm]	77 [mm]
Altura da sapata do polo	$h_{sch}$	35 [mm]	30 [mm]
Largura do corpo do polo	$b_{pko}$	153 [mm]	165 [mm]
Largura da ranhura	$b_{01}$	15 [mm]	12 [mm]
Altura da ranhura	$h_{n1}$	72 [mm]	80 [mm]
Altura do condutor enrolamento estatórico	$h_{n11}$	1 [mm]	8 [mm]
Largura do condutor enrolamento estatórico	$b_{n11}$	1 [mm]	3 [mm]
Número de espiras por bobina	$Z_1$	4	5
Número de bobinas por polo e por fase	$q$	3	4
Número de caminhos paralelos estator	$N_{cp}$	1	3
Número de espiras por polo	$Z_{pol}$	150	173
Entreferro	$g_i$	12 [mm]	7 [mm]
Altura do condutor enrolamento rotor	$h_{n12}$	1	3
Altura do condutor enrolamento rotor	$b_{n12}$	1	4

Fonte: O autor.

A geometria variou dentro da faixa estipulada na Tabela (4-1), e os resultados de desempenho alcançados pelo cálculo analítico são mostrados na Tabela (5-3), nela também são mostrados os valores antes da otimização.

Tabela 5-3 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial *versus* a geometria encontrada na solução 1.

<b>Sigla</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor encontrado antes da otimização</b>	<b>Valor encontrado após a otimização</b>
$R_{end}$	Objetivo	Objetivo	51,81 [%]	98,03 [%]
$FC$	Objetivo	Objetivo	240,61	296,509
$B_{gi}$	0,6 [T]	0,85 [T]	0,6292 [T]	0,7823 [T]
$B_{d1}$	1,2 [T]	1,45 [T]	0,8049 [T]	1,41 [T]
$B_{c1}$	1,2 [T]	1,55 [T]	0,8091 [T]	1,54 [T]
$B_{pol}$	1 [T]	1,55 [T]	1,046 [T]	1,511 [T]
$B_{c2}$	0,6 [T]	1,45 [T]	0,5152 [T]	1,44 [T]
$x_d$	0,8 [pu]	1,6 [pu]	3,77 [pu]	1,53 [pu]
$A_{in1}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	4,5 [A/mm <sup>2</sup> ]
$A_{in2}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	4,46 [A/mm <sup>2</sup> ]

Fonte: O autor.

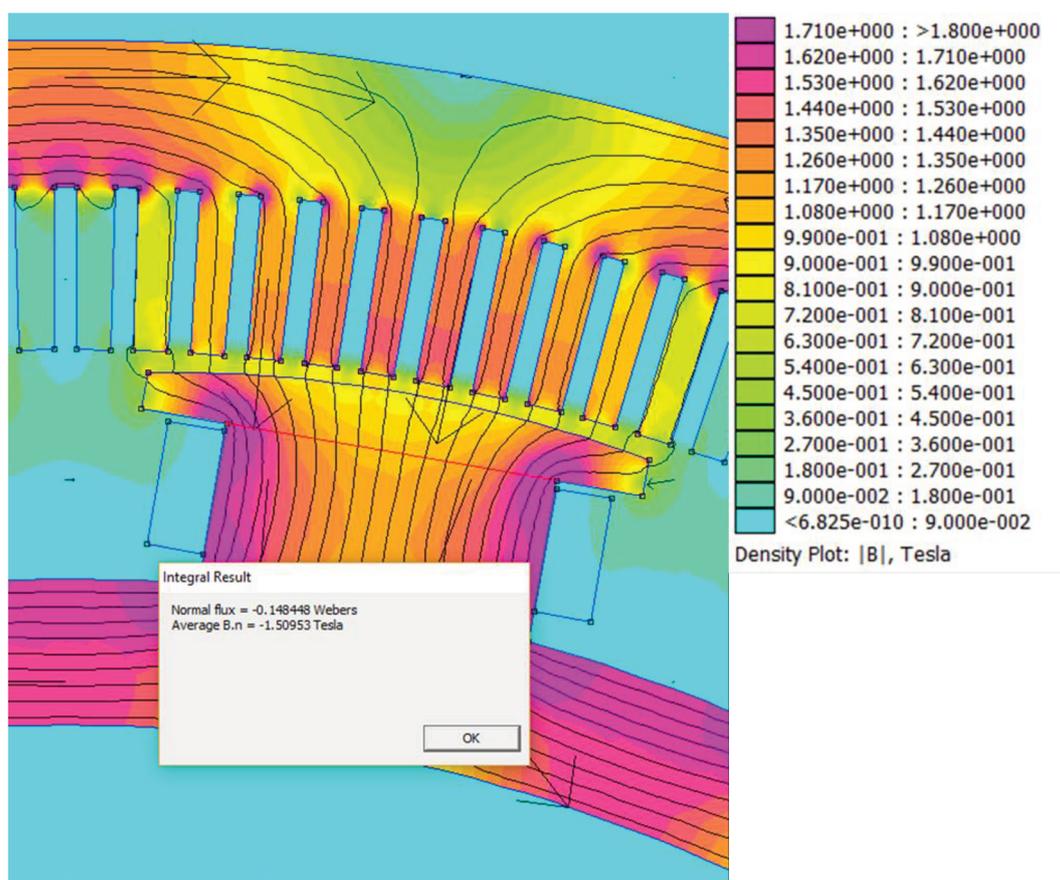
Os valores apresentados na Tabela (5-3) encontrados após a otimização mostram que as variáveis de desempenho ficaram dentro dos valores máximo e mínimo regidos pelas restrições impostas.

Quando comparados os objetivos, o rendimento da máquina antes da otimização leva em consideração os enrolamentos do rotor e do estator com condutores com área igual a 1 mm<sup>2</sup>, como dito no capítulo 2, os enrolamentos são redimensionados durante a otimização. Desta forma, a espessura do condutor juntamente com a quantidade de caminhos paralelos e demais dados do enrolamento foram modificados, isso justifica o aumento do rendimento e também do FC. Com a densidade de corrente adequada por meio das restrições, a máquina teve menos perdas elétricas nos enrolamentos e apresentou

melhoria no rendimento passando de 51,81 % para 98,03%. O aumento do cobre dos enrolamentos também fez com que o FC aumentasse de 240,61 para 296,509.

Na Figura (5-5) é mostrada a distribuição da indução magnética assim como a indução média no corpo de um polo.

Figura 5-5 Induções, vetores, linhas equipotenciais e fluxo magnético em um polo do GSPS otimizado na solução 1.



Fonte: O autor.

Na Figura (5-5) é mostrado um corte no polo do gerador e o valor médio da indução magnética que quando comparado com o valor obtido analiticamente na Tabela (5-3) observa-se que a diferença ficou menor que 2%. Após apresentar os dados da primeira simulação e da comparação com a geometria encontrada no primeiro dimensionamento, é apresentada a segunda solução.

### 5.2.2 Solução 2

A geometria encontrada na solução 2 é mostrada na Tabela (5-4).

Tabela 5-4 Geometria inicial *versus* geometria da solução 2.

Parâmetro	Sigla	Valor calculado antes da otimização	Valor encontrado após a otimização
Diâmetro externo estator	$D_{e1}$	2319 [mm]	2312 [mm]
Diâmetro externo rotor	$D$	1987 [mm]	1916 [mm]
Diâmetro eixo	$D_{i2}$	1425 [mm]	1557 [mm]
Comprimento do pacote	$L_1$	514 [mm]	527 [mm]
Altura do corpo do polo	$h_{pk}$	87 [mm]	77 [mm]
Altura da sapata do polo	$h_{sch}$	35 [mm]	30 [mm]
Largura do corpo do polo	$b_{pko}$	153 [mm]	165 [mm]
Largura da ranhura	$b_{01}$	15 [mm]	12 [mm]
Altura da ranhura	$h_{n1}$	72 [mm]	90 [mm]
Altura do condutor enrolamento estatórico	$h_{n11}$	1 [mm]	10 [mm]
Largura do condutor enrolamento estatórico	$b_{n11}$	1 [mm]	4 [mm]
Número de espiras por bobina	$Z_1$	4	5
Número de bobinas por polo e por fase	$q$	3	4
Número de caminhos paralelos estator	$N_{cp}$	1	3
Número de espiras por polo	$Z_{pol}$	150	247
Entreferro	$g_i$	12 [mm]	7 [mm]

Altura do condutor enrolamento rotor	$h_{n12}$	1	3
Altura do condutor enrolamento rotor	$b_{n12}$	1	4

Fonte: O autor.

Na Tabela (5-5) são mostrados os valores das variáveis de desempenho comparando a segunda solução com a máquina calculada no capítulo 2.

Tabela 5-5 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial *versus* a geometria encontrada na solução 2.

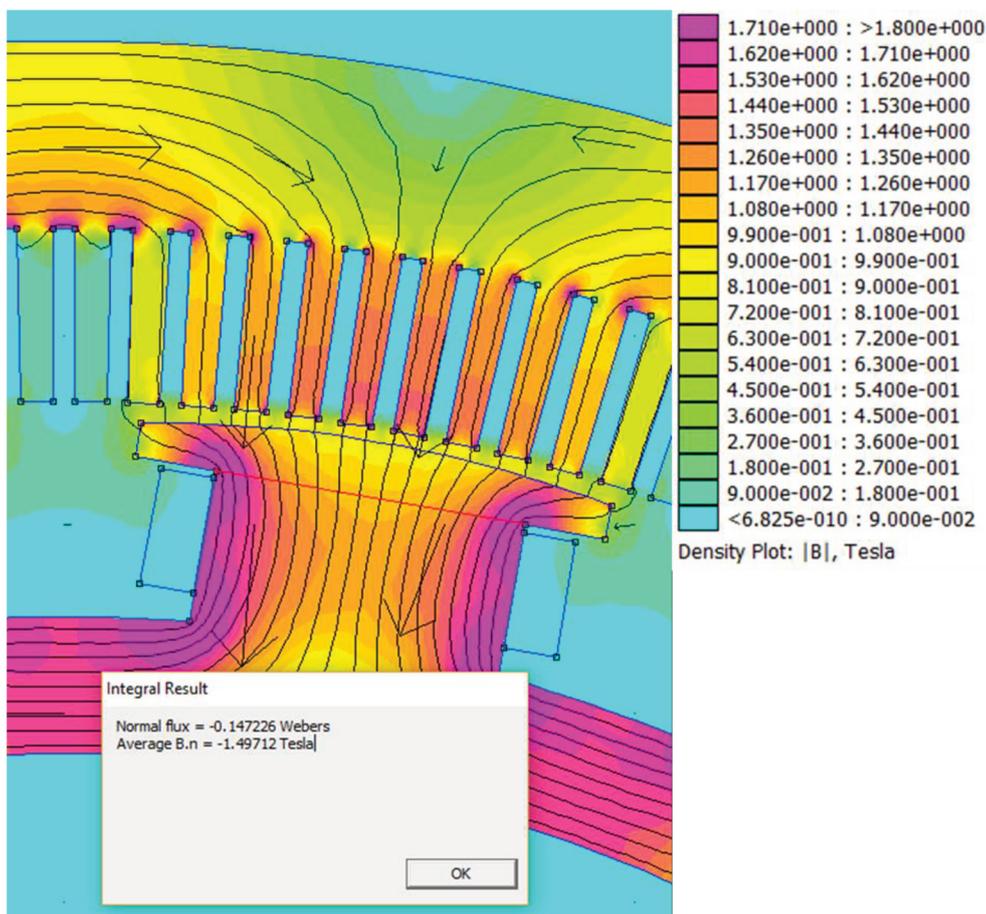
<b>Sigla</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor encontrado antes da otimização</b>	<b>Valor encontrado após a otimização</b>
$R_{end}$	Objetivo	Objetivo	51,81 [%]	98,49 [%]
$FC$	Objetivo	Objetivo	240,61	364,84
$B_{gi}$	0,6 [T]	0,85 [T]	0,6292 [T]	0,7823 [T]
$B_{d1}$	1,2 [T]	1,45 [T]	0,8049 [T]	1,413 [T]
$B_{c1}$	1,2 [T]	1,55 [T]	0,8091 [T]	1,21 [T]
$B_{pol}$	1 [T]	1,55 [T]	1,046 [T]	1,509 [T]
$B_{c2}$	0,6 [T]	1,45 [T]	0,5152 [T]	1,44 [T]
$x_d$	0,8 [pu]	1,6 [pu]	3,77 [pu]	1,54 [pu]
$A_{in1}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	3,38 [A/mm <sup>2</sup> ]
$A_{in2}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	3,14 [A/mm <sup>2</sup> ]

Fonte: O autor.

Os resultados apresentados pela segunda solução mostram as mesmas características dos resultados da simulação 1 quando comparado com o dimensionamento realizado no capítulo 2, onde o rendimento teve melhora devido ao dimensionamento adequado dos enrolamentos do estator e do rotor. Desta forma, o fator custo também aumentou para adequar os valores de densidade de corrente com os estipulados nas restrições.

Na Figura (5-6) é mostrada a distribuição da indução magnética no gerador. Também é mostrada a linha onde foi calculada a indução média na seção e o fluxo normal à linha.

Figura 5-6 Induções, vetores, linhas equipotenciais e fluxo magnético no polo do GSPS otimizado na solução 2.



Fonte: O autor.

A diferença do valor do fluxo médio no polo mostrado na Figura (5-7) quando comparado com o apresentado pelo cálculo analítico ficou em torno de 2 %. Após analisadas as induções, são mostrados os valores obtidos na solução 3.

### 5.2.3 Solução 3

Na terceira solução a geometria encontrada é mostrada na Tabela (5-6).

Tabela 5-6 Geometria inicial *versus* geometria da solução 3.

<b>Parâmetro</b>	<b>Sigla</b>	<b>Valor calculado antes da otimização</b>	<b>Valor encontrado após a otimização</b>
Diâmetro externo estator	$D_{e1}$	2319 [mm]	2237 [mm]
Diâmetro externo rotor	$D$	1987 [mm]	1916 [mm]
Diâmetro eixo	$D_{i2}$	1425 [mm]	1557 [mm]
Comprimento do pacote	$L_1$	514 [mm]	527 [mm]
Altura do corpo do polo	$h_{pk}$	87 [mm]	77 [mm]
Altura da sapata do polo	$h_{sch}$	35 [mm]	30 [mm]
Largura do corpo do polo	$b_{pko}$	153 [mm]	165 [mm]
Largura da ranhura	$b_{01}$	15 [mm]	12 [mm]
Altura da ranhura	$h_{n1}$	72 [mm]	78 [mm]
Altura do condutor enrolamento estatórico	$h_{n11}$	1 [mm]	6 [mm]
Largura do condutor enrolamento estatórico	$b_{n11}$	1 [mm]	6 [mm]
Número de espiras por bobina	$Z_1$	4	5
Número de bobinas por polo e por fase	$q$	3	4
Número de caminhos paralelos estator	$N_{cp}$	1	3
Número de espiras por polo	$Z_{pol}$	150	213
Entreferro	$g_i$	12 [mm]	7 [mm]
Altura do condutor enrolamento rotor	$h_{n12}$	1	3
Altura do condutor enrolamento rotor	$b_{n12}$	1	4

Fonte: O autor.

Na Tabela (5-7) são mostrados os valores das variáveis de desempenho em comparação da terceira solução com a máquina calculada no capítulo 2.

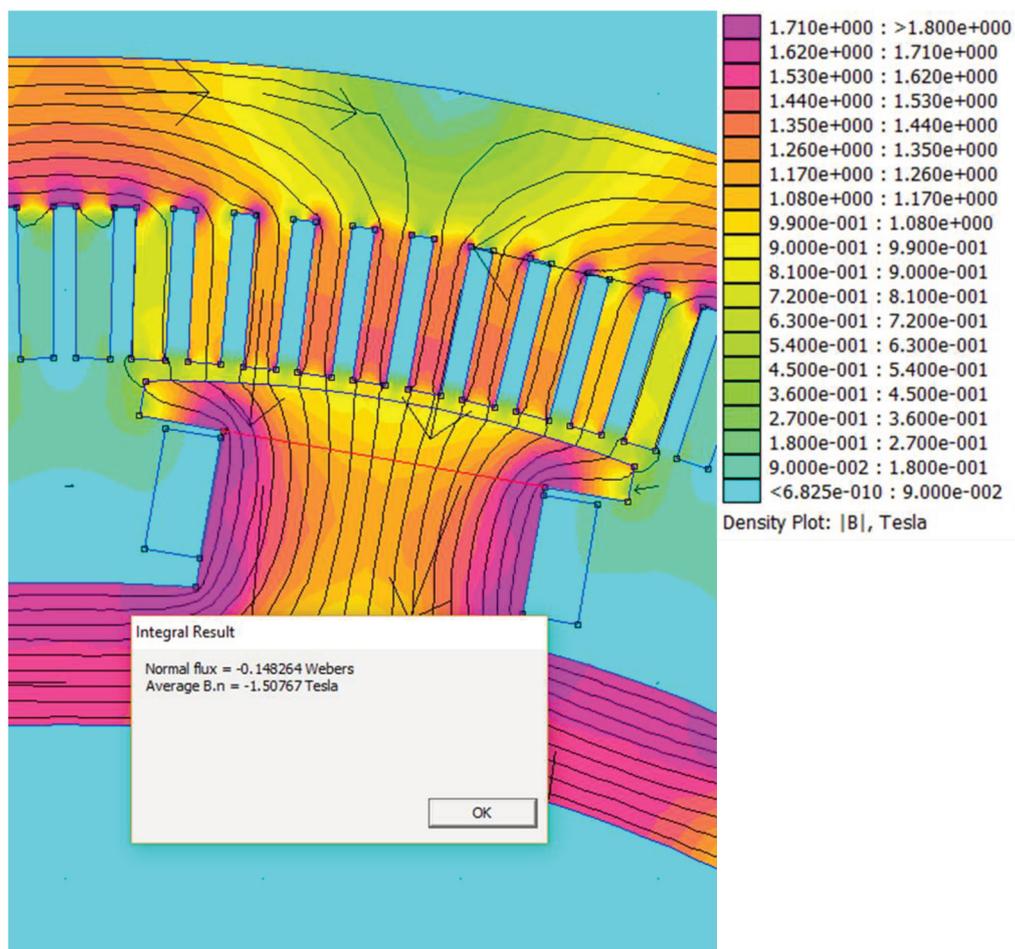
Tabela 5-7 Comparação entre os valores das variáveis objetivo e de desempenho do GSPS da geometria inicial *versus* a geometria encontrada na solução 3.

<b>Sigla</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor encontrado antes da otimização</b>	<b>Valor encontrado após a otimização</b>
$R_{end}$	Objetivo	Objetivo	51,81 [%]	98,31 [%]
$FC$	Objetivo	Objetivo	240,61	315,2
$B_{gi}$	0,6 [T]	0,85 [T]	0,6292 [T]	0,7823 [T]
$B_{d1}$	1,2 [T]	1,45 [T]	0,8049 [T]	1,413 [T]
$B_{c1}$	1,2 [T]	1,55 [T]	0,8091 [T]	1,54 [T]
$B_{pol}$	1 [T]	1,55 [T]	1,046 [T]	1,51 [T]
$B_{c2}$	0,6 [T]	1,45 [T]	0,5152 [T]	1,44 [T]
$x_d$	0,8 [pu]	1,6 [pu]	3,77 [pu]	1,54 [pu]
$A_{in1}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	3,75 [A/mm <sup>2</sup> ]
$A_{in2}$	3 [A/mm <sup>2</sup> ]	5 [A/mm <sup>2</sup> ]	--	3,62 [A/mm <sup>2</sup> ]

Fonte: O autor.

Assim como na solução 1 e 2, os resultados da terceira solução apresentaram melhora no rendimento e aumento do  $FC$ . Na Figura (5-7) é mostrada a distribuição da indução para a terceira solução. Ao fim da apresentação dos resultados das soluções não dominadas, é feita a comparação entre elas. A decisão de qual solução é melhor depende de critérios estabelecidos, se a prioridade for rendimento, a solução 2 possui o melhor rendimento dentre as 3. Caso se queira um menor custo, a solução 1 possui o menor  $FC$ . Por fim, a solução 3 é a que possui o rendimento e o  $FC$  médio da comparação.

Figura 5-7 Induções, vetores, linhas equipotenciais e fluxo magnético no polo do GSPS otimizado na solução 3.



Fonte: O autor.

### 5.2.4 Comparação entre soluções

Como o algoritmo de otimização possui dois objetivos, a solução não converge para um ponto ótimo e sim para um conjunto de soluções. Dentre o conjunto de soluções são separadas as soluções com melhor desempenho, ou que dominam as demais soluções. Devido a isso, foram apresentadas neste capítulo três soluções não dominadas e feita as comparações entre elas. Como o algoritmo não apresenta uma única solução ótima, caberá ao usuário definir qual será a solução mais adequada. Para melhor comparar os resultados, na Tabela (5-8) são apresentados os valores das variáveis de desempenho.

Tabela 5-8 Comparação das soluções não dominadas

<b>Sigla</b>	<b>Solução 1</b>	<b>Solução 2</b>	<b>Solução 3</b>
$R_{end}$	98,03 [%]	98,49 [%]	98,31 [%]
$FC$	296,509	364,84	315,2
$B_{gi}$	0,7823 [T]	0,7823 [T]	0,7823 [T]
$B_{d1}$	1,41 [T]	1,413 [T]	1,413 [T]
$B_{c1}$	1,54 [T]	1,21 [T]	1,54 [T]
$B_{pol}$	1,51 [T]	1,50 [T]	1,51 [T]
$B_{c2}$	1,44 [T]	1,44 [T]	1,44 [T]
$x_d$	1,53 [pu]	1,54 [pu]	1,54 [pu]
$A_{in1}$	4,5 [A/mm <sup>2</sup> ]	3,38 [A/mm <sup>2</sup> ]	3,75 [A/mm <sup>2</sup> ]
$A_{in2}$	4,46 [A/mm <sup>2</sup> ]	3,14 [A/mm <sup>2</sup> ]	3,62 [A/mm <sup>2</sup> ]

Fonte: O autor.

Com os dados apresentados na Tabela (5-8) pode-se observar a semelhança nas induções apresentadas nas três soluções. Fica nítido nas informações que a principal contribuição no rendimento e no fator custo é a quantidade de cobre colocada nos enrolamentos da máquina. Com as induções praticamente idênticas, as perdas devido à variação do fluxo magnético no ferro são parecidas nas simulações, possuindo uma leve diminuição na solução 2 devida à indução na coroa do estator ser menor.

A maior densidade de corrente no estator ( $A_{in1}$ ) e no rotor ( $A_{in2}$ ) da solução 1, correspondem diretamente no menor  $FC$  e no menor rendimento das três soluções. O limite estipulado como restrição foi 5 A/mm<sup>2</sup>, a solução 1 apresentou resposta próxima à restrição.

O algoritmo apresentou resultados dentro do esperado, porém como o único critério de parada para o algoritmo implementado é o número de gerações, pode-se inferir que outras soluções possíveis poderiam ser obtidas. Ao analisar as restrições impostas e as respostas obtidas na Tabela (5-8) pode-se concluir que é possível diminuir o volume de cobre empregado e chegar em valores mais próximos dos limites, elevando os valores de densidade de corrente. Para isso, é necessário estabelecer critérios diferentes para a parada do algoritmo, apresentando assim uma maior gama de soluções não dominadas.

## 6 CONCLUSÃO

Os objetivos deste trabalho foram levantar o estado da arte sobre geradores síncronos e métodos analíticos de dimensionamento, realizar a modelagem analítica de um gerador síncrono de polos salientes, definir um método de otimização e otimizar a máquina. Por fim, o projeto otimizado foi validado por meio de um método de cálculo de campos.

Para a validação das equações de cálculo encontradas na literatura foi utilizado o Método de Elementos Finitos. O método de elementos finitos discretiza a geometria e aplica as equações físicas em todos os elementos da malha, fazendo com que a precisão da solução dependa da quantidade de elementos no domínio. Neste trabalho, o Método de Elementos Finitos teve a função de validar o cálculo analítico e por fim apresentar as soluções não dominadas mostradas pelo algoritmo de otimização.

As equações encontradas na literatura e utilizadas para o dimensionamento clássico da máquina, apresentadas no capítulo 2, são equações analíticas e levam em consideração vários fatores empíricos que muitas vezes se encontram em amplas faixas de variação. Isto faz com que a utilização de ferramentas de otimização se torne importante na busca da melhor geometria possível, reduzindo o tempo de projeto e cálculo.

A principal motivação deste trabalho foi a criação de uma ferramenta auxiliar de projeto de geradores síncronos de polos salientes, com aplicação de conceitos de otimização, que se tornasse base para aperfeiçoamento de produto, mostrando novos caminhos para equipes projetistas de geradores.

Com a utilização de dezoito variáveis, oito restrições e dois objetivos, o algoritmo de otimização apresentou respostas promissoras, porém deve-se estudar maneiras de melhor definir o critério de parada. Neste trabalho foram utilizadas boa parte das variáveis geométricas do gerador para a otimização com variação global. Como algoritmos genéticos trabalham com a formação da população inicial randomicamente, todas as dezoito variáveis são modificadas juntas e o algoritmo só consegue agir de forma ordenada quando encontrar a primeira solução.

O cálculo analítico também se mostrou promissor. A variação das induções quando comparadas ao método numérico obtiveram variação menor que 5 %. Porém, para

que ele possa apresentar respostas com maior fidelidade de resultados, que abranjam melhor a forma construtiva real da máquina, é necessária a inclusão das barras de amortecimento nos polos do rotor, realizar o cálculo da distorção harmônica e introduzir a modelagem do efeito pelicular nos condutores da armadura.

## 6.1 MELHORIAS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos que precisam de melhoria foram identificados e são sugeridos a seguir.

### 6.1.1 Introdução das barras de amortecimento nos polos do rotor

Durante a determinação da geometria dos polos não foram consideradas as barras do enrolamento de amortecimento. As barras influenciam na reatância do gerador e tem papel importante em minimizar transitórios mecânicos.

### 6.1.2 Cálculo da distorção harmônica total produzida no enrolamento estático

A distorção harmônica total (THD- Total Harmonic Distortion), é uma restrição de projeto e seus níveis são regidos por norma. Seu cálculo, bem como a introdução da variável durante a otimização são de extrema importância para validar a ferramenta.

### 6.1.3 Cálculo do efeito pelicular e suas consequências na resistência do enrolamento estático

Durante o cálculo da resistência estática, o aumento da resistência devido ao efeito pelicular foi negligenciado. Este fator deve ser abordado para melhor calcular o desempenho do gerador.

### 6.1.4 Introdução de novos critérios de parada para o algoritmo genético

O único critério de parada utilizado pelo algoritmo é o número de gerações. Independentemente da resposta, o algoritmo para somente quando o número de gerações

chega ao valor informado pelo usuário. Desta forma, deve-se estudar critérios que identifiquem quando o algoritmo alcançou a melhor solução.

## REFERÊNCIAS

- [1] AVILA, Sergio Luciano. **Otimização Multiobjetivo e Análise de Sensibilidade Para Concepção de Dispositivos**. 159 p. Tese (Doutorado) – UFSC, 2006.
- [2] AKEMI, P. I. **Introdução aos Algoritmos Genéticos**. Universidade de São Paulo (USP). 2009. < <https://www.ime.usp.br/~gold/cursos/2009/mac5758/PatriciaGenetico.pdf> >. Acesso em 08/05/2019.
- [3] BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. 3. ed. Florianópolis SC: Editora UFSC, 2012.
- [4] BATISTELA, J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício**. 227 p. Tese (Doutorado) – UFSC 2001.
- [5] BAZZO, Thiago de Paula Machado. **Projeto Ótimo Multidisciplinar de Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes Para Aerogeradores Considerando a Curva de Ocorrência do Vento**. 321 p. Tese (Doutorado) —UFSC, 2017.
- [6] BERTOTTI, G. Physical Interpretation of Eddy Current Losses in Ferromagnetic Materials. I. Theoretical considerations. *J. Appl. Phys.*, v. 57, n. 6, p. 2110 – 2126, 1985.
- [7] BOLDEA, Ion; TUTELEA, Lucian. **Electric machines : steady state, transients, and design with MATLAB**. 1. ed. New York: CRC Press, 2010. 800 p.
- [8] BOLDEA, I. **Synchronous Generators**. Second. ed. London: CRC Press, 2016. 487p.
- [9] BRANKE, Jurgen; DEB, Kalyanmoy; MIETTINEN, Kaisa; SLOWINSK, Roman. **Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches**. 1. ed. Germany: Springer, 2008. 481p.

- [10] CARCASI, Diodomiro Baldomero Luque. **Uma contribuição ao estudo, projeto eletromagnético e determinação de parâmetros operacionais de geradores síncronos trifásicos de polos salientes usando o método dos elementos finitos**. 225 p. Tese (Doutorado) —Unicamp, 2012.
- [11] CARES, Cristhian Marcelo Becker. **Projeto eletromagnético ótimo de gerador síncrono de ímãs permanentes para aplicações com dispositivos com ondas de mar**. 119 p. Dissertação (Mestrado) - UFSC, 2016
- [12] CARVALHO, Elissa Soares de. **Projeto e Otimização de Um Gerador Síncrono de Polos Lisos**. 71 p. Dissertação (Mestrado) - UFSC. 2011
- [13] CARLSON, R.; WURTZ, F. Optimal design of a set permanent magnet generators with the same cross-section. **In: 15°. SBMO. Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 10°. CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2012)**, 2012, João Pessoa/Paraíba. Anais de Congresso, 2012. v. 1. p. 1-6.
- [14] CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre RS: Bookman, 2013.
- [15] FITZGERALD, A E; JR, Charles Kingsley; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre RS: Bookman, 2006.
- [16] KONSTENKO, M P; PIOTROVSKI, L M. **Máquinas Elétricas: Tomo I**. 1. ed. Moscou:Editorial MIR, 1975.
- [17] KONSTENKO, M P; PIOTROVSKI, L M. **Máquinas Elétricas: Tomo II**. 1. ed. Moscou:Editorial MIR, 1975.
- [18] KUHLMANN, John H. **Design of Electrical Apparatus**. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1940.

- [19] LIPO, T. A. **Introduction to AC machine design**. Wisconsin: Wisconsin Power Electronics Research Center, University of Wisconsin, 2016.
- [20] MIRJALILI S. **Multi-objective Optimization Problems and Algorithms**. Udemy, 2018. < <https://www.udemy.com/multi-objective-optimization-problems-and-algorithms/>>. Acesso em: 02/11/2018.
- [21] MARTIGNONI, Alfonso. Máquinas de Corrente Alternada. 7. ed. Porto Alegre RS: Editora Globo, 1920.
- [22] MARTIN, Juan Corrales. **Calculo Industrial de Máquinas Electricas: Tomo I**. [S.l.]: U.P.B, 1975.
- [23] MARTIN, Juan Corrales. **Calculo Industrial de Máquinas Electricas: Tomo II**. [S.l.]: U.P.B, 1975.
- [24] MEEKER, David. **Finite Element Method Magnetics - Version 4.2 - User's Manual**. 1. ed.[S.l.], 2015.
- [25] ORO, Daniel Carlos. **Determinação de Valores dos Parâmetros de Geradores Síncronos em Regime Permanente Usando Metodologias Analítica, Por Elementos Finitos e Experimental**. 184 p. Dissertação (Mestrado) - UFSC, 2017.
- [26] Pedrosa Silva, Rodrigo & Li, Min & Rahman, Tanvir & Lowther, David. (2017). Surrogate-Based MOEA/D for Electric Motor Design with Scarce Function Evaluations. **IEEE Transactions on Magnetics**. PP. 1-1. 10.1109/TMAG.2017.2661987.
- [27] PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. **Design of rotating electrical machines**. Second. ed. UK: Wiley, 2014.

- [28] RUNCOS, F. **Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: Aspectos construtivos da Máquina Elétrica.** Jaraguá do Sul, 2018. 408p.
- [29] RUNCOS, F. **Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: As Harmônicas de Campo Girante e Parâmetros Físicos da Máquina Elétrica.** Jaraguá do Sul, 2018. 461p.
- [30] RUNCOS, F. **Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: As Perdas da Máquina Elétrica.** Jaraguá do Sul, 2018. 281p.
- [31] RUNCOS, F. **Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica: A Modelagem e Aplicação da Máquina Elétrica.** Jaraguá do Sul, 2018. 494p.
- [32] SAKAWA, M. **Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimization.** 1. ed. Kluwer Academic Publishers, 2002. 285 p.
- [33] SEARS, F.; ZEMANSKY, Mark W.; YOUNG, Hugh D. **Física 3 – Eletricidade e Magnetismo.** 2. ed. [S.l.]: LTC Editora, 1984. 771 p.
- [34] VOIGT, Thiago. **Modelagem Analítica e Numérica de Bobinas Pré-Formadas e de Barras Roebel Aplicadas em Máquinas Elétricas de Grande Porte.** 180 p. Dissertação (Mestrado) - UFSC, 2018.
- [35] ZINI, Érico de Oliveira Costa. **Algoritmo Genético Especializado na Resolução de Problemas com Variáveis Contínuas e Altamente Restritos.** 151 p. Dissertação (Mestrado) – UNESP, 2009.

## APÊNDICE 1 – Determinação da seção para cálculo das induções

1. Área da seção do corpo do polo.

$$A_{pol} = b_{pko} k_{emp} L_2$$

Onde:

$A_{pol}$  = Área do polo;

$b_{pko}$  = Largura da base do polo;

$k_{emp}$  = Coeficiente de empilhamento do rotor;

$L_2$  = Comprimento do pacote total do gerador;

2. Área da seção do dente do estator

$$b_{d01} = \left( \left( \frac{\pi}{N_1} \right) D_1 \right) - b_{01}$$

$$b_{d11} = \left( \left( \frac{\pi}{N_1} \right) (D_1 + 2(h_{01} + h_{11})) \right) - b_{11}$$

$$b_{d21} = \left( \left( \frac{\pi}{N_1} \right) (D_1 + 2(h_{01} + h_{n1})) \right) - b_{21}$$

$$b_{d1} = \frac{(b_{d01} + b_{d11} + b_{d21})}{3}$$

$$A_{d1} = \frac{N_1}{2p} k_{emp} L_2 b_{d1}$$

Onde:

$A_{d1}$  = Área do dente;

$b_{d01}$  = Largura da parte inferior do dente;

$b_{d11}$  = Largura intermediária do dente;

$b_{d21}$  = Largura do topo do dente;

$b_{01}$  = Largura da abertura da ranhura;

$b_{d1}$  = Largura média do dente;

$h_{01}$  = Altura da abertura inicial da ranhura;

$h_{11}$  = Altura intermediária da ranhura;

$h_{n1}$  = Altura no topo da ranhura;

### 3. Área da coroa do estator

$$h_{c1} = \frac{(D_{e1} - (D_1 + 2h_{n1}))}{2}$$

$$A_{c1} = k_{emp} h_{c1} L_i$$

Onde:

$A_{c1}$  = Área da coroa do estator;

$h_{c1}$  = Altura da coroa do estator;

$L_i$  = Largura do pacote magnético estator;

### 4. Área da coroa do rotor

$$h_{c1} = \frac{(D_1 - 2(h_{sch} + h_{pk}))}{2} - \left( g_i + \frac{D_{ic2}}{2} \right)$$

$$A_{c2} = k_{emp} h_{c2} L_2$$

Onde:

$A_{c2}$  = Área da coroa do rotor;

$h_{c2}$  = Altura da coroa do estator;

$L_2$  = Largura do pacote magnético rotor;

## 5. Área do entreferro sobre um polo

$$A_{g_i} = \frac{\pi k_{emp} (D_1 - 2g_i) L_i}{2pk_{c1}}$$

Onde:

$A_{g_i}$  = Área do entreferro;

$k_{c1}$  = Fator de carter;

## APÊNDICE 2 – Cálculo do volume dos dentes e da coroa do estator

$$V_{c1} = \frac{\pi}{4} (D_{e1}^2 - (D_1 + 2h_{n1})^2) k_{emp} L_1$$

$$V_{d1} = \frac{\pi}{4} ((D_1 + 2h_{n1})^2 - D_1^2 - N_1 A_{n1}) k_{emp} L_1$$

Onde:

$V_{c1}$  = Volume da coroa do estator;

$V_{d1}$  = Volume dos dentes do estator;

$D_{e1}$  = Diâmetro externo do estator;

$D_1$  = Diâmetro interno do estator;

$h_{n1}$  = Altura da ranhura;

$k_{emp}$  = Coeficiente de empilhamento;

$L_1$  = Comprimento efetivo do pacote;

$A_{n1}$  = Área da ranhura do estator;

### APÊNDICE 3 – Cálculo da massa do GSPS

1- Massa do condutor de cobre do rotor:

$$M_{cobrer} = L_{zpol} 10^{-3} Z_{pol} h_{n12} b_{n12} 10^{-6} j_{h2} j_{b2} M_{esp} 2p$$

Onde:

$M_{cobrer}$  = Massa do cobre do rotor;

$L_{zpol}$  = Largura média de uma espira do rotor;

$Z_{pol}$  = Número de espiras por polo;

$h_{n12}$  = Altura do condutor;

$b_{n12}$  = Base do condutor;

$j_{h2}$  = Quantidade de condutores em paralelo na altura da espira;

$j_{b2}$  = Quantidade de condutores em paralelo na base da espira;

$M_{esp}$  = Massa específica do cobre;

$p$  = Número de pares de polos no rotor;

2- Massa do condutor de cobre estator:

$$M_{cobres} = L_{w1} 10^{-3} Z_1 h_{n11} b_{n11} 10^{-6} j_{h1} j_{b1} M_{esp} N_1$$

Onde:

$M_{cobres}$  = Massa do cobre do rotor;

$L_{w1}$  = Largura média de uma espira do estator;

$Z_1$  = Número de espiras por bobina;

$h_{n11}$  = Altura do condutor;

$b_{n11}$  = Base do condutor;

$j_{h1}$  = Quantidade de condutores em paralelo na altura da espira;

$j_{b1}$  = Quantidade de condutores em paralelo na base da espira;

$M_{esp}$  = Massa específica do cobre;

$N_1$  = Número de ranhuras;

3- Massa do ferro magnético do rotor.

$$M_{fmr} = (M_{cp} + M_{sp})2p + M_{rp}$$

$$M_{cp} = h_{pk}b_{pko}10^{-9}L_2k_{emp}M_{esp}$$

$$M_{sp} = h_{sch}b_{sch}10^{-9}L_2k_{emp}M_{esp}$$

$$M_{rp} = \frac{(D_{i3}^2\pi - D_{i2}^2\pi)}{4}10^{-9}L_2k_{emp}M_{esp}$$

Onde:

$M_{fmr}$  = Massa do ferro magnético do rotor;

$M_{cp}$  = Massa do corpo do polo;

$M_{sp}$  = Massa da sapata polar;

$p$  = Número de pares de polos no rotor;

$M_{rp}$  = Massa da roda polar;

$h_{pk}$  = Altura do corpo do polo;

$b_{pko}$  = Largura do corpo do polo;

$h_{sch}$  = Altura da sapata do polo;

$b_{sch}$  = Largura da sapata do polo;

$L_2$  = Comprimento total do pacote polar;

$k_{emp}$  = Coeficiente de empilhamento das chapas polares;

$h_{pk}$  = Altura do corpo do polo;

$b_{pko}$  = Largura do corpo do polo;

$D_{i3}$  = Diâmetro externo da roda polar;

$D_{i2}$  = Diâmetro interno do rotor;

4-Massa do ferro magnético do estator.

$$M_{fms} = (V_{c1} + V_{d1})M_{esp}$$

Onde:

$M_{fms}$  = Massa do ferro magnético do estator;

$V_{c1}$  = Volume da coroa do estator – Vide Apêndice 1;

$V_{d1}$  = Volume dos dentes do estator – Vide Apêndice 1;

## APÊNDICE 4 – Código para desenho automático programa FEMM

%% Simulação

```

path(path,'C:\femm42\mfiles') % sets the path
openfemm;
newdocument(0);
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, L2, 30); %Define o tipo do problema
(Magnético,Milímetros,coordenada planar,precisão do cálculo,restrição de angulo)
mi_setgrid(10,'cart'); %Criando grade
main_maximize
mi_drawarc([-De1./2 0;De1./2 0], 180, 1); %Desenhando arco diâmetro externo do
estator
mi_selectarcsegment(De1./2,0); %Copiando e rotacionando arco diâmetro externo do
estator
mi_copyrotate2(0, 0, 180, 2, 3 );
mi_clearselected;
mi_drawarc([De2/2-Rp -Rp;De2/2-Rp Rp],180,1);%Desenhando arco diâmetro externo
do estator
mi_selectarcsegment(De2./2-Rp,0);%Copiando e rotacionando arco diâmetro externo do
estator
mi_copyrotate2(0, 0, 180, 2, 3 );
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(De2/2-Rp,-Rp);
mi_selectnode(De2/2-Rp,Rp);
mi_deleteslected;
mi_clearselected;
%
mi_addnode(-D1/2,-bpko/2-dif);
mi_addnode(-D1/2,+bpko/2+dif);
%
```

```

mi_addnode((-Di3/2+Di2/2)/2,bpko/2);
mi_addnode((-Di3/2+Di2/2)/2,-bpko/2);
mi_addnode((-Di3/2+Di2/2)/2,bpko/2);%
mi_addnode((-Di3/2+Di2/2)/2,-bpko/2);%
mi_addnode(-Di3/2-hpk,bpko/2);
mi_addnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2);
mi_addnode(-Di3/2-hpk,bpko/2);
mi_addnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2);
mi_addnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2-dif);
mi_addnode(-Di3/2-hpk,bpko/2+dif);
mi_addsegment(-D1/2,-bpko/2-dif,-Di3/2-hpk,-bpko/2-dif);
mi_addsegment(-D1/2,+bpko/2+dif,-Di3/2-hpk,+bpko/2+dif);
mi_selectnode(-De2./2+Rp,-Rp); %Deletando nós que sobram
mi_selectnode(-De2./2+Rp,+Rp); %Deletando nós que sobram
mi_deleteslected;
mi_clearselected;
mi_drawrectangle(De1./1.5,De1./1.5,-De1./1.5,-De1./1.5);
mi_zoomnatural
mi_drawarc([-Di3./2 0;Di3./2 0], 180, 1); %Desenhando arco diâmetro externo do rotor
mi_selectarcsegment(Di3./2,0); %Copiando e rotacionando arco diâmetro externo do
rotor
mi_copyrotate2(0, 0, 180, 2, 3 );
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,bpko/2);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;

```

```

%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,bpko/2);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,-bpko/2-dif);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-Di3/2-hpk,bpko/2+dif);
mi_setnodeprop('Polo',2);
mi_clearselected;
%
mi_addsegment(-Di3/2-hpk,bpko/2,-Di3/2-hpk,bpko/2+dif);
mi_addsegment(-Di3/2-hpk,-bpko/2,-Di3/2-hpk,-bpko/2-dif);
%
mi_addsegment((-Di3/2+Di2/2)/2,-bpko/2,-Di3/2-hpk,-bpko/2);
mi_addsegment((-Di3/2+Di2/2)/2,bpko/2,-Di3/2-hpk,bpko/2);
%
mi_selectnode((-Di3/2-Di2/2)/2,bpko/2);%Deletando nós que sobram
mi_deleteselect;
mi_clearselected;
%
mi_selectnode((-Di3/2-Di2/2)/2,-bpko/2);%Deletando nós que sobram
mi_deleteselect;
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-D1/2,-bpko/2-dif);%Deletando nós que sobram

```

```

mi_deleteselected;
mi_clearselected;
%
mi_selectnode(-D1/2,+bpko/2+dif);%Deletando nós que sobram
mi_deleteselected;
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(-Di3/2-hpk,bpko/2); %Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(-Di3/2-hpk,-bpko/2);%Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 1 )
mi_clearselected
%
mi_selectsegment(-De2/2,bsch/2); %Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(-De2/2,-bsch/2);%Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectarcsegment(-De2/2,0);%Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 3 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(-Di3/2,-bpko/2);%Polo
mi_copyrotate2(0, 0,np, Pol, 1 );
mi_clearselected;
%

```

```

mi_selectsegment(-Di3/2,bpko/2);%Polo
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;
%
mi_drawarc([-Di2./2 0;Di2./2 0],180,1);%Desenhando arco diâmetro interno do rotor
mi_selectarcsegment(Di2./2,0);%Copiando e rotacionando arco diâmetro interno do
rotor
mi_copyrotate2(0,0,180,2,3);
mi_clearselected;
% P1
mi_addnode(hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4);
mi_addnode(hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4+Lfio);
mi_addnode(hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4);
mi_addnode(hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4+Lfio);
%
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4,hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4+Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4,hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4+Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4+Lfio,hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4+Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4,hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4);
% P2
mi_addnode(hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4);%
mi_addnode(hpk+Di3/2-4,-bpko/2+0.4-Lfio);%
mi_addnode(hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4);%
mi_addnode(hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4-Lfio);%
%
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4,hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4-Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4,hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4-Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4-Lfio,hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4-Lfio);
mi_addsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4,hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4);
%
mi_selectsegment(hpk+Di3/2-4,bpko/2+0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);

```

```

mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(hpk/2+Di3/2,bpko/2+0.4+Lfio);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;

mi_selectsegment(hpk/2+Di3/2,bpko/2+0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;

mi_selectsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,bpko/2+0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;

mi_selectsegment(hpk+Di3/2-4,-bpko/2-0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(hpk/2+Di3/2,-bpko/2-0.4-Lfio);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(hpk/2+Di3/2,-bpko/2-0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(hpk+Di3/2-4-Hfio,-bpko/2-0.4);%Bobina
mi_copyrotate2(0,0,np,Pol,1);
mi_clearselected;
%
mi_addnode(D1/2,b01/2);%Criando nó ranhura

```

```

mi_addnode(D1/2,-b01/2);%Criando nó ranhura
mi_addnode(D1/2+h31,b01/2);%Criando nó ranhura
mi_addnode(D1/2+h31,-b01/2);%Criando nó ranhura
%
mi_selectnode(D1/2,-b01/2);%Polo
mi_copyrotate2(0, 0,nran, N1, 0 );
mi_clearselected;
%
mi_addsegment(D1/2,b01/2,D1/2+h31,b01/2);
mi_addsegment(D1/2,-b01/2,D1/2+h31,-b01/2);
mi_addsegment(D1/2+h31,b01/2,D1/2+h31,-b01/2);
mi_addsegment(D1/2,b01/2,D1/2,2*b01);
%
mi_selectsegment(D1/2,-b01/2);
mi_copyrotate2(0, 0,nran, N1, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(D1/2,b01/2);
mi_copyrotate2(0, 0,nran, N1, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(D1/2,b01);
mi_copyrotate2(0, 0,nran, N1, 1 );
mi_clearselected;
%
mi_selectsegment(D1/2+h31,0);
mi_copyrotate2(0, 0,nran, N1, 1 );
mi_clearselected;
%
np1 = np*pi/180;
d=0;
while Pol > d

```

```

a= -Di3/2*cos(d*np1);
b= -Di3/2*sin(d*np1);
mi_selectarcsegment(a,b);
mi_deleteselected;
mi_clearselected;
d=d+1;
end
%
mi_selectnode(Di3/2,0);
mi_deleteselected;
mi_clearselected;
mi_selectnode(-Di3/2,0);
mi_deleteselected;
mi_clearselected;
%
iformula = (Iexct/Ncpp);
%
mi_addmaterial('Air', 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0);
mi_addmaterial('Coil', 1, 1, 0, 0, 58*0.65, 0, 0, 1, 0, 0, Wcu);
% mi_addmaterial('Coils', 1, 1, 0, 0, 58*0.65, 0, 0, 1, 0, 0, Wcu);
mi_addmaterial('LinearIron', 2100, 2100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
mi_addcircprop('icoil',iformula, 1);
% mi_addcircprop('icoils',I/Ncp, 1);
mi_addmaterial('1020', 2100, 2100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
bhcurve = [ 0,0.25,0.93,1.25,1.39,1.53,1.71,1.87,1.96,2.02,2.11,2.23,2.43;
0, 239, 796, 1592, 2387, 3979, 7958, 15916, 23873, 39789, 79578, 159155, 318310];
mi_addbhpoints('1020', bhcurve);
muo = pi*4.e-7;
%
%Adicionando materiais aos blocos
%
```

```

mi_addboundprop('Asymptotic', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1/(muo*0.2), 0, 2);
%
mi_addblocklabel(D1/2-Delta/2,0);
mi_selectlabel(D1/2-Delta/2,0);
mi_setblockprop('Air', 0, 25, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(0,0);
mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop('Air', 0, 25, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(De1/1.9,0);
mi_selectlabel(De1/1.9,0);
mi_setblockprop('Air', 0, 25, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(Di3/2+hpko/2,bpko/2+dif/3);
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/2,bpko/2+dif/3);
mi_setblockprop('Coil', 0, 10, 'icoil', 0, 0,-Z2);
mi_copyrotate2(0, 0, np*2, Pol, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(Di3/2+hpko/2,-bpko/2-dif/3);
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/2,-bpko/2-dif/3);
mi_setblockprop('Coil', 0, 10, 'icoil', 0, 0,Z2);
mi_copyrotate2(0, 0, np*2, Pol, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(Di3/2+hpko/3,bpko/2+dif/3);
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/3,bpko/2+dif/3);
mi_setblockprop('Coil', 0, 10, 'icoil', 0, 0,Z2);

```

```

mi_copyrotate2(0, 0, np, 1, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(Di3/2+hpko/3,-bpko/2-dif/3);
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/3,-bpko/2-dif/3);
mi_setblockprop('Coil', 0, 10, 'icoil', 0, 0,-Z2);
mi_copyrotate2(0, 0, np, 1, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/3,-bpko/2-dif/3);
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/3,bpko/2+dif/3);
mi_deletesselected;
mi_clearselected;
%
mi_selectlabel(Di3/2+hpko/3,bpko+dif);
mi_copyrotate2(0, 0, np*2, Pol, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_selectlabel(cos(1.2*np*pi/180)*Di3/2+hpko/3,sin(1.2*np*pi/180)*Di3/2+hpko/3);
mi_copyrotate2(0, 0, np*2, Pol, 2 );
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(Di3/2,0);
mi_selectlabel(Di3/2,0);
mi_setblockprop('LinearIron', 0, 25, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%
mi_addblocklabel(De1/2.05,0);
mi_selectlabel(De1/2.05,0);
mi_setblockprop('LinearIron', 0, 25, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;

```

```
mi_savedxf('projeto.dxf')
mi_saveas('projeto.fem');
%
mi_analyze ;
mi_loadsolution;
```