

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

Elissa Soares de Carvalho

**PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE
POLOS LISOS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa
Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Florianópolis
2011

PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS

Elissa Soares de Carvalho

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de
Mestre
em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e
Dispositivos Eletromagnéticos,
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Patrick Kuo Peng, Dr
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Patrick Kuo Peng, Dr
Presidente

Frédéric Wurtz, Dr.

Nelson Sadowski, Dr.

Fredemar Rüncos, Dr.

Walter Pereira Carpes Junior, Dr.

Ao Alex,
Meu melhor amigo, companheiro de leitura, colega de trabalho e
marido.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, Prof. Patrick Kuo Peng e Prof. Frederic Wurtz, pela paciência, assistência, e colaboração.

À Celly Melo, Wilson e Marcelo, pela simpatia, ajuda eficiente e disposição.

À WEG, que concedeu os dados de entrada do gerador, disponibilizou o cálculo industrial para validação do trabalho e forneceu muitas das figuras utilizadas nesta dissertação.

À ISSS por disponibilizar o software modeFRONTIER, da Esteco. Ao Rodrigo Ferraz, por oferecer e facilitar o acesso à ISSS.

Ao Alex, pela confiança, senso de humor e incentivo.

Ao Marcos, pela ajuda com as figuras.

Aos Srs. Carlos Grillo e Mário Lima pelo incentivo e ajuda sem os quais não teria finalizado esta fase.

Aos meus colegas de trabalho Aline, Toniel, Nilton, Paulo, Ogawa, Marli e Nadiny: pelas críticas, discussões e inúmeras manifestações de apoio.

Aos professores do GRUCAD.

Aos meus pais e irmãos: Laércio, Coralice, Elisa e Alexandre.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS

Elissa Soares de Carvalho

Junho/2011

Orientador: Patrick Kuo Peng, Dr.

Co-Orientador: Frederic Wurtz, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: gerador síncrono, razão de curto-circuito, otimização, algoritmo genético, indústria sucroalcooleira.

Número de Páginas: 71

Resumo - É apresentado, nesta dissertação, o projeto de um gerador síncrono de polos lisos, quatro polos, de 17,5 MVA, seguido de sua otimização por algoritmo genético com o objetivo de alcançar a máxima razão de curto-circuito (RCC) sem modificar as dimensões externas de uma máquina WEG padrão, com o mínimo de comprometimento das demais características. A escolha do RCC como função objetivo é motivada por uma presente necessidade de um segmento específico do mercado de energia brasileiro que tem crescido significativamente na última década: a geração e venda de energia elétrica proveniente da indústria sucroalcooleira. A razão de curto-circuito (RCC) define a capacidade de recuperação rápida de um gerador diante de flutuações da rede o que a torna uma característica altamente desejável para um gerador operando nestas condições. Por outro lado, altos valores de RCC significam o aumento das perdas Joule no rotor, o que leva a um aumento de seu volume e consequentemente ao aumento dos custos de fabricação da máquina. O equilíbrio entre preservar as principais dimensões e alcançar o requisito técnico desejado é o objetivo deste trabalho.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A ROUND ROTOR SYNCHRONOUS GENERATOR

Elissa Soares de Carvalho
June/2011

Advisor: Patrick Kuo Peng, Dr.

Co-advisor: Frederic Wurtz, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: synchronous generator, short-circuit ratio, optimization, genetic algorithm, sugarcane industry

Number of Pages: 71

ABSTRACT: This dissertation presents the design of a 17.5MVA four poles round rotor synchronous generator, following by a genetic algorithm optimization in order to meet the maximum short circuit ratio (SCR) maintaining the main external dimensions of a standard WEG machine, without compromising the other performance requirements. The choice of SCR as an objective function is motivated by a present need of a specific segment of Brazilian energy market that has been growth significantly for the last decade: generation and selling of electric energy from sugarcane industry. SCR defines the generator capacity of fast recovering facing grid fluctuations, becoming highly desirable if the generator is connected to the grid. In counterpart larger SCR also means larger air gap, which implies in an increase of Joule losses of rotor, leading to an increase of rotor volume and to higher costs. The balance between preserving cost through keeping the generator main dimensions and achieving technical requirements is the purpose of this work.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Gerador Síncrono Acionado por Turbina..... | 2 |
| Figura 2 – Rotor de Quatro Polos e Polos Lisos..... | 4 |
| Figura 3 – RCC em Relação à Potência Máxima e à Reatância do Sistema | 8 |
| Figura 4 – Gerador Síncrono com Sistema de Ventilação através de Trocador de Calor Ar-Água..... | 9 |
| Figura 5 – Estator Bobinado de uma Máquina de Indução Trifásica..... | 10 |
| Figura 6 – Chapa do Rotor do Gerador Síncrono de Polos Lisos..... | 11 |
| Figura 7 – Segmento de Chapa do Estator..... | 16 |
| Figura 8 – Representação da Ranhura do Estator | 17 |
| Figura 9 – Bobina Isolada do Estator com Separadores e Cunha..... | 19 |
| Figura 10 – Fluxograma do Cálculo do Gerador | 22 |
| Figura 11 – Representação do Efeito de Dispersão | 25 |
| Figura 12 – Curva Característica do Gerador em Vazio..... | 27 |
| Figura 13 – Circuito Equivalente do Gerador em Regime | 30 |
| Figura 14 – Excitação de uma Máquina Síncrona de Polos Lisos | 32 |
| Figura 15 – Diagrama Vetorial de Tensão..... | 35 |
| Figura 16 – Diagrama Vetorial de Tensão simplificado..... | 36 |
| Figura 17 – Diagrama Vetorial de Corrente | 37 |
| Figura 18 – Diagrama Vetorial de Corrente com os Eixos Identificados | 38 |
| Figura 19 – Relação de Dimensões da Ranhura do Estator | 40 |
| Figura 20 – Estrutura do problema de otimização no modeFRONTIER..... | 56 |

LISTA DE VARIÁVEIS

| | | |
|----------------|--|--------------------|
| <i>As</i> | Densidade Linear de Corrente | [A/cm] |
| <i>Ac1</i> | Abaulamento da Bobina do Estator Após sair da Ranhura | [mm] |
| <i>Area1</i> | Seção de uma Bobina do Enrolamento de Estator | [mm ²] |
| <i>Area2</i> | Seção de uma Bobina do Enrolamento de Rotor | [mm ²] |
| <i>Bc10</i> | Indução na Coroa do Estator | [T] |
| <i>Bc20</i> | Indução na Coroa do Rotor | [T] |
| <i>Bd102_3</i> | Indução em 2/3 do Dente do Estator | [T] |
| <i>Bd10Db</i> | Indução na Base do Dente do Estator | [T] |
| <i>Bd10Dbt</i> | Indução no Topo do Dente do Estator | [T] |
| <i>Bd10Dm</i> | Indução no Meio do Dente do Estator | [T] |
| <i>Bd20D</i> | Indução no Dente da Ranhura do Circuito de Amortecimento | [T] |
| <i>b</i> | Largura de uma Ranhura | [mm] |
| <i>besr1</i> | Acréscimo na Largura da Ranhura Devido à Esteca | [mm] |
| <i>besr1</i> | Largura da Ranhura com Esteca do Estator | [mm] |
| <i>bn11</i> | Largura de um Condutor | [mm] |
| <i>bn2</i> | Largura de um Condutor do Enrolamento do Rotor | [mm] |
| <i>bpr2</i> | Largura Do Pescoço da Ranhura | [mm] |
| <i>br1</i> | Largura Efetiva da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>br1p</i> | Largura Preliminar da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>br2</i> | Largura Efetiva da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>Bδm</i> | Indução Média no Entreferro | [T] |
| <i>Bδmax</i> | Indução Máxima no Entreferro | [T] |
| <i>Cab2med</i> | Alt. Média de uma Cabeça de Bob.do Rotor | [mm] |
| <i>DT</i> | Elevação de Temperatura | [K] |
| <i>d2_31</i> | Espessura do Dente da Ranhura Estator em 2/3 Altura | [mm] |
| <i>d3</i> | Largura do Dente da Ranhura do Enrolamento Amortecedor | [mm] |
| <i>De1</i> | Diâmetro Externo do Rotor | [mm] |
| <i>De1</i> | Diâmetro Externo do Estator | [mm] |
| <i>De2</i> | Diâmetro Interno do Rotor | [mm] |
| <i>Di1</i> | Diâmetro Interno do Estator | [mm] |
| <i>DimBob1</i> | Dimensão de uma Bobina do Estator | [m] |

| | | |
|-----------------------|--|------|
| <i>DimBob2</i> | Dimensão de uma Espira da Bobina do Rotor | [m] |
| <i>Dmr</i> | Diâmetro no Meio da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>db1</i> | Espessura do Dente da Ranhura Estator – Base | [mm] |
| <i>dest1</i> | Espessura do Dente da Ranhura Estator – Esteca | [mm] |
| <i>dloc3</i> | Diâmetro do Centro da Ranhura Amortecedora | [mm] |
| <i>dm1</i> | Espessura do Dente da Ranhura Estator – Meio | [mm] |
| <i>dm2</i> | Espessura do Dente da Ranhura Rotor – Meio | [mm] |
| <i>dr3</i> | Diâmetro da Ranhura do Enrolamento Amortecedor | [mm] |
| <i>ds1</i> | Passo do enrolamento da Bobina da Armadura + 1 | |
| <i>dt1</i> | Espessura do Dente da Ranhura Estator – Topo | [mm] |
| <i>dt2</i> | Espessura do Dente da Ranhura Rotor – Topo | [mm] |
| <i>E₀</i> | Força Eletromotriz | [V] |
| <i>eeb1</i> | Distância entre Bobinas | [mm] |
| <i>eeb2</i> | Distância entre Bobinas do Enrolamento do Rotor | [mm] |
| <i>eib1</i> | Espessura da Isolação da bobina | [mm] |
| <i>EIC1</i> | Espessura da Isolação dos Condutores | [mm] |
| <i>EIC2</i> | Espessura da Isolação dos Condutores do Enrolamento do Rotor | [mm] |
| <i>eir2</i> | Espessura da Isolação da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>Espbob1</i> | Espessura da Bobinado Estator | [mm] |
| <i>f</i> | Frequência | [Hz] |
| <i>Famin1</i> | Folga Mínima na Altura da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>F_{am}</i> | Folga Mínima na Altura da Ranhura do Roto | [mm] |
| <i>Fa1</i> | Folga na Altura da Ranhura Estator | [mm] |
| <i>Fa1min</i> | Folga Mínima na Altura da Ranhura Estator | [mm] |
| <i>Fa2</i> | Folga na Altura da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>Fa2min</i> | Folga Mínima na Altura da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>Fl1</i> | Folga na Largura da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>Fl1min</i> | Folga Mínima na Largura da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>Fl2</i> | Folga na Largura da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>Fl2min</i> | Folga Mínima na Largura da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>FP</i> | Fator de Potência | |
| <i>Gc</i> | Massa da Coroa da Chapa do Estator | [kg] |

| | | |
|-------------------------|---|----------------------|
| <i>Gcoroa</i> | Massa da Coroa do Estator | [kg] |
| <i>Gd</i> | Massa do Dente da Chapa do Estator | [kg] |
| <i>Gdente</i> | Massa no Dente do Estator | [kg] |
| <i>hc1</i> | Altura da Coroa do Estator | [mm] |
| <i>hc2</i> | Altura da Coroa do Rotor | [mm] |
| <i>hesr1</i> | Altura da Esteca Seguradora da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>hib1</i> | Altura do Isolante da Base da Ranhura | [mm] |
| <i>hib2</i> | Altura do Isolante da Base da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>hip1</i> | Altura do Isolante de Preenchimento | [mm] |
| <i>hn1</i> | Altura de um condutor | [mm] |
| <i>hn2</i> | Altura de um Condutor do Enrolamento do Rotor | [mm] |
| <i>hpr1</i> | Altura do Pescoço da Ranhura Estator | [mm] |
| <i>hpr2</i> | Altura do Pescoço da Ranhura Rotor | [mm] |
| <i>hr1</i> | Altura Efetiva da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>hr1p</i> | Altura Preliminar da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>hr2</i> | Altura Efetiva da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>hseb1</i> | Altura Separação entre Bobinas | [mm] |
| <i>hseb2</i> | Altura Separação entre Bobinas do Enrolamento do Rotor | [mm] |
| <i>htr1</i> | Altura Total da Ranhura do Estator | [mm] |
| <i>htr2</i> | Altura Total da Ranhura do Rotor | [mm] |
| <i>H1cab</i> | Altura da Cabeça de Bobina do Estator | [mm] |
| <i>H2cab</i> | Altura da Cabeça de Bobina do Rotor | [mm] |
| <i>Hδ0</i> | Campo no Entreferro em Vazio | [A/mm] |
| <i>I</i> | Corrente por Fase | [A] |
| <i>I_{exc0}</i> | Corrente em Vazio do Rotor | [A] |
| <i>INf</i> | Corrente do Rotor da Nominal | [A] |
| <i>j1</i> | Densidade de Corrente do Estator | [A/mm ²] |
| <i>j2</i> | Densidade de Corrente do Rotor | [A/mm ²] |
| <i>kc1</i> | Coefficiente de Carter da Ranhura do Estator | |
| <i>kd1</i> | Fator de Distribuição | |
| <i>kem</i> | Fator de empilhamento de pacote | |
| <i>kenr1</i> | Fator de Enrolamento | |
| <i>kf</i> | Fator de Forma do Campo de Excitação | |
| <i>kA</i> | Inverso do Fator de Forma do Campo de Excitação | |
| <i>kperC1</i> | Fator de Correção de Perda no Ferro na Coroa Devido ao Processo | |
| <i>kperD1</i> | Fator de Correção de Perda no ferro no Dente Devido ao Processo | |

| | | |
|------------|--|-------|
| $kred$ | Fator de Redução do Pacote | |
| ks | Fator de Saturação | |
| $k\tau_1$ | Fator de Passo do Estator | |
| $L1$ | Comprimento do Pacote sem Canais de Ventilação Estator | [mm] |
| $L1cb$ | Largura da Cabeça de Bobina do Estator | [mm] |
| $L2$ | Comprimento do Pacote sem Canais de Ventilação Rotor | [mm] |
| $L2Bob$ | Largura de uma Bobina do Rotor | [mm] |
| $L2ext$ | Largura da Bobina do Rotor Mais Externa | [mm] |
| $L2int$ | Largura da Bobina do Rotor Mais Interna | [mm] |
| $L2med$ | Largura da Bobina do Rotor Média | [mm] |
| $lam3$ | Largura do Anel Amortecedor | [mm] |
| $Lamb$ | Comprimento da Cabeça por Passo de Ranhura do Estator | [mm] |
| Li | Comprimento Ideal do Pacote de Chapas | [mm] |
| Lcv | Espessura do canal de Ventilação | [mm] |
| $Lm1$ | Comprimento da Parte Reta da Bobina | [mm] |
| $Lm2$ | Comprimento da Parte Reta da Bobina do Rotor | [mm] |
| $Ltp1$ | Comprimento do Pacote com Canais de Ventilação Estator | [mm] |
| $Ltp2$ | Comprimento do Pacote com Canais de Ventilação Rotor | [mm] |
| m | Número de Fases | |
| M_a | Reação da Armadura | [Ae] |
| M_e | Força Magnetomotriz | [Ae] |
| M_0 | Força Magnetomotriz em Vazio | [Ae] |
| M_δ | Força Magnetomotriz na Linha do Entreferro | [Ae] |
| n | Rotação | [rpm] |
| $N1$ | Número de Ranhuras do Estator | |
| $N2$ | Número de Ranhuras do Campo (Rotor) | |
| $N2bob$ | Quantidade de Bobinas em um Polo | |
| $N3$ | Número de Ranhuras de Amortecimento (rotor) | |
| $Ncp1$ | Número de Caminhos Paralelos | |
| $Ncp2$ | Número de Caminhos Paralelos | |
| $Ncph1$ | No de Condutores Paralelos na Altura da Ranhura | |
| $Ncph2$ | Número de Condutores Paralelos na Altura da Ranhura do Rotor | |
| $Ncpl1$ | Número de Condutores Paralelos na Largura da Ranhura | |

| | | |
|-----------------|---|-----------------|
| N_{cpl2} | Número de Condutores Paralelos na Largura da Ranhura do Rotor | |
| N_{cv1} | Número de Canais de Ventilação Estator | |
| N_{cv2} | Número de Canais de Ventilação Rotor | |
| p | Número de Pares de Polos | |
| P | Potência Aparente | [kVA] |
| q | Número de Ranhuras por Polo por Fase | |
| P_{fc} | Perdas no Ferro na Coroa do Estator | [W] |
| P_{fd} | Perdas no Ferro no Dente do Estator | [W] |
| P_{fe} | Perdas no Ferro totais | [W] |
| P_{j1} | Perdas Joule Estator | [W] |
| P_{j2} | Perdas Joule no Rotor | [W] |
| P_{mag} | Perda Magnética 1 T 50 Hz | [W/kg] |
| P_{sup} | Perdas Suplementares | [W] |
| r_1 | Resistência do Enrolamento de Estator | [Ω] |
| r_{1q} | Resistência Quente do Enrolamento do Estator | [Ω] |
| r_2 | Resistência do Enrolamento do Rotor | [Ω] |
| r_{2q} | Resistência Quente do Enrolamento do Rotor | [Ω] |
| RCC | Relação de Curto-circuito | |
| $rext$ | Raio Externo do Final da Bobina do Estator | [mm] |
| TAI | Temperatura Ambiente Inicial | [$^{\circ}C$] |
| TAF | Temperatura Ambiente Final | [$^{\circ}C$] |
| U_n | Tensão Nominal de Linha | [V] |
| U_f | Tensão Nominal de Fase | [V] |
| W_1 | Número de Espiras por Fase em Série do Estator | |
| W_t | Número de Espiras Totais do Rotor | |
| X_a | Reatância de Magnetização Saturada | [Ω] |
| X_{apu} | Reatância de Magnetização em pu Saturada | [pu] |
| X_{ds} | Reatância do Eixo Direto Saturada | [Ω] |
| X_{dspu} | Reatância do eixo Direto em pu Saturada | [pu] |
| X_e | Reatância Externa em pu | [pu] |
| Z_1 | Número de Espiras do Enrolamento da Armadura | |
| Z_2 | Número de Espiras do Enrolamento do Rotor | |
| Z_{2_polo} | Número de Ranhura do Rotor por Polo | |
| ZB | Impedância Base | [Ω] |
| α_{inc1} | Ângulo de Inclinação da Bobina do Estator | [Graus] |
| β | Expoente para Perdas no Ferro | |
| δ | Entreferro geométrico | [mm] |
| γ | Razão entre Área Ranhurada do Rotor e sua Expansão Polar | |

| | | |
|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| σ_{fe} | Densidade da Chapa Estator | [g/cm ³] |
| τ_b | Passo de Bobina | [mm] |
| τ_p | Passo de Polo | [mm] |
| τ_{r3} | Passo da Ranhura Amortecedora | [mm] |
| τ_{r2} | Passo de Ranhura do Rotor | [mm] |
| τ_{r1} | Passo Médio da Ranhura do Estator | [mm] |
| v | Ângulo de Carga | [Graus] |
| ω | Velocidade Angular | [rad/s] |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. | OBJETIVO | 1 |
| 1.2. | MOTIVAÇÃO | 1 |
| 1.3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 2 |
| 1.3.1. | <i>Plantas de Cogeração Sucroalcooleiras.....</i> | <i>3</i> |
| 1.3.2. | <i>Geradores Síncronos.....</i> | <i>3</i> |
| 1.3.3. | <i>Relação de Curto-circuito (RCC) e Impactos no Projeto do Gerador</i> | <i>4</i> |
| 1.3.4. | <i>Efeito da Relação de Curto-Circuito no Desempenho do Gerador.....</i> | <i>6</i> |
| 2. | TOPOLOGIA DO GERADOR | 9 |
| 2.1. | VOLUME ATIVO E FATOR ESSLON | 11 |
| 2.2. | DIMENSIONAMENTO DOS DIÂMETROS INTERNO E EXTERNO DO ROTOR E ESTATOR | 14 |
| 2.3. | MATERIAIS MAGNÉTICOS PARA AS CHAPAS..... | 14 |
| 2.4. | FABRICAÇÃO DAS CHAPAS..... | 15 |
| 2.5. | RANHURAS DO ESTATOR, DO CAMPO E DE AMORTECIMENTO..... | 16 |
| 2.6. | ENROLAMENTO DO ESTATOR E ISOLAÇÃO | 19 |
| 2.7. | ENROLAMENTO DO ROTOR E ISOLAÇÃO..... | 20 |
| 3. | PROJETO DO GERADOR EM REGIME PERMANENTE | 21 |
| 3.1. | CÁLCULO CLÁSSICO | 21 |
| 3.1.1. | <i>Fator de Enrolamento.....</i> | <i>23</i> |
| 3.1.2. | <i>Fator de Carter</i> | <i>24</i> |
| 3.1.3. | <i>Fator de Saturação.....</i> | <i>27</i> |
| 3.1.4. | <i>Resistências, Reatâncias e RCC.....</i> | <i>28</i> |
| 3.1.5. | <i>Reação da Armadura.....</i> | <i>30</i> |
| 3.1.6. | <i>Força Magnetomotriz e Corrente de Campo em Vazio</i> | <i>31</i> |
| 3.1.7. | <i>Diagramas Vetoriais e Corrente de Campo Nominal</i> | <i>33</i> |
| 3.1.8. | <i>Diagrama Vetorial de Corrente e Corrente de Campo Nominal</i> | <i>36</i> |
| 3.1.9. | <i>Induções</i> | <i>38</i> |
| 3.1.10. | <i>Equacionamento das Perdas Elétricas e Magnéticas.....</i> | <i>42</i> |
| 3.2. | VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA | 43 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4. | OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO, APLICAÇÃO E RESULTADOS | 49 |
| 4.1. | PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS..... | 49 |
| 4.1.1. | <i>Formulação do Problema</i> | <i>49</i> |
| 4.1.2. | <i>Resolução.....</i> | <i>51</i> |
| 4.2. | OTIMIZAÇÃO DO TURBO GERADOR QUATRO POLOS | 51 |
| 4.2.1. | <i>Utilização do Conceito de Máquina Imaginária. ..</i> | <i>52</i> |
| 4.2.2. | <i>Otimização do Gerador Real Utilizando Algoritmo Genético</i> | <i>54</i> |
| 4.3. | COMPARAÇÕES E RESULTADOS | 56 |
| 4.3.1. | <i>Situação 1 - Máquina Imaginária e Resultados: ...</i> | <i>56</i> |
| 4.3.2. | <i>Situação 2 – Gerador Otimizado com Algoritmo Genético e Resultados:.....</i> | <i>58</i> |
| 5. | CONCLUSÃO | 61 |
| | ANEXO A - CÁLCULO DA TOPOLOGIA | 63 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 69 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar um gerador síncrono padrão de quatro polos com rotor cilíndrico e otimizá-lo para que seja obtida a máxima relação de curto-circuito sem alterar as dimensões externas da máquina, comprimento do pacote de chapas e altura de ponta de eixo, mantendo suas perdas dentro de limites estabelecidos de operação, com a mínima alteração em seu volume ativo.

Inicialmente é desenvolvido um modelo em regime de um gerador síncrono de polos lisos, e desenvolvido um cálculo analítico utilizando-se equações clássicas dos livros de máquinas elétricas [1], [2], [3] e [4]. Para validação, o cálculo é então comparado com o cálculo comercial utilizado pela WEG Máquinas: VPSYN, validado, ao longo dos dez anos que tem sido utilizado, por ensaios de geradores reais.

A otimização por algoritmos genéticos é então empregada em conjunto com uma análise à metodologia, em que um pré-processamento para estabelecer as restrições e dimensionando o problema promove uma utilização consciente do software de otimização com a finalidade de conduzir à melhor configuração da máquina de forma rápida e eficaz.

1.2. Motivação

Nos últimos dez anos, a abertura do mercado de energia elétrica para pequenos produtores incentivou a indústria de cana de açúcar a investir na cogeração como segmento de negócio e torná-lo tão importante quanto à produção de álcool e açúcar. A regulamentação do mercado ainda deixa em aberto algumas das características necessárias para os geradores se conectarem com confiabilidade à rede. Para uma destas características, a relação de curto-circuito, tem-se observado o mercado assumindo algumas vezes uma atitude conservadora, solicitando valores muito mais altos do que outros mercados mundiais e outras vezes não se manifestando diretamente. O que existe para outros mercados em que há a exigência desta característica é uma tendência

para valores iguais ou maiores a 0,5, questionados nos últimos anos como conservadores.

1.3. Revisão Bibliográfica

O processo de cogeração, adotado na indústria sucroalcooleira, utiliza o bagaço de cana, resíduo no processo de produção de açúcar e álcool, como combustível das turbinas a vapor para acionar os geradores síncronos que produzem energia elétrica. A Figura 1 mostra um gerador montado na planta.



Figura 1 – Gerador Síncrono Acionado por Turbina

Usar conjuntos de turbinas e geradores síncronos para fornecer eletricidade à planta é uma forma eficiente de utilizar a energia que está disponível em forma de vapor. Ao vender o excedente desta energia para as concessionárias, o setor percebeu a oportunidade: além de aumentar a eficiência do sistema e reduzir custos de produção, a venda do excedente de energia para as concessionárias tornou-se um terceiro negócio.

A bioeletricidade, como é chamada a eletricidade gerada a partir da biomassa, produzida por pequenos produtores beneficiou-se da regulamentação do setor de energia pelo congresso brasileiro em 2004, quando foram removidos muitos dos obstáculos que diminuíam o interesse destes pequenos produtores a entrar no mercado de energia [5].

Nesta nova configuração, em que as unidades geradoras deixam de ser isoladas para se conectarem ao sistema, novas solicitações quanto

às características dos geradores assumem maior importância na especificação. Entre elas, uma das mais impactantes no dimensionamento do gerador é a relação de curto-circuito.

1.3.1. Plantas de Cogeração Sucroalcoleiras

Em anos recentes, a produção de energia elétrica tem se mostrado uma opção lucrativa de negócio para os produtores de álcool e açúcar que se utilizam da cogeração. Do ponto de vista da concessionária, considerando que a maior parte das usinas de álcool e açúcar se localiza no sudeste, o maior centro de consumo de energia do Brasil, e que o período de safra coincide com a diminuição do nível dos reservatórios das hidrelétricas devido ao período de secas, a cogeração pode se tornar uma alternativa de fornecimento que se traduz em maior flexibilidade do sistema [6].

1.3.2. Geradores Síncronos

Os conjuntos turbina-gerador são dimensionados para fornecerem energia elétrica tanto para a operação interna da usina como para a venda de energia elétrica para a concessionária. Desta forma, os geradores deste conjunto possuem características diferentes daqueles que operam isoladamente, fornecendo energia apenas para consumo interno.

Uma destas solicitações é a maior relação de curto-circuito (RCC), e mesmo que o aumento deste parâmetro signifique o aumento do volume do gerador [1], é esperado que nesta nova configuração o custo não aumente significativamente e não seja comprometido o rendimento da máquina. No Parágrafo 1.3.3, será avaliado como estas características se opõem.

Os geradores síncronos para esta aplicação possuem dois ou quatro polos, e são normalmente classificados conforme o tipo dos polos localizados em seus rotores: lisos ou salientes. Este trabalho será focado no desenvolvimento do cálculo analítico e otimização de um gerador síncrono de quatro polos, com rotor de polos lisos e potência aparente de 17,5 MVA. No entanto, os procedimentos de modelagem e de otimização são extensíveis para potências maiores, de até 62,5 MVA. A

Figura 2 mostra o aspecto do rotor da máquina tratada nesta dissertação, nela é possível verificar os aspectos gerais do rotor, como sua chapa, o eixo, o enrolamento de campo ou , o circuito de amortecimento e a excitatriz principal.

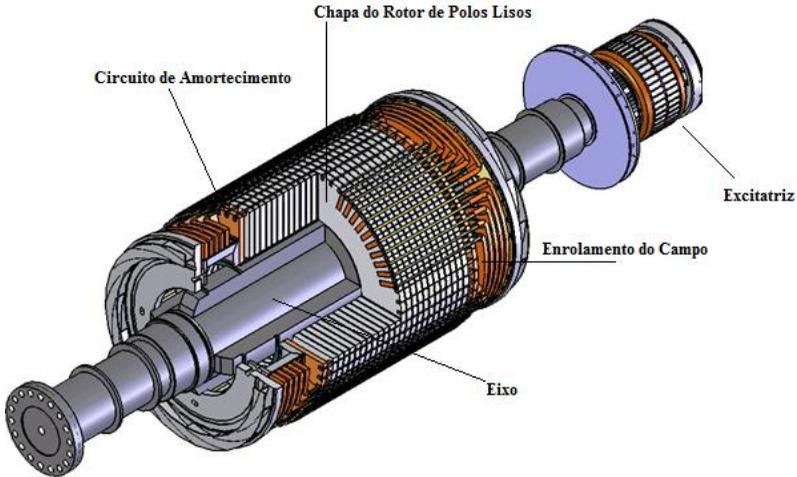


Figura 2 – Rotor de Quatro Polos e Polos Lisos

1.3.3. Relação de Curto-circuito (RCC) e Impactos no Projeto do Gerador

A relação de curto-circuito, RCC, é definida como a razão entre a corrente de excitação necessária para manter a tensão nominal nos terminais do gerador operando em vazio (I_{exc0}) e a corrente de excitação necessária para se alcançar a corrente nominal da máquina quando seus terminais estiverem curto-circuitados ($I_{exc cc}$) [3]:

$$RCC = \frac{I_{exc0}}{I_{exc cc}} \quad (1)$$

Este parâmetro também pode ser definido, conforme [3], como a razão inversa da reatância saturada do eixo direto (X_{ds}) em p.u.:

$$RCC = \frac{1}{Xds} \quad (2)$$

Características de desempenho, como o RCC, além de rendimentos e reatâncias, têm seus valores máximos ou mínimos regulamentados por normas técnicas, que são documentos publicados que estabelecem especificações e procedimentos destinados a assegurar a confiabilidade dos materiais, produtos, métodos ou serviços que pessoas utilizam diariamente [7]. Seguindo estes padrões, que podem ser nacionais ou internacionais, e em geral são acordados por contrato entre as partes antes do fornecimento do serviço ou produto, as indústrias asseguram aos clientes e consumidores uniformidade no entendimento das características desejadas.

A IEC (International Electrotechnical Commission) é uma instituição internacional, responsável pela publicação de uma das normas técnicas mais utilizadas para máquinas elétricas girantes: a IEC 60034-1, e também pela IEC60034-3, específica na regulamentação das características dos geradores síncronos acionados por turbinas, ou turbogeradores, como são comumente referenciados. Nesta última norma, é sugerido um valor mínimo de 0,4 para o RCC, embora em alguns mercados de energia, valores mais conservadores iguais ou maiores que 0,5 sejam recomendados. No caso específico da regulamentação brasileira, não existe definição clara sobre este valor, o parâmetro em geral é definido por norma ou conforme acordo entre cliente e o fabricante do gerador. Alguns clientes solicitam, por exemplo, para máquinas que operarão em paralelo com a rede, valores maiores do que 0,65, em uma clara referência aos valores praticados na década de 60, antes do surgimento dos reguladores digitais.

Isto possui impacto direto no dimensionamento do gerador síncrono e em seu custo. Um maior valor de RCC implica basicamente em entreferos ou em valores de saturação maiores. No primeiro caso, a mudança resultará no aumento no volume ativo do rotor da máquina e no segundo no comprometimento de seu rendimento.

Ao se considerar o aumento do entreferro, por exemplo, é necessária uma maior quantidade de Ampère-espiras para manter o mesmo fluxo do campo magnético, resultando em corrente de excitação maior e conseqüentemente maiores perdas no enrolamento de campo. Então, para se garantir a elevação de temperatura dentro da classe de isolamento do gerador, é preciso que se aumente o volume do material ativo da máquina: mais área de cobre para diminuir as densidades de

corrente, maior volume do rotor para se dissipar as perdas. Tal combinação fatalmente aumenta os custos do gerador.

De forma similar, com o incremento da saturação, aumentam-se as perdas magnéticas que, se não forem compensadas pelo aumento do volume ativo, impactará sobre a temperatura e sobre o rendimento da máquina: Um aumento do RCC de 0,4 para 0,5 tende a reduzir a eficiência de 0,02% a 0,04%, enquanto se aumenta o volume da máquina de 5 a 10% [1].

1.3.4. Efeito da Relação de Curto-Circuito no Desempenho do Gerador

Com custo e rendimento comprometidos, é necessário identificar o benefício que altos valores da relação de curto-circuito (RCC) traz para o gerador ou para o sistema ao qual ele está conectado. O efeito principal de um alto RCC é o aumento da estabilidade estática do gerador.

Definimos estabilidade estática como a propriedade do gerador permanecer sincronizado com a rede diante de lentas variações da potência mecânica entregue pela turbina ao gerador ou da potência elétrica ativa entregue ao barramento, se desconsiderarmos as perdas [1].

Podemos mostrar este efeito através da Equação de torque eletromagnético, considerando-se o gerador com rotor de polos lisos operando isoladamente [1]:

$$T_e \approx RCC \cdot E_0 \cdot U_F \cdot \text{sen } v \quad (3)$$

Onde:

- E_0 : Força Eletromotriz Gerada
- U_F : Tensão da Armadura por Fase
- v : Ângulo de Carga (Ângulo entre E_0 e U_F)

Observa-se em (3) que, para um mesmo torque elétrico T_e e dada corrente de campo representada pela força magnetomotriz gerada E_0 , ao se diminuir a tensão nos terminais U_F , um maior valor da relação de curto-circuito RCC permitiria um menor incremento do ângulo de carga v . Isto significa, em outras palavras, garantir o fornecimento de torques

com amplo limite de estabilidade para grandes valores de potência de turbina [8].

Mas existem certas restrições às vantagens representadas por geradores com altos valores de RCC, a Equação 3 representa o torque de um gerador isolado e portanto apenas sua reatância é considerada. Para a situação em que o gerador trabalha conectado com a rede, a reatância da linha de transmissão mais a reatância do transformador elevador, representadas por X_e , deve ser adicionada à reatância do eixo direto X_{ds} e a tensão de saída do gerador, substituída pela tensão da rede. Deste modo a equação de torque se modifica para o gerador conectado a uma rede infinita conforme [1]:

$$T'_e \approx E_0 \cdot U_{Rede} \cdot \frac{\text{sen } v'}{(X_{ds} + X_e)} \quad (4)$$

Onde:

v' : Ângulo de Carga (Ângulo entre E_0 e U_{Rede})

Ou seja, a contribuição positiva da elevação da relação de curto-circuito para a estabilidade é diminuída pelo efeito da reatância da linha à qual o gerador está conectado. Assim, quanto maior a reatância de linha, menor a influência da relação de curto-circuito. O gráfico da Figura 3 [8] ilustra bem este efeito, ele mostra o limite para estabilidade estática como uma função da reatância externa X_e , com o gerador operando na faixa de fator de potência 0,95 subexcitado com 0,85 p.u. de potência ativa.

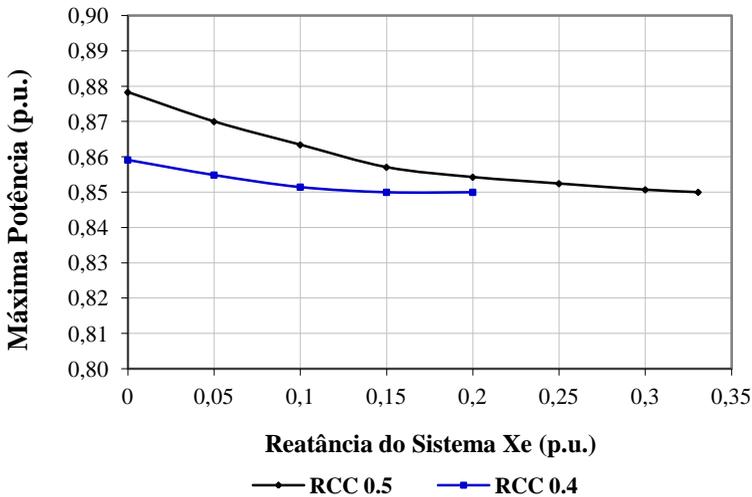


Figura 3 – RCC em Relação à Potência Máxima e à Reatância do Sistema

Existe a tendência à diminuição da relação de curto-circuito para os geradores síncronos acionados por turbinas a vapor. No mercado dos Estados Unidos, por exemplo, ela vem variando de 0,8 a 0,9, 70 anos atrás, 0,58 a 0,65 em 1960 e 0,4 a 0,5 nos dias de hoje [8]. Isto se deve principalmente à evolução dos reguladores de tensão. Modernos e mais rápidos, eles compensam a limitada estabilidade estática com a resposta mais rápida às variações lentas do sistema [8]. Utilizando-se menores relações de curto-circuito no projeto de geradores, obtêm-se menores volumes, perdas e custos.

2. TOPOLOGIA DO GERADOR

O gerador síncrono é composto de um estator denominado armadura, um rotor alimentado por corrente contínua, um sistema de excitação formado por uma excitatriz trifásica com roda de diodos ou por um sistema de anéis e escovas e uma carcaça com o sistema de ventilação, conforme mostrado em corte na Figura 4.

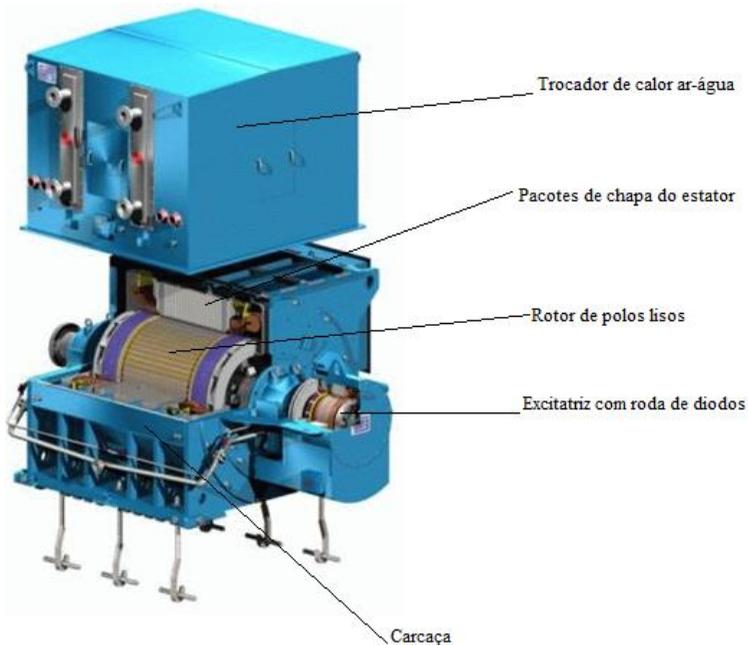


Figura 4 – Gerador Síncrono com Sistema de Ventilação através de Trocador de Calor Ar-Água

O estator é chamado de armadura porque fornece sustentação mecânica aos enrolamentos trifásicos distribuídos em ranhuras retangulares ao longo de seu perímetro interno. A Figura 5 ilustra um estator bobinado de uma máquina trifásica, fabricada pela WEG. Nesta Figura, observam-se os pacotes de chapas separados por canais de ventilação axiais (A), os tirantes cuja função é dar sustentação ao pacote

de chapas (B), o enrolamento distribuído internamente nas ranhuras (C), a cabeça de bobina do estator (D) e os suportes que lhe dão sustentação mecânica (E).

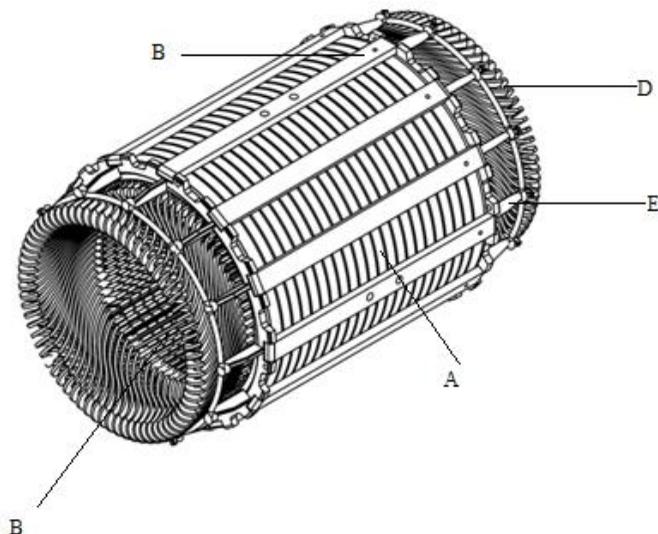


Figura 5 – Estator Bobinado de uma Máquina de Indução Trifásica

O rotor do gerador de polos lisos, com sua chapa mostrada na Figura 6, mostra suas duas ranhuras: as ranhuras do circuito de amortecimento, distribuídas uniformemente no perímetro externo do rotor e as ranhuras do enrolamento do campo que ocupam, no caso deste projeto específico, $2/3$ do passo polar.

Neste trabalho é considerado apenas o gerador em regime permanente, e para simplificar sua análise e sua otimização, o projeto dos circuitos de excitação e de amortecimento será mantido conforme projeto original. O rotor, por sua vez, terá liberdade de variar no diâmetro para que seja possível o controle das perdas joule do enrolamento de campo.

Neste trabalho é considerado apenas o gerador em regime permanente, e para simplificar sua análise e sua otimização, o projeto dos circuitos de excitação e de amortecimento será mantido conforme projeto original. O rotor, por sua vez, terá liberdade de variar no

diâmetro para que seja possível o controle das perdas joule do enrolamento de campo.

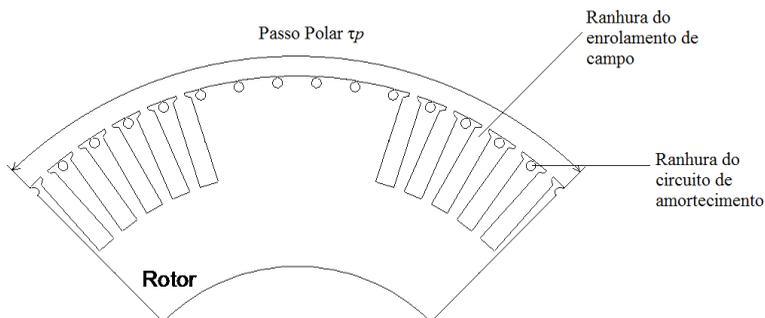


Figura 6 – Chapa do Rotor do Gerador Síncrono de Polos Lisos

Os itens que pertencem ao escopo mecânico são tratados indiretamente como restrições ao projeto eletromagnético. O sistema de refrigeração, por exemplo, impõe o limite às perdas máximas da máquina, e conseqüentemente estabelece a temperatura de operação do gerador. A frequência crítica define o comprimento do pacote do rotor e, portanto da máquina, enquanto que a velocidade periférica determina o material escolhido das chapas.

Os parágrafos a seguir mostram alguns dos aspectos construtivos mais relevantes no projeto de um gerador síncrono quatro polos, desenvolvidos através da consideração de critérios teóricos e alguns empíricos, resultados da experiência de manufatura, testes e utilização desse tipo específico de máquina elétrica.

2.1. Volume Ativo e Fator Esson

Para se determinar as principais dimensões de um gerador, seja para fins de projeto ou com o objetivo de otimizá-lo, é necessário estabelecer previamente a relação entre o volume ativo e as perdas do gerador para uma condição nominal de operação. O fator Esson, ou coeficiente C como é conhecido, é utilizado para máquinas elétricas em geral (corrente contínua, indução e síncronas), e fornece uma base firme de comparação em relação a máquinas existentes e fabricadas; seja entre

máquinas de um mesmo fornecedor ou entre máquinas de diferentes fornecedores.

Uma forma clara de expressar este fator é fazê-lo em função da capacidade magnética e elétrica da máquina. A capacidade magnética é definida em termos da máxima indução (B) e a capacidade elétrica pela densidade linear de corrente (As) [1]. A partir destas duas informações obtém-se a relação entre a máxima potência eletromagnética e seu volume ativo para a condição de operação nominal.

É possível expressar esta idéia partindo-se da definição da potência eletromagnética do gerador síncrono [1]:

$$P_{elm} = 3 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot (W_1 \cdot kenr1) \cdot \Phi \cdot I \quad (5)$$

Onde:

- W_1 : Espiras por polo por fase
 I : Corrente nominal do estator
 $kw1$: Fator de enrolamento
 Φ : Fluxo por polo definido como:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B\delta m \cdot \tau p \cdot Li \quad (6)$$

Com:

- $B\delta m$: Indução média no entreferro
 Li : Comprimento do ferro ideal

e o passo polar definido como:

$$\tau p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad (7)$$

Com:

- p : Número de pares de pólo
 D : Diâmetro interno do estator

Definindo a densidade linear como:

$$As = \frac{6 \cdot W_1 \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (8)$$

E substituindo-se as equações (6) e (8) em (5) se obtém:

$$P_{elm} = C \cdot V_{ativo} \cdot n_N \quad (9)$$

Com

n_N : Rotação Nominal do Rotor

O Volume Ativo definido como:

$$V_{ativo} = D^2 \cdot l_i \quad (10)$$

E o fator Esson por:

$$C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot k_{W1} \cdot As \cdot B\delta m \quad (11)$$

Esta abordagem vincula os limites magnéticos e elétricos da máquina ao seu volume ativo, para cada valor de potência. Embora cada fabricante utilize valores de sua própria experiência em projetos, parâmetros orientativos da indução e da densidade linear de corrente, em função da ventilação, são encontrados com facilidade em várias publicações, conforme os valores de densidades para geradores de polos lisos mostrados na Tabela 1 [5]:

Tabela 1- Valores de Densidades Típicos em Geradores de Polos Lisos para Sistema de Ventilação Indireta por Ar

| Descrição | Ab. | Valor | Unidade |
|----------------------------------|-----|----------|-------------------|
| Densidade Linear de Corrente | As | 30 - 120 | kA/m |
| Densidade de Corrente do Estator | j1 | 3 - 7 | A/mm ² |
| Densidade de Corrente do Rotor | j2 | 3 - 7 | A/mm ² |

Para a componente fundamental da indução no entreferro em geradores de polos lisos, $B\delta m$, o valor máximo se encontra entre 0,75 a 1,05 [T] [9]. Convém ressaltar que não é a indução no entreferro que estabelece o limite de indução na chapa, mas o contrário. Os limites de indução mostrados na Tabela 1 são conseqüências das induções na chapa que, por sua vez, dependem de seus diâmetros, da qualidade do aço utilizado, do número e dimensões de suas ranhuras. Todos definindo de forma indireta a saturação do circuito magnético.

2.2. Dimensionamento dos Diâmetros Interno e Externo do Rotor e Estator

O projeto do gerador inicia-se com o estabelecimento de seus diâmetros principais, ou seja, diâmetros externos e internos do estator e rotor, definidos por restrições ditadas pela padronização, por processos de fabricação ou limitações. O conjunto destes fatores restringe fisicamente o volume ativo máximo que uma máquina pode atingir para cada altura de ponta de eixo.

O diâmetro externo da chapa do estator, limitado pela carcaça, é padronizado conforme processos estabelecidos por cada fabricante enquanto que o diâmetro interno da chapa do rotor é limitado pelo eixo. As dimensões restantes, como o diâmetro interno do estator e o externo do rotor, são definidas a partir deste ponto inicial.

É possível sintetizar que a escolha destes diâmetros, para determinada condição nominal, é uma função de suas perdas máximas e do melhor aproveitamento das características magnéticas das chapas dentro de um volume permitido, que por sua vez é estabelecido conforme a capacidade expressa pelo fator Esson, determinado pelo carregamento elétrico e o magnético.

2.3. Materiais Magnéticos para as Chapas

As chapas do rotor e estator estão sujeitas a diferentes tipos de solicitações: para o estator deve ser considerado preferencialmente seu desempenho magnético, enquanto que, para o rotor, suas características mecânicas são mais exigidas. Por este motivo, são utilizados materiais

de qualidades diferentes com características específicas para cada função, e sua escolha deve ser equilibrada entre o menor custo e o melhor desempenho do gerador.

O campo alternado que atua no estator produz perdas magnéticas por histerese e de Foucault que exigem a utilização de chapas isoladas de pequena espessura e de aço silício de grãos não orientados.

No rotor, onde o campo é contínuo na operação em regime, suas chapas são pouco suscetíveis às perdas por histerese. Deste modo não é necessária a utilização de chapas de alta qualidade magnética, como as de aço silício utilizadas no estator, por exemplo. Por outro lado, sendo parte de uma peça que gira de 1500 a 3600 rotações por minuto, e considerando-se que à medida que se aumentam os diâmetros dos geradores e, portanto, de seus rotores, maiores são as forças atuantes, as solicitações mecânicas tornam-se o critério fundamental para o projeto da chapa do rotor.

Cada uma das situações acima mostra que a escolha do tipo de material deve considerar as condições de operação de seus componentes: rotor e estator. Cada escolha existirá um gasto associado: maiores rendimentos podem ser alcançados melhorando-se a qualidade da chapa do estator, mas o custo também aumenta. Do mesmo modo, não se pode aumentar indefinidamente o diâmetro do rotor: chapas aptas a suportar maiores tensões mecânicas não se comportam magneticamente bem, possuem menor permeabilidade e contribuem mais significativamente para a saturação.

2.4. Fabricação das Chapas

Escolhidos os diâmetros e os materiais das chapas, deve-se considerar como produzi-las, o processo varia dependendo de cada fabricante. Em geral, no entanto, quando se lida com produção em série e com o objetivo de minimizar custos, é comum que se utilize ferramentas de estampagem.

As chapas podem ser estampadas em uma peça única ou em segmentos. Diâmetros maiores que um metro requerem que segmentos sejam utilizados, o que influencia indiretamente o tipo do material utilizado do rotor.

Normalmente, para máquinas pequenas, em que a chapa do estator é uma peça única, uma mesma qualidade de material pode ser utilizada para o rotor e estator. Estampando-se ao mesmo tempo ambas

as chapas, na mesma bobina de aço, evita-se o desperdício de material. Pode-se argumentar que o uso de uma chapa com qualidade superior, normalmente utilizada nos estatores, geraria custos maiores. Contudo, deve-se ponderar que o se estampar o diâmetro interno e externo do estator, o miolo da chapa de aço silício do estator estampada acaba sendo descartado. Neste caso, o custo geral é diminuído pelo aproveitamento das sobras.

Para máquinas maiores, referindo-se às máquinas em que as chapas dos estatores são segmentadas, como no caso deste trabalho, não existe o problema de desperdício. As chapas segmentadas do estator podem ser arranjadas e estampadas de forma a aproveitar muito melhor a área da bobina de aço. A Figura 7 mostra um destes segmentos de chapa do estator estampado. Os segmentos do estator são múltiplos do número de fases, assim variam de 6 a 42 unidades [1] dependendo dos diâmetros envolvidos. Neste trabalho, por exemplo, são utilizados seis segmentos.

A chapa do rotor, por sua vez, é estampada ou cortada a laser, tomando-se o cuidado, conforme discutido no Parágrafo 2.3, de se escolher um material apto a suportar as tensões mecânicas que surgem devido à velocidade periférica de seu rotor.



Figura 7 – Segmento de Chapa do Estator

2.5. Ranhuras do Estator, do Campo e de Amortecimento

A ranhura do estator de um gerador de média tensão é retangular e aberta. Sua quantidade depende de questões construtivas relacionadas

ao número de segmentos e também das restrições de projeto devido ao número de polos e de fases. Suas dimensões definem a quantidade de cobre da máquina, o que influencia a potência ativa do gerador.

A Figura 8 mostra a ranhura típica de um gerador de quatro polos, com duas camadas. Cada camada é uma bobina formada por espiras, e cada espira composta por fios individualmente isolados dispostos em paralelo em sua largura, N_{cpl1} , e na altura, N_{cph1} . As bobinas são isoladas com espessura definida conforme a tensão nominal do gerador, $eib1$, e são separadas entre si por um isolante de fibra de vidro, h_{seb1} . E, para fechar a ranhura, há uma esteca que pode ser tanto de material magnético como não-magnético.

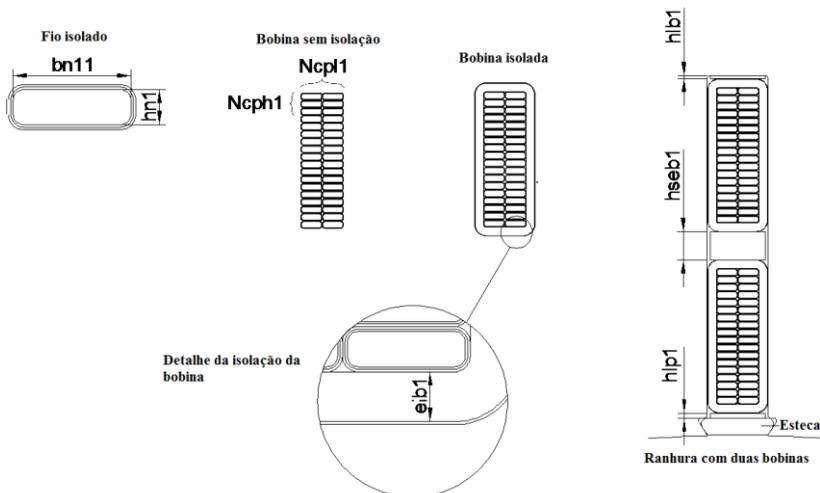


Figura 8 – Representação da Ranhura do Estator

Existem algumas questões relacionadas à quantidade ideal de ranhuras do estator. Para o caso de ventilação indireta, um número maior de ranhuras permite uma maior troca de calor entre o cobre e a chapa, o que assegura uma menor temperatura ao enrolamento. Por outro lado, quanto maior o número de ranhuras, maior o número de bobinas que deverá ser produzido e maior o custo do processo de fabricação.

Para geradores síncronos de polos lisos ainda há as ranhuras do enrolamento de campo e do circuito de amortecimento localizadas no rotor. A quantidade de ranhuras de amortecimento não deve coincidir com o número de ranhuras do estator, evitando interação direta entre

elas, e desta forma, prevenindo o aparecimento de ruído magnético. Considerando-se esta restrição, é escolhido o número de ranhuras do enrolamento de campo do rotor, respeitando-se a razão escolhida entre sua área ranhurada e sua expansão polar, γ .

Para ilustrar melhor a escolha do número ranhuras do estator e rotor, define-se a variável q como o número de ranhuras por polo por fase:

$$q = \frac{N}{2 \cdot p \cdot m} \quad (12)$$

Onde,

N : Número de ranhuras
 p : Pares de polo
 m : Número de fases

Para baixos números de polos ($2 \cdot p \leq 8$) o número q é um inteiro e maior do que 3, o que significa que o gerador não produzirá alto conteúdo harmônico. Valores típicos para geradores quatro polos são valores de q maiores do que 4.

No caso deste trabalho, o gerador padrão possui 72 ranhuras com $q = 6$. Para sua otimização, os valores de ranhuras testadas serão 72, 84, 96, 108 para valores de q de 6, 7, 8 e 9. A escolha do número mínimo de ranhuras estará condicionada ao máximo valor de largura da ranhura, enquanto o máximo valor de ranhuras ao mínimo valor do dente.

O número de ranhuras do circuito de amortecimento do rotor, conforme exposto nos parágrafos anteriores, não deve coincidir com número de ranhuras do estator. Como um critério, pode ser utilizado o número de ranhuras equivalente a $(q \pm 1)$, $(q \pm 2)$, sendo q o número de ranhuras por polos e por fase utilizadas no estator e definida na Equação 12.

Por exemplo, um gerador de 4 polos e com 72 ranhuras no estator possui $q = 6$, portanto o número de ranhuras do circuito de amortecimento poder ser 48 ($q - 2$), 60 ($q - 1$), 84 ($q + 1$) ou 96 ($q + 2$) ranhuras. No caso da máquina discutida nesta dissertação, são 60 ranhuras.

Obtido o número de ranhuras do circuito de amortecimento, o número de ranhuras para o enrolamento de campo deve respeitar a razão que varia de 0,6 a 0,8 entre a área ranhurada e a expansão polar do

gerador, conforme [3]. Neste trabalho, em que é considerado $\gamma = 2/3$, tem-se que o número de ranhuras para o circuito de excitação é de 40 ranhuras.

2.6. Enrolamento do Estator e Isolação

As ranhuras do estator abrigam o enrolamento principal do gerador síncrono. Este enrolamento é composto de bobinas ligadas de tal forma a constituir um enrolamento trifásico. A Figura 9 ilustra o aspecto real do enrolamento, com bobinas isoladas, localizadas nas ranhuras do estator.

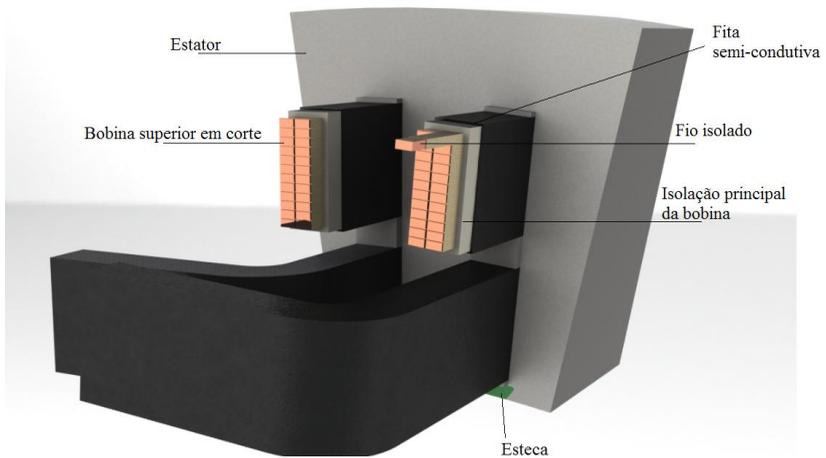


Figura 9 – Bobina Isolada do Estator com Separadores e Cunha

A isolação principal das bobinas do enrolamento do estator é definida pela tensão da máquina: quanto maior a tensão, maior sua espessura. Além disto, acima da tensão de fase 3800 V, deve ser acrescentada uma camada de fita semi-condutiva ao redor da bobina com o objetivo de prevenir danos à isolação por descargas parciais.

O aspecto real das isolações da bobina e dos fios, mostrados na Figura 8, podem ser vistos em detalhes na Figura 9. Neste trabalho, a espessura da isolação é considerada fixa com seu valor de acordo com critérios de projeto para a tensão nominal da máquina.

As bobinas são dispostas nas ranhuras em passos de enrolamento que cobrem o máximo de um passo polar, ou seja, com 72 ranhuras e 4 polos, o passo de enrolamento máximo ou passo pleno é 18. Em termos práticos, isto significa que a primeira metade da bobina é colocada na primeira ranhura e sua segunda metade na décima nona ranhura.

O passo pleno traz alguns incômodos relativos aos diversos harmônicos que o enrolamento produz, deformando a forma de onda do gerador e provocando perdas [3]. Para eliminá-los, o passo do enrolamento é encurtado variando de $2/3$ a $5/6$ do passo pleno, sendo que cada encurtamento diminui harmônicas específicas [3].

Considerando-se que quanto menor o passo, maior será a saturação, e, portanto, maior será a máquina, esta escolha é outro aspecto a ser analisado ao se projetar o gerador. Em geral, para geradores de quatro polos, o passo considerado é, na grande maioria das vezes, $5/6$, valor, o qual será considerado nesta dissertação.

2.7. Enrolamento do Rotor e Isolação

O enrolamento de campo, localizado no rotor da máquina estudada neste trabalho, é composto de quatro conjuntos de bobinas concêntricas, sendo cada conjunto de bobinas distribuído na metade das ranhuras ao redor de uma das quatro áreas de expansão polar (área sem ranhuras). Cada bobina é formada, no caso deste trabalho, por uma mesma quantidade de espiras, sendo cada espira composta de fios isolados de seção retangular por onde passa corrente contínua. A principal vantagem do enrolamento distribuído em um rotor de polos lisos é a qualidade da onda da força eletromotriz produzida, próxima a uma onda senoidal. Esta questão será analisada com mais detalhe no parágrafo 3.1.6.

3. PROJETO DO GERADOR EM REGIME PERMANENTE

O projeto de um gerador síncrono deve considerar fatores técnicos e fatores econômicos. Por fatores técnicos entendem-se as características eletromagnéticas e mecânicas que caracterizam cada máquina e a faz atender às expectativas de operação acordados com o cliente e que no mínimo atendam às normas relacionadas. Um bom projeto deve apresentar equilíbrio entre o volume de material ativo usado, desempenho e satisfazer demais parâmetros, o que torna o projeto um exercício de equilíbrio entre o aspecto econômico e o técnico.

O gerador síncrono estudado neste trabalho é um gerador trifásico padrão WEG, com estator e rotor com chapas laminadas, carcaça 900, quatro polos, rotor liso, de 17,5 MVA, 13,8 kV e 60 Hz. Será desenvolvido um cálculo de síntese utilizando equações clássicas para construir o modelo do gerador em regime, e a seguir ele será otimizado utilizando algoritmos genéticos. Apenas seu projeto eletromagnético será considerado, mas com o objetivo de torná-lo um projeto factível, sem entrar profundamente nas questões mecânicas, algumas das características do gerador, como diâmetro interno do rotor e o tamanho do pacote de chapas, serão consideradas como restrições.

3.1. Cálculo Clássico

Uma máquina elétrica operando em regime pode ser bem representada utilizando-se as equações clássicas encontradas na literatura [1], [2], [3] e [4]. A aproximação é adequada para o cálculo da reatância síncrona do eixo direto de um gerador de polos lisos em regime permanente. Para a elaboração do modelo de geradores em regime transitório ou de polos salientes, ao contrário, o ideal é a utilização da análise por elementos finitos ou, como solução intermediária e de resposta mais rápida, a utilização de um modelo de relutâncias.

O método de cálculo pode ser de síntese ou analítico. O método de síntese calcula, a partir dos dados de desempenho que se deseja obter do gerador, sua topologia, enquanto que no método analítico, os dados de desempenho do gerador podem ser determinados a partir de sua topologia. Neste trabalho será utilizado o cálculo analítico para, desta forma, cumprir o objetivo final de otimizar o gerador a partir da

topologia de uma máquina existente e não projetar uma máquina inteiramente nova.

A estrutura do cálculo analítico é mostrada na Figura 10.

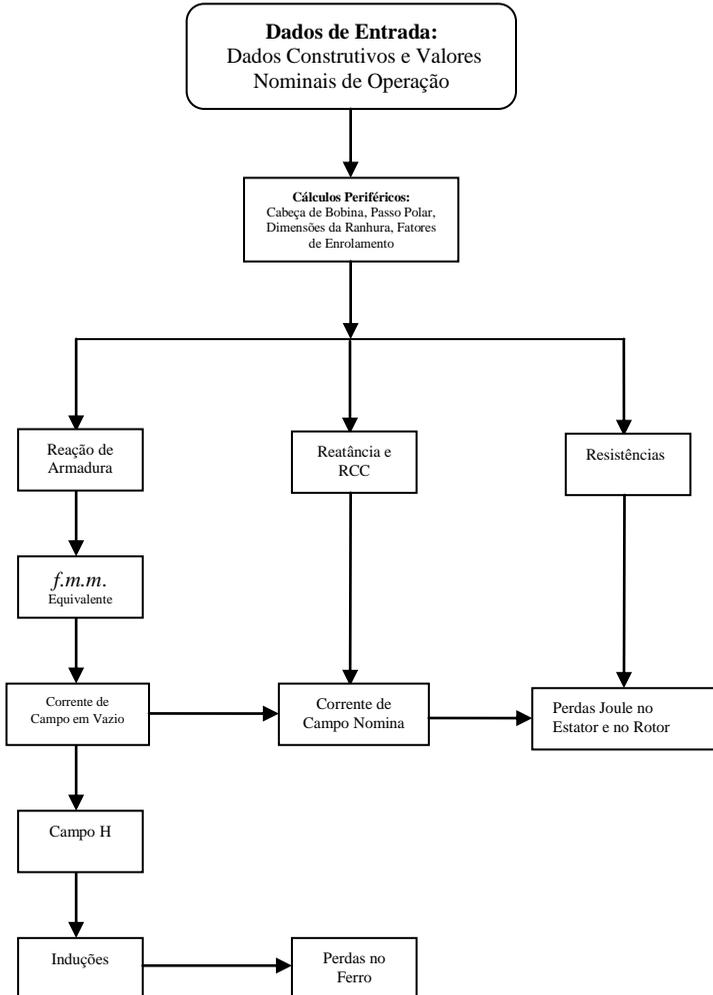


Figura 10 – Fluxograma do Cálculo do Gerador

A partir dos dados construtivos, tais como diâmetros, espiras e dimensão do entreferro, e dos dados de desempenho, como corrente de armadura e fator de potência, calculam-se as perdas joule e no ferro, reatâncias e induções.

O fluxograma da Figura 10 mostra a sequência de cálculo desenvolvida para este trabalho. Conforme mostrado, é uma estrutura simples com o objetivo conciso de fornecer o valor da reatância do eixo direto e a relação de curto-circuito, a partir da topologia do gerador e de seus valores nominais de operação.

Logicamente, a topologia do gerador considera as características que restringem elétrica e termicamente seu funcionamento. Tais parâmetros são calculados paralelamente e estabelecem os limites de alterações do projeto da máquina. Os principais parâmetros de avaliação da possibilidade técnica do projeto são principalmente as induções e as perdas Joule no estator e rotor.

Os parágrafos 3.1.1 a 3.1.10 desenvolvem os principais tópicos do fluxograma, sendo complementados com as equações do anexo A. A eficácia do cálculo será testada ao final deste capítulo, quando será validada a partir de um software de cálculo industrial de máquinas elétricas.

3.1.1. Fator de Enrolamento

O fator de enrolamento $kenr1$ é definido como o produto entre o fator de distribuição, $kd1$, e o fator de passo $k\tau1$.

$$kenr1 = kd1 \cdot k\tau1 \quad (13)$$

O fator de distribuição $kd1$ é a relação entre a soma vetorial das *f.e.m.* de um enrolamento distribuído e a *f.e.m.* de um enrolamento concentrado equivalente, utilizando o mesmo número de espiras [3]. Fisicamente este fator permite avaliar a utilização do enrolamento.

Para enrolamentos factíveis, o fator de distribuição pode ser definido como:

$$Kd1 = \frac{2 \cdot p \cdot \text{sen} \left[\frac{\pi}{6} \right]}{N1 \cdot \text{sen} \left[\frac{p \cdot \pi}{N1} \right]} \quad (14)$$

Com

$N1$: Número de Ranhuras do Estator

O fator de passo $k\tau 1$ é definido como:

$$k\tau 1 = \text{sen} \left[p \cdot \pi \cdot \frac{ds1 - 1}{N1} \right] \quad (15)$$

Onde,

$ds1$: Passo do Enrolamento Definido em Número de Ranhuras do Estator

Do mesmo modo como o fator de distribuição, o fator de passo também indica o aproveitamento do enrolamento. Complementando o que foi discutido no parágrafo 2.6, o enrolamento do estator pode ocupar o máximo de um passo pleno, definido conforme Equação 16. Contudo, isto implicaria no aparecimento de harmônicos indesejados, responsáveis por ruídos magnéticos e deformações na forma de onda.

O passo de um enrolamento depende do número de ranhuras e do número de polos. O passo pleno, em número de ranhuras, é definido como:

$$\tau = \frac{N1}{2 \cdot p} \quad (16)$$

Conforme já introduzido no item 2.6, o passo do gerador discutido neste trabalho é 5/6 do passo pleno.

3.1.2. Fator de Carter

A dimensão do entreferro do gerador síncrono tem grande influência no cálculo dos campos. O entreferro real que deve ser considerado é geralmente maior do que o entreferro físico devido à dispersão na cabeça do dente da ranhura do estator, causada pela sua abertura.

O valor real do entreferro deve ser considerado no projeto da máquina, para que, resultados próximos aos reais sejam alcançados no cálculo das induções. F. W. Carter forneceu uma solução teórica que é

utilizada desde o princípio do século 20 até hoje. Fazendo uma hipótese de uma ranhura de profundidade infinita e uma abertura de ranhura igual à sua largura, conforme Figura 11, chegou-se a:

$$kc1 = \frac{Taur}{Taur - \gamma1 \cdot \delta} \quad (17)$$

com,
Taur : Passo de Ranhura

E,

$$\gamma1 = \frac{2}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{b}{2 \cdot \delta} - \frac{2 \cdot \delta}{b} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2 \cdot \delta} \right)^2} \right] \quad (18)$$

Onde:

δ : Entreferro Físico
 b: Largura da Abertura da Ranhura

Ou na versão simplificada, que será utilizada neste trabalho [4]:

$$\gamma1 = \frac{\frac{b}{\delta}}{5 + \frac{b}{\delta}} \quad (19)$$

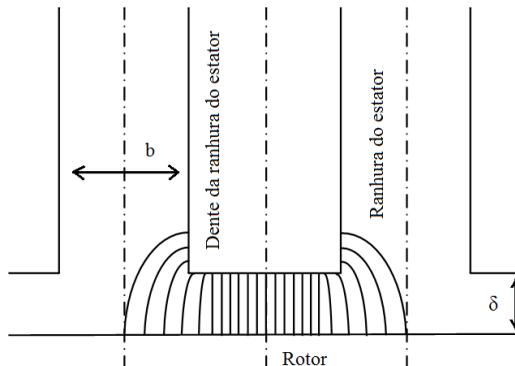


Figura 11 – Representação do Efeito de Dispersão

Utilizando-se a correção do entreferro mostrada, chegamos a valores confirmados na prática, ratificando a utilização da Equação 18 como uma aproximação razoável do efeito da variação de permeância no entreferro no cálculo das induções.

Neste trabalho será considerado apenas o cálculo das induções no eixo direto, e uma vez que a superfície dos rotores neste eixo possui apenas as ranhuras do enrolamento do circuito de amortecimento e estas são praticamente fechadas, será desprezado o fator de Carter das ranhuras do rotor.

Um efeito semelhante ao fator de Carter e sua influência no entreferro é encontrado na consideração do pacote do rotor e do estator em relação aos canais de ventilação que dividem seu pacote de chapa em subpacotes.

Neste caso, a interferência dos canais radiais, assim como o efeito da abertura das ranhuras, altera a permeância ao longo do comprimento da máquina, causando uma variação na indução que deve ser considerada no cálculo das reatâncias [2]:

$$L_i = \frac{L_{tp2} + L_{tp1}}{2} - N_{cv1} \cdot \gamma_c \cdot L_{cv} \quad (20)$$

Onde:

L_{tp2} : Comprimento total do pacote do rotor (incluindo os canais de ventilação)

L_{tp1} : Comprimento total do pacote do estator (incluindo os canais de ventilação)

N_{cv1} : Número de canais de ventilação

L_{cv} : Comprimento dos canais de ventilação

Com:

$$\gamma_c = \frac{\frac{L_{cv}}{\delta}}{5 + \frac{L_{cv}}{\delta}} \quad (21)$$

O efeito perceptível, mostrado na Equação 20, é que o comprimento do pacote se comporta como se fosse menor do que o comprimento real.

3.1.3. Fator de Saturação

Com a suposição de um gerador operando em vazio, em frequência e tensão nominais, a curva de saturação do gerador WEG, mostrada na Figura 12, mostra a relação entre o fluxo (proporcional ao valor da tensão) e a força magnetomotriz da máquina (proporcional à corrente de excitação).

Observa-se que, para pequenos valores do fluxo, a força magnetomotriz varia linearmente. Isto se deve ao fato de a máquina estar pouco saturada nesta situação e a força magnetomotriz do entreferro possuir maior significância.

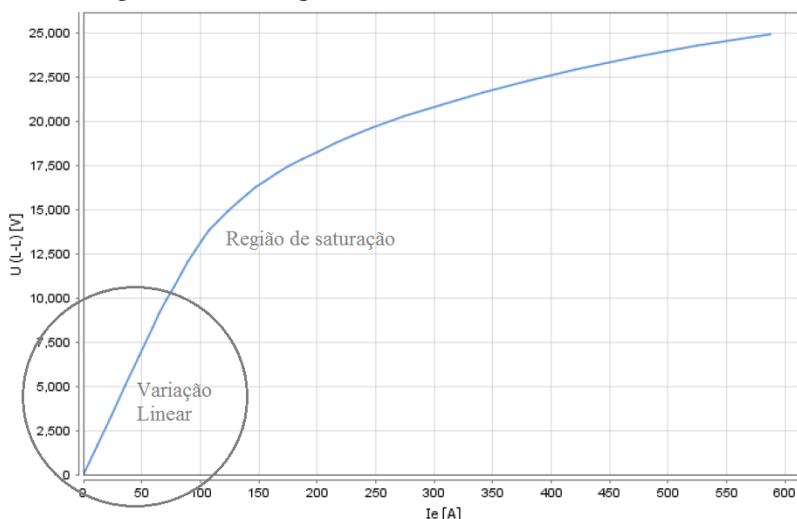


Figura 12 – Curva Característica do Gerador em Vazio

À medida que o fluxo aumenta, maiores são as perdas no ferro em função de sua relutância e maior é a parte do campo consumida na parte ativa do gerador em relação ao entreferro. Devido a este comportamento, conclui-se que a saturação depende da geometria e da qualidade das chapas do estator e rotor.

O fator de saturação, ou coeficiente de saturação, é utilizado para se avaliar o grau de saturação de uma máquina elétrica, sendo expresso pela relação entre a força magnetomotriz no entreferro em vazio (M_δ) e a força magnetomotriz total em vazio (M_0) conforme:

$$k_s = \frac{M_0}{M_\delta} \quad (22)$$

Pelas equações, é possível calculá-lo como a soma da força magnetomotriz equivalente para cada parte do circuito magnético (entreferro, dentes, coroas e sapata polar), pela força magnetomotriz calculada no entreferro.

Nesta dissertação, este valor será considerado fixo, e será assumido o valor do fator de saturação da máquina original. Esta suposição é válida devido ao escopo deste trabalho, em que pequenas variações na configuração do gerador são implementadas dentro de um comprimento de pacote de chapas e diâmetro externo fixos. Os erros decorrentes desta suposição serão tratados na discussão dos resultados.

3.1.4. Resistências, Reatâncias e RCC

A queda na tensão gerada nos enrolamentos de um gerador síncrono é um efeito de três fatores inerentes:

- Resistência;
- Reatância de dispersão;
- Reatância de magnetização.

A queda de tensão causada pela resistência é proporcional à corrente, e no caso dos geradores de médio porte, como o caso do gerador que está sendo discutido neste trabalho, pode ser desprezada sem alterar o resultado do projeto da máquina. No entanto, enquanto a queda de tensão causada pela resistência pode ser ignorada, a resistência não deve ser, pois suas contribuições com as perdas joule no estator, que definem a temperatura da máquina, são significantes e precisam ser levadas em consideração.

A corrente passando pelo enrolamento da armadura estabelece um fluxo ao redor das ranhuras e ao redor dos condutores na cabeça de bobina, ele é chamado de fluxo de dispersão por não contribuir com o fluxo principal da máquina. A reatância associada a este fluxo, conhecida como reatância de dispersão $X\sigma$, é responsável pela queda de tensão gerada pelos enrolamentos da máquina.

O cálculo desta reatância é bastante complexo devido à parte de dispersão na cabeça de bobina. Mas considerando que seus valores não variarão muito dentro das considerações deste trabalho, será usado o

mesmo valor de reatância de dispersão do gerador original: 0,15 pu. Deve-se ressaltar que a própria literatura sugere valores usuais para esta reatância entre 10% a 20% do valor da impedância base da máquina [10], como uma forma de simplificação do cálculo.

O terceiro fator a ser considerado é a reatância de magnetização, também conhecida como reatância de reação de armadura:

$$X_a = 2 \cdot m \cdot f \cdot \frac{\mu_0 \cdot D \cdot L_i}{k_c 1 \cdot \delta \cdot (1 + k_s)} \cdot \frac{W1^2 \cdot kenr1^2}{2 \cdot p} \quad (23)$$

Onde:

- m : Número de Fases
- f : Frequência em [Hz]
- μ_0 : Permeabilidade no Vácuo
- D : Diâmetro Externo do Rotor [m]
- L_i : Comprimento Ideal do Pacote de Chapas do Estator [m]
- $W1$: Espiras por Fase por Caminhos Paralelos
- $kenr1$: Fator de Enrolamento
- k_c : Fator de Carter
- δ : Entreferro [m]
- k_s : Fator de Saturação

Existem duas reatâncias de magnetização: a reatância de magnetização no eixo em quadratura q e a reatância no eixo direto d , as quais, para geradores com rotores de polos lisos possuem praticamente o mesmo valor. Este trabalho se concentrará na reatância do eixo direto, devido à sua relação com o tema central da otimização: a razão de curto circuito.

A reatância de magnetização é também conhecida como reatância de reação de armadura X_a , uma vez que a queda de tensão definida por ela se origina da tensão induzida no enrolamento do estator devido à corrente fluindo em seus enrolamentos. Tal reação produz um efeito deformante, magnetizante ou desmagnetizante do campo principal [3], dependendo do tipo da carga. Esta questão será tratada no parágrafo 3.1.5.

As reatâncias e a resistência estão ilustradas no circuito equivalente do gerador em regime permanente conforme Figura 13.

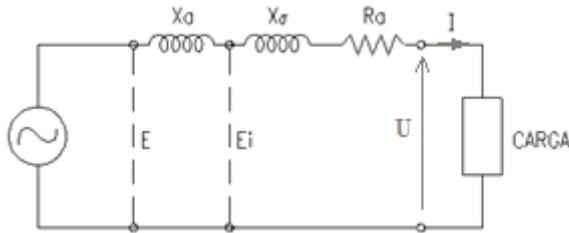


Figura 13 – Circuito Equivalente do Gerador em Regime

A reatância do eixo direto, ou reatância síncrona, é definida como a soma entre reatância de armadura e a reatância de dispersão. E para o inverso de seu valor na condição saturada conforme Equação 1, tem-se a relação de curto-circuito (RCC).

3.1.5. Reação da Armadura

A corrente induzida no enrolamento estatórico I produz uma força magnetomotriz, cuja fundamental, chamada força magnetomotriz de reação de armadura M_a , gira sincronizado com o campo do rotor. Seu valor, conforme Equação 24, é calculado usando o módulo da fundamental da f.m.m. equacionada para um enrolamento trifásico [3]:

$$M_a = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W1 \cdot kenr1}{p} \cdot I \quad (24)$$

Esta força magnetomotriz de reação de armadura afeta a força magnetomotriz produzida pelo campo principal M_e , podendo aumentá-la, diminuí-la ou distorcê-la dependendo da natureza da carga alimentada pelo gerador.

O ângulo entre a corrente do estator I e a força eletromotriz (f.e.m.) induzida no enrolamento do estator E_i , designado pela letra grega φ , é mostrado abaixo para o caso de geradores nas condições limite:

Carga alimentada puramente resistiva: $\varphi = 0$;

Carga alimentada puramente indutiva: $\varphi = +\frac{\pi}{2}$;

Carga alimentada puramente capacitiva: $\varphi = -\frac{\pi}{2}$.

Enquanto cargas resistivas distorcem o campo do rotor, cargas puramente indutivas produzem uma reação de armadura de natureza desmagnetizante, ou seja, tende a diminuir a força magnetomotriz do campo do rotor. Para compensar este efeito é necessário aumentar a corrente do campo do rotor.

Cargas puramente capacitivas, ao contrário, possuem efeito magnetizante que tendem a aumentar a intensidade da força magnetomotriz, sendo necessário compensá-la com a diminuição da corrente de campo.

Os casos limites são didáticos, mas em uma situação real a carga é uma composição dos tipos acima, o mais comum é uma combinação de cargas resistivas e indutivas:

$$0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}.$$

3.1.6. Força Magnetomotriz e Corrente de Campo em Vazio

O enrolamento do campo de um gerador de polos lisos está distribuído em ranhuras no rotor que ocupam, no caso do gerador desta dissertação, $2/3$ de sua circunferência, com o $1/3$ restante constituindo a expansão polar do gerador: *Genp*. A razão entre a área sem ranhuras e o passo polar inteiro é definido pela letra grega γ .

Como o enrolamento é distribuído, o formato da onda resultante tem a forma de degraus devido às ranhuras, com uma base no topo devido à expansão polar. Ignorando a influência das ranhuras, pode-se assumir que a f.m.m. está distribuída ao longo da periferia do rotor de polos lisos conforme uma função de onda trapezoidal.

Desenvolvendo a curva trapezoidal da f.m.m., conforme Figura 14, em uma série de Fourier é obtida a Equação:

$$M = M_{e1} \cos a + M_{e3} \cos 3 \cdot a + M_{e5} \cos 5 \cdot a + \dots \quad (25)$$

Com a amplitude da harmônica de ordem v -ésima sendo:

$$M_{ev} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} M \cdot \cos va \, da \quad (26)$$

Resolvendo a integração, tem-se:

$$M_{ev} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{M_e}{\gamma} \cdot \frac{1}{v^2} \cdot \text{sen} \frac{v\pi}{2} \cdot \text{sen} \gamma v \cdot \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

Com M_e representando a força magnetomotriz do enrolamento de campo produzido por um polo conforme:

$$M_e = N_b \cdot I_e \quad (28)$$

Onde

I_e : Corrente de campo;

N_b : Número de espiras por polo

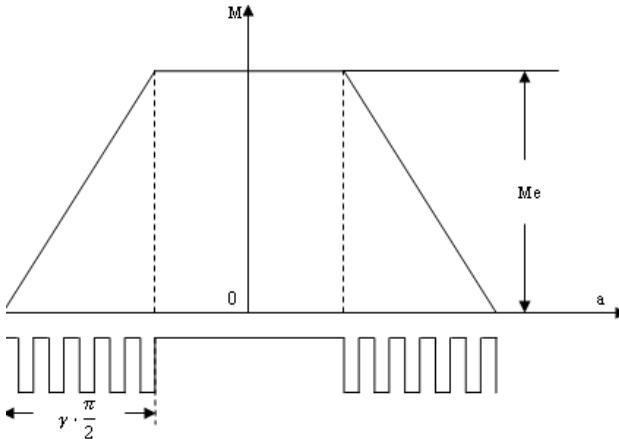


Figura 14 – Excitação de uma Máquina Síncrona de Polos Lisos

Para a harmônica fundamental ($v = 1$), é obtida a expressão:

$$M_{e1} = kf \cdot M_e \quad (29)$$

Onde a constante kf definida como fator de forma do campo de excitação conforme:

$$kf = \frac{8 \cdot \text{sen} \frac{\gamma \cdot \pi}{2}}{\pi^2 \cdot \gamma} \quad (30)$$

Considerando-se o caso do gerador de polos lisos, com o entreferro uniforme e o circuito magnético não saturado, e, portanto, os fluxos proporcionais às forças magnetomotrizes que os criam, procura-se uma força magnetomotriz de campo equivalente, M_{ee} , que gere o mesmo fluxo que a onda fundamental de reação de armadura, M_a , [3] conforme:

$$M_a = kf \cdot M_{ee} \quad (31)$$

Com,

$$M_{ee} = N_b \cdot I_{ee} \quad (32)$$

Para se calcular a corrente de campo I_{ee} , equivalente à corrente de armadura I , substitui-se a Equação 24 na Equação 32:

$$M_{ee} = N_b \cdot I_{ee} = kA \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{W1 \cdot kenr1}{p} \cdot I \quad (33)$$

Onde:

$$kA = \frac{1}{kf} \quad (34)$$

A corrente de campo obtida I_{ee} , é a corrente de campo necessária para se alcançar a corrente nominal na característica de curto circuito, ou seja, $I_{exc\ cc}$:

$$I_{ee} = I_{exc\ cc} \quad (35)$$

A partir da corrente $I_{exc\ cc}$, obtem-se, pela Equação 1, a corrente de campo na condição a vazio:

$$I_{exc0} = RCC \cdot I_{exc\ cc} \quad (36)$$

3.1.7. Diagramas Vetoriais e Corrente de Campo Nominal

Obtida a corrente de campo em vazio, calcula-se a corrente de campo na condição nominal analisando o comportamento do gerador pela representação de seus diagramas vetoriais de tensão e corrente. Para o caso do gerador de polos lisos, caso estudado neste trabalho, o diagrama de tensões é traçado a partir do circuito equivalente mostrado na Figura 13.

Sua representação vetorial das f.m.m. é iniciada traçando-se o vetor de tensão nos terminais do gerador em V/fase, \mathbf{U} e então a corrente de armadura \mathbf{I} , atrasada por um ângulo φ , conforme Figura 14.

Supondo-se que a máquina se encontra em um estado não saturado, os fluxos produzidos pelas forças magnetomotrizes individuais são diretamente proporcionais a estas f.m.m.; sendo admissível considerar os campos e as f.m.m. separadamente. Assim o princípio de superposição é aplicado aos campos e, portanto às forças eletromotrizes induzidas e às quedas de tensão [11].

As quedas de tensão $\mathbf{I} \cdot R_a$ e $\mathbf{I} \cdot X_\sigma$ são adicionadas vetorialmente à tensão \mathbf{U} , conforme mostrado pela Figura 15, resultando na força eletromotriz induzida representada pelo vetor OE_i (o termo tensão no entreferro é frequentemente associado a esta força eletromotriz). Esta f.e.m. é induzida pelo fluxo resultante Φ produzido pela força magnetomotriz resultante M_r , adiantado de \mathbf{E}_i em 90° .

Em seguida, ainda conforme Figura 14, é traçado o vetor da força magnetomotriz do campo principal do gerador, \mathbf{M}_e , somando-se a força magnetomotriz f.m.m. resultante, \mathbf{M}_r , com a força magnetomotriz de reação de armadura \mathbf{M}_a . O vetor \mathbf{M}_e está adiantado em 90° em relação à força eletromotriz induzida do campo \mathbf{E} .

A força magnetomotriz de reação de armadura \mathbf{M}_a é definida como resultante de uma força eletromotriz induzida \mathbf{E}_a que diminui a f.e.m. do campo \mathbf{E} vetorialmente. A f.e.m. \mathbf{E}_a pode ser expressa como sendo o produto da corrente de armadura e a reatância de magnetização, que também é referida como reatância de reação de armadura.

O diagrama vetorial de tensão completo do gerador síncrono de polos lisos é então mostrado conforme Figura 15:

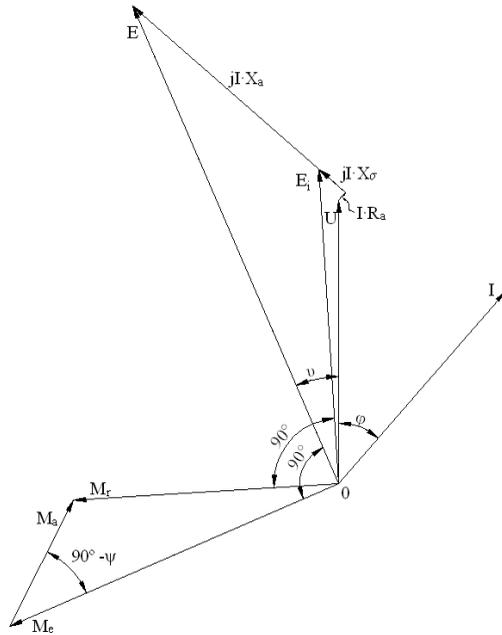


Figura 15 – Diagrama Vetorial de Tensão

O vetor $0E$, pelo diagrama da Figura 16, representa a grandeza da força eletromotriz induzida devido à corrente de campo ou à força magnetomotriz do campo. Representando o diagrama em uma equação tem-se:

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} + r_a \cdot \mathbf{I} + j(X_a + X_\sigma) \cdot \mathbf{I} \quad (37)$$

A queda de tensão provocada pela resistência de armadura pode, conforme discutido no parágrafo 3.1.4, ser desprezada, tornando possível reescrever a Equação 37 como a Equação 38 e redesenhar o diagrama de tensão conforme Figura 16, para na sequência, chegar-se ao diagrama de corrente.

$$\mathbf{E} = \mathbf{U} + j(X_d) \cdot \mathbf{I} \quad (38)$$

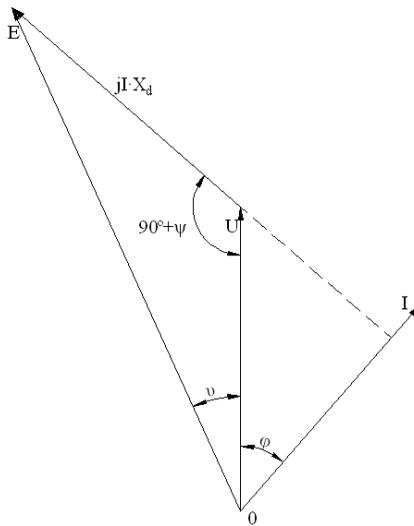


Figura 16 – Diagrama Vetorial de Tensão simplificado

3.1.8. Diagrama Vetorial de Corrente e Corrente de Campo Nominal

Com o diagrama vetorial de tensão simplificado, mostrado na Figura 15, é possível chegar ao diagrama vetorial de corrente. A vantagem do diagrama vetorial de corrente é chegar à corrente de campo nominal.

Dividindo-se o diagrama vetorial de tensão simplificado por jX_d , e o redesenhando como o diagrama de corrente mostrado na Figura 17, é obtida a corrente de armadura de curto-circuito sustentada em vazio:

$$I_{exc0} = \frac{U}{X_d} \quad (39)$$

E a corrente de armadura em p.u. no ponto nominal de operação:

$$I = \frac{E}{X_d} \quad (40)$$

Para uma máquina não saturada, pode-se considerar a proporcionalidade:

$$\frac{E}{X_d} \propto \frac{I_e}{X_d} \quad (41)$$

Assim, é possível obter a corrente de excitação utilizando o gráfico mostrado na Figura 17 em valores em p.u..

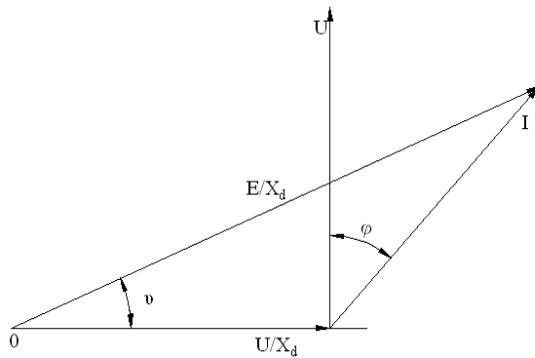


Figura 17 – Diagrama Vetorial de Corrente

O ângulo φ é uma condição solicitada de projeto e U/X_d em p.u. é $1/X_d$, ou seja, a relação de curto-circuito determinada pela topologia da máquina conforme capítulos anteriores.

A corrente de campo pode ser avaliada graficamente através da Figura 17. Dimensionalmente, o vetor E/X_d é proporcional à corrente de campo nominal para o caso da máquina não saturada [11]. Para a condição saturada, é adicionado o fator de saturação ks , e a corrente de campo nominal pode ser descrita como:

$$Inf_{pu} = \sqrt{[RCC + \text{sen } \varphi]^2 + (\text{cos } \varphi)^2} \cdot (1 + ks) \quad (42)$$

O diagrama de corrente completo, com os eixos devidamente identificados, é mostrado na Figura 18, com as correntes ativas e

reativas em p.u.. As correntes para demais condições de carga, além da condição nominal, podem ser encontradas através do ângulo de carga ν , sendo, desta forma, possível determinar se a máquina encontra-se sub ou sobre-excitada. Trata-se apenas de uma melhoria do gráfico da Figura 17, sem acrescentar mais informações, somente com o objetivo de esclarecer o comportamento do gerador.

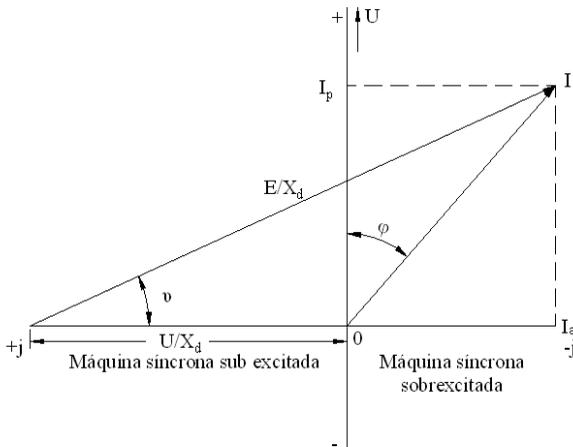


Figura 18 – Diagrama Vetorial de Corrente com os Eixos Identificados

3.1.9. Induções

As induções em um gerador síncrono são fatores que limitam seu projeto e, conforme exposto no Capítulo 2 desta dissertação, definem sua capacidade magnética. Valores máximos de induções no ferro são amplamente encontrados na literatura, e comparados com os valores calculados analiticamente, são suficientes para a definição magnética da máquina calculada em regime. No caso da análise em regime transitório, as equações clássicas fornecem informações deficientes e, em geral, o cálculo por elementos finitos é necessário. Nas situações quando a rapidez é relevante, outros modelos, como o de relutância [12], podem ser empregados como uma solução rápida e de efeito intermediário.

As induções no gerador síncrono tratado neste trabalho são calculadas a partir do campo existente no entreferro para pontos

localizados ao longo do caminho magnético da máquina passando pelo rotor e estator. São eles: dentes da ranhura do estator (base, meio e topo), coroa do estator, entreferro, polo e coroa do rotor.

Em primeiro lugar é calculado o campo no entreferro utilizando-se a corrente de campo em vazio. O campo no entreferro depende do número de bobinas no rotor, do entreferro e da corrente de campo. Pode-se expressá-lo através da Equação 43, onde se observa a utilização do fator de Carter com o entreferro, para efetuar sua correção devido ao efeito de abertura das ranhuras.

$$H\delta = \frac{I_{exc0} \cdot N_b \cdot Z2}{\delta \cdot kc} \quad (43)$$

Onde:

I_{exc0} : Corrente de campo em vazio

N_b : Número de bobinas em um polo do rotor

$Z2$: Número de espiras do rotor

Com o campo, calcula-se a indução no entreferro e então as induções nos dentes e nas coroas (estator e rotor) através das relações geométricas das partes em relação ao entreferro. A Figura 19 ilustra as dimensões principais das ranhuras e dos dentes do estator, que são utilizadas nos cálculos de induções.

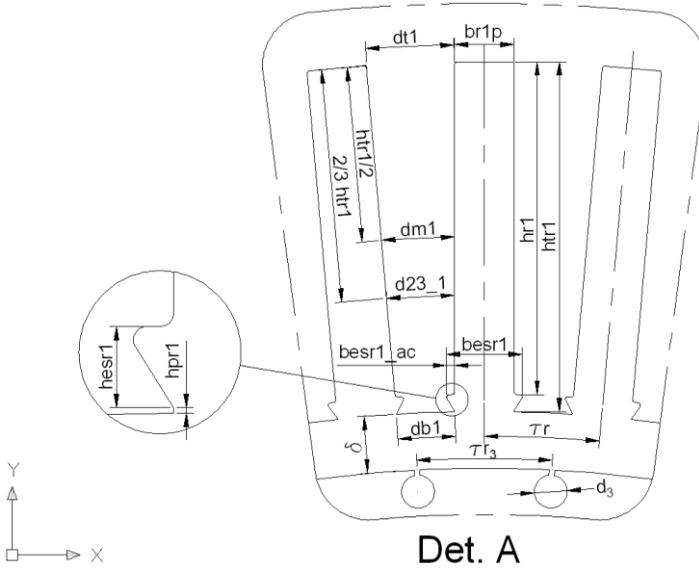


Figura 19 – Relação de Dimensões da Ranhura do Estator

Considerando,

τr : Passo de ranhura do estator;

τp : Passo do polo

$\tau r3$: Passo da ranhura de amortecimento

$db1$: Espessura na base do dente ranhura do estator

$dm1$: Espessura no meio do dente da ranhura do estator

$dt1$: Espessura no topo do dente da ranhura do estator

$d2_{31}$: Espessura em 2/3 da altura do dente da ranhura

$d3$: Diâmetro da ranhura de amortecimento do rotor

$kemp$: Fator de empilhamento de pacote

Li : Comprimento ideal - pacote de chapas, considerando a dispersão resultante do efeito dos canais de ventilação.

lfe : Comprimento do pacote de chapas de aço silício

e ,

$kred$: Fator de redução devido à dispersão dos canais de ventilação

$$kred = \frac{Li}{lfe \cdot kemp} \quad (44)$$

A partir da Figura 19, obtêm-se as principais induções para o gerador:

Indução máxima no entreferro:

$$B\delta_{max} = \mu_0 \cdot H\delta_0 \quad (45)$$

Indução média no entreferro:

$$B\delta_m = \frac{2}{\pi} \cdot B\delta_{max} \quad (46)$$

Indução na base do dente do estator:

$$Bd_{10Db} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau r}{db1} \cdot kred \quad (47)$$

Indução no meio do dente do estator:

$$Bd_{10Dm} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau r}{dm1} \cdot kred \quad (48)$$

Indução no topo do dente do estator:

$$Bd_{10Dbt} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau r}{dt1} \cdot kred \quad (49)$$

Indução em 2/3 do dente do estator:

$$Bd_{102_3} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau r}{d2_31} \cdot kred \quad (50)$$

Indução na coroa do estator eixo direito:

$$Bc_{10} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau p}{hc1} \cdot kred \quad (51)$$

Indução no dente da ranhura de amortecimento no eixo direito:

$$Bd_{20D} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau r3}{d3} \cdot kred \quad (52)$$

Indução na coroa do rotor:

$$B_{c20} = B\delta_{max} \cdot \frac{\tau_p \cdot Gen_p}{2 \cdot hc2} \cdot kred \quad (53)$$

3.1.10. Equacionamento das Perdas Elétricas e Magnéticas

Existem três tipos de perdas a ser consideradas no cálculo do gerador tratado neste trabalho: perdas mecânicas, perdas no cobre e perdas no ferro.

As perdas mecânicas devem-se às perdas por atrito nos mancais e perdas devido à ventilação. Na proposta deste trabalho não são consideradas alterações ou otimizações relacionadas a estes dois parâmetros, sendo considerados invariáveis. As perdas no cobre e no ferro serão consideradas, pois impactam diretamente na otimização relacionada à relação de curto-circuito, proposta nesta dissertação.

As perdas nos enrolamentos do estator e do rotor devido à passagem de corrente são denominadas perdas Joule. Elas permitem avaliar e prever a temperatura dos enrolamentos para determinada condição de ventilação.

São calculadas através das Equações 54 e 55, respectivamente para o estator e rotor.

$$P_{j1} = 3 \cdot r_{1q} \cdot I^2 \quad (54)$$

Sendo,

r_{1q} : Resistência na temperatura de operação nominal do enrolamento de uma das fases da armadura.

I : Corrente de fase do enrolamento do estator .

$$P_{j2} = r_{2q} \cdot I_f n^2 \quad (55)$$

Com,

r_{2q} : Resistência do enrolamento do rotor

$I_f n$: Corrente de campo nominal

As perdas no ferro dividem-se principalmente em perdas por histerese e perdas por corrente de Foucault e localizando-se significativamente no estator devido à ação de campos variáveis. Pode-se aprofundar sobre a natureza destas perdas e sua teoria na bibliografia indicada nesta dissertação. Neste trabalho, serão utilizadas as fórmulas práticas conforme [3].

As perdas totais no ferro são divididas em perdas na coroa e perdas no dente do estator devido ao volume e induções diferenciados nas duas partes.

As perdas no ferro da coroa do estator são dadas por:

$$P_{fc} = k_{perC1} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (Bc10)^2 \cdot G_{coroa} \quad (56)$$

Com,

k_{perC1} : Fator de correção prático da indução na coroa

β : Expoente com valor 1,2

f : Frequência de operação

G_{coroa} : Peso da coroa do estator

As perdas do no ferro dente podem ser determinadas a partir de:

$$P_{fd} = k_{perD1} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (Bd102_3)^2 \cdot G_{dente} \quad (57)$$

Com,

k_{perD1} : Fator de correção prático da indução no dente

G_{dente} : Peso do dente do estator

Assim, as perdas no ferro totais são:

$$P_{fe} = P_{fc} + P_{fd} \quad (58)$$

3.2. Validação da Metodologia Proposta

Para validar a metodologia proposta, o mesmo gerador foi projetado utilizando o software comercial VPSYN [13].

VPSYN é um software comercial desenvolvido pela Universidade de Leibniz para o cálculo de máquinas síncronas de polos lisos em regime, sendo utilizado por diversas empresas fabricantes de máquinas elétricas ao redor do mundo. No Brasil, este programa é empregado há mais de dez anos pela WEG Máquinas, que vem validando os resultados de projeto de geradores síncronos através de ensaios ao longo deste tempo.

As equações apresentadas neste capítulo e no anexo A foram implementadas em uma planilha Excel, onde foram considerados os mesmos dados de um projeto de um gerador WEG padrão, para que, desta forma, seja possível comparar os resultados do cálculo desenvolvido neste trabalho com a saída do programa VPSYN. Estes valores são listados na Tabela 2 e os dados construtivos nas Tabelas 3 e 4.

A Tabela 2 mostra os dados de entrada do gerador WEG padrão, uma máquina síncrona típica acionada por turbina de vapor, para aplicação em cogeração na indústria de cana de açúcar, com altura da ponta de eixo de 900 mm e ventilação utilizando trocadores de calor ar-água.

Tabela 2 – Dados do Gerador Síncrono

| Descrição | Ab. | Valor | Unidade |
|-----------------------------------|------------|--------------|----------------|
| Potência Aparente | P | 17,5 | MVA |
| Carcaça – Altura da Ponta de Eixo | | 900 | mm |
| Número de Polos | 2P | 4 | |
| Tensão de Linha | U | 13,8 | kV |
| Fator de Potência | FP | 0,8 | |
| Frequência | f | 60 | Hz |
| Rotação | n | 1800 | rpm |
| Velocidade Angular | ω | 377 | rad/s |
| Número de Fases | m | 3 | |
| Corrente por Fase | I | 732,1 | A |
| Elevação de Temperatura | DT | 80 | C |

As Tabelas 3 e 4 mostram os dados construtivos da máquina. Estes são os valores utilizados como entrada para as equações do cálculo analítico do gerador, desenvolvidas neste Capítulo 3 e no Anexo A.

Tabela 3 – Dados dos Enrolamentos do Gerador

| Enrolamento do Estator | | | |
|--|-------|-------|---------|
| Descrição | Ab. | Valor | Unidade |
| Número de Caminhos do Paralelos | Ncp1 | 2 | |
| Passo do Enrolamento | ds1 | 16 | |
| Número de Espiras por Ranhura | Z1 | 6 | |
| Condutores Paralelos na Largura | Ncph1 | 2 | |
| Condutores Paralelos na Altura | Ncpl1 | 2 | |
| Altura de um Condutor | hn1 | 3,35 | mm |
| Largura de um Condutor | bn11 | 7,1 | mm |
| Separação de Bobinas | hseb1 | 8 | mm |
| Altura do Isolante de Preenchimento | hip1 | 1,2 | mm |
| Altura do Isolante do Fundo de Ranhura | hib1 | 1 | mm |
| Espessura da Isolação do Condutor | eic1 | 0,44 | mm |
| Espessura da Isolação da Bobina | eib1 | 3,17 | mm |
| Distância das Bobinas | eeb1 | 8 | mm |
| Comprimento da Parte Reta | Lm1 | 55 | mm |
| Enrolamento do Rotor | | | |
| Número de Caminhos Paralelos | Ncp2 | 1 | |
| Número de Espiras por Ranhuras | Z2 | 30 | |
| Condutores Paralelos na Altura | Ncph2 | 1 | |
| Condutores Paralelos na Largura | Ncpl2 | 2 | |
| Altura de um Condutor | hn2 | 2,8 | mm |
| Largura de um Condutor | bn2 | 10 | mm |
| Isolante de Fechamento da Ranhura | hseb2 | 13 | mm |
| Altura da Isolação na Base da Ranhura | hib2 | 1 | mm |
| Espessura da Isolação do Condutor | eic2 | 0,385 | mm |
| Espessura da Isolação da Ranhura | eir2 | 0,72 | mm |
| Distância entre Bobinas | eeb2 | 12 | mm |
| Comprimento da Parte Reta da Bobina | Lm2 | 75 | mm |

Tabela 4 – Dados das Chapas do Gerador Síncrono

| Descrição | Ab. | Valor | Unidade |
|--|------------|--------------|----------------|
| Diâmetro Externo do Estator | De1 | 1610 | mm |
| Diâmetro Interno do Estator | Di1 | 1000 | mm |
| Entreferro | δ | 21 | mm |
| Diâmetro Externo do Rotor | De2 | 958 | mm |
| Número de Ranhuras do Estator | N1 | 72 | |
| N° de Ranhuras do Circuito de Campo | N2 | 40 | |
| N° de Ran. do Circ. de Amortecimento | N3 | 60 | |
| Pacote de Chapas do Estator com Canais | Ltp1 | 1130 | mm |
| Pacote de Chapas do Rotor com Canais | Ltp2 | 1130 | mm |
| Largura dos Canais de Ventilação | Lcv | 10 | mm |
| N° de Canais de Ventilação do Estator | Ncv1 | 18 | |
| N° de Canais de Ventilação do Rotor | Ncv2 | 18 | |

Os resultados da comparação entre o cálculo industrial VPSYN [13] e o cálculo desenvolvido neste trabalho, com os dados de entrada conforme Tabelas 2, 3 e 4 além das condições e equacionamentos discutidos nos parágrafo dos Capítulos 2, 3 e no Anexo A, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre a Saída de Dados do Cálculo Analítico Desenvolvido e a Saída do Cálculo Industrial VPSYN [13]

| COMPARAÇÃO: DADOS CÁLCULO x VPSYN | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------|--|----------------------------------|--------------------------|---------------|
| | DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO | UNIDADE | | SIMULAÇÃO - CÁLCULO DESENVOLVIDO | GERADOR ORIGINAL - VPSYN | DIFERENÇA [%] |
| TOPOLOGIA DO GERADOR | DIA ESTATOR | [mm] | | 1000 | 1000 | |
| | DIA ROTOR | [mm] | | 958 | 958 | |
| | ENTREFERRO | [mm] | | 21 | 21 | |
| | FIO ALTURA | [mm] | | 3,35 | 3,35 | |
| | FIO LARGURA | [mm] | | 7,1 | 7,1 | |
| | FIOS PARALELOS NA ALTURA | | | 2 | 2 | |
| | NÚMERO DE ESPIRAS | | | 6 | 6 | |
| | NÚMERO DE RANHURAS | | | 72 | 72 | |
| COMPARAÇÃO DADOS DE SAÍDA | INDUÇÃO NO DENTE | [T] | | 2,01 | 2,07 | -2,9% |
| | INDUÇÃO NA COROA | [T] | | 1,36 | 1,42 | -4,2% |
| | RCC | | | 0,47 | 0,48 | -2,1% |
| | REATÂNCIA DE DISPERSÃO* | [pu] | | 0,15 | 0,15 | 0,0% |
| | REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO | [pu] | | 1,98 | 1,93 | 2,6% |
| | PERDAS JOULE NO ESTATOR | [kW] | | 73675 | 71860 | 2,5% |
| | PERDAS JOULE NO ROTOR | [kW] | | 85356 | 92570 | -7,8% |
| | RESISTÊNCIA QUENTE DO | [Ohm] | | 0,046 | 0,044 | 4,5% |
| | RESISTÊNCIA QUENTE DO ROTOR | [Ohm] | | 0,933 | 0,932 | 0,1% |
| | CORRENTE DE CAMPO EM VAZIO | [A] | | 97 | 107,8 | -10,0% |
| | CORRENTE DE CAMPO | [A] | | 302 | 315 | -4,1% |

* Valor assumido conforme seção 3.1.4.

As diferenças significativas entre os dois cálculos: o desenvolvido neste trabalho e o cálculo industrial de Máquinas Síncronas VPSYN [13], estão em sua maioria nos parâmetros do rotor. Abaixo o resumo das principais diferenças encontradas conforme Tabela 5:

- Correntes de campo: -4%,;
- Perdas Joule no circuito de campo do rotor:-7.8%;
- Resistência a quente do circuito de campo do rotor: 4.5%;

- Indução na coroa do estator,- 4.2%.

As diferenças devem-se principalmente a algumas das considerações assumidas:

- O valor da reatância de dispersão foi adotado fixo conforme gerador original: 0,16 p.u.. A bibliografia [1], utilizada nesta dissertação, sugere esta simplificação, e pelos resultados apresentados, com variações menores do que 10%, mostrou-se uma aproximação satisfatória.
- Fator de saturação considerado fixo e igual ao do gerador original: 0,095. Igualmente como no caso anterior, os resultados que dependiam deste parâmetro, como a corrente de campo e reatância do eixo direto saturada, mostraram-se próximos dos valores reais.

Consideradas as observações acima, pode-se afirmar que o cálculo desenvolvido ao longo dos parágrafos anteriores é válido e pode ser utilizado na segunda parte deste trabalho, que trata da otimização do gerador.

4. OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO, APLICAÇÃO E RESULTADOS

Eventualmente surge a necessidade do mercado por um gerador que atenda a especificações técnicas particulares, seja para atender a uma nova aplicação ou para acatar uma nova regulamentação. O emprego de metodologias e ferramentas de otimização servem, neste caso, às duas partes: ao cliente, que compra por uma mínima alteração no preço, e ao fornecedor, cuja função é minimizar o impacto no processo existente, mas fornecendo o produto dentro da expectativa do mercado. Colocada a necessidade do mercado, cabe à parte técnica projetar o novo produto.

É importante a distinção de dois passos fundamentais ao se projetar um dispositivo eletromagnético otimizado [14]: a formulação do problema e sua resolução.

A formulação do problema concentra a parte crítica do projeto porque neste ponto o projetista deve fazer a seleção das funções que serão otimizadas, do conjunto das restrições e dos limites que, mal escolhidos, podem comprometer a obtenção de ao menos uma solução do problema e caso consiga encontrá-la, de aumentar o tempo de processamento, o que se traduz em custos extras de projeto.

A resolução do problema já definida pode então ser implementada utilizando-se ferramentas de otimização determinísticas ou estocásticas. As últimas são as mais utilizadas na solução de problemas envolvendo dispositivos eletromagnéticos, conforme será explicado no item 4.1.2.

4.1. Projeto e Otimização de Máquinas Elétricas

4.1.1. *Formulação do Problema*

A primeira etapa ao se formular o projeto otimizado de uma máquina elétrica é definir o problema e então escolher a forma como serão calculadas as funções objetivo, os limites e as restrições. Pode-se escolher o equacionamento clássico ou métodos numéricos tal como o método de elementos finitos. Como uma terceira alternativa, podem ser utilizados modelos intermediários como o modelo de relutâncias,

comum para máquinas elétricas em que se pretendem tempos computacionais menores [12].

O equacionamento clássico pode ser usado com poucas restrições para modelos de geradores de polos lisos em regime permanente enquanto que, em modelos de máquinas em regime transitório ou de polos salientes, devem-se preferir métodos numéricos para soluções mais acuradas ou usar o método de relutâncias para tempo de processamento menor.

A segunda etapa é a formulação da otimização da máquina elétrica. Devem ser estabelecidas as restrições e os limites, assim como a quantidade de funções objetivo. Pode-se definir um problema de otimização multiobjetivo da seguinte forma [15]:

$$\text{Extr } \mathbf{F}(\vec{x}) = \text{Extr}[f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})] \quad (59)$$

Onde,

$$\mathbf{F}: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^k \quad g_i, h_i: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R} \quad \vec{x} \in \mathfrak{R}^n \quad \vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sujeitos às restrições descritas pela inequações e equações:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(\vec{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p$$

E limites especificados para variáveis independentes:

$$\vec{x}_{min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{max}$$

Em que o vetor $\mathbf{F}(\vec{x})$ é o vetor função objetivo (conjunto de funções objetivo que serão maximizadas ou minimizadas), \vec{x} é o vetor de variáveis de projetos utilizadas na otimização, $g_i(\vec{x})$ e $h_j(\vec{x})$ são as restrições e \vec{x}_{min} e \vec{x}_{max} os limites superior e inferior das variáveis do projeto.

É possível simplificar o modelo acima e chegar a valores similares com menos esforço computacional utilizando apenas uma função objetivo e escolhendo apropriadamente os limites e as restrições. Para isto é requerido conhecimento e experiência do projetista, o que pode se transformar em empecilho para se modelar o problema. No

entanto podem-se estabelecer metodologias para disponibilizar opções mais adequadas e diminuir a possibilidade de erros.

A otimização utilizando uma função objetivo única pode então ser equacionada conforme:

$$\text{Extr } F(\vec{x}) = \text{Extr}[f_1(\vec{x})] \quad (60)$$

4.1.2. Resolução

Os métodos utilizados na otimização de máquinas elétricas podem ser determinísticos ou estocásticos, mas especialmente com a utilização de modelos de elementos finitos ou problemas com variáveis discretas, os métodos determinísticos não são recomendados. Os métodos estocásticos, por outro lado, têm sido bastante utilizados na otimização de máquinas elétricas, tornando-se populares principalmente devido à sua simplicidade e maior probabilidade de se achar o mínimo global [15].

Dentre os métodos estocásticos mais utilizados, o algoritmo genético, utilizado neste trabalho, é um dos mais populares. Este método, baseado nos mecanismos evolutivos e genéticos, combina os princípios de sobrevivência do mais apto com troca de informações aleatórias. O algoritmo genético gera uma sequência de populações usando um mecanismo de seleção e usando “crossover” como mecanismo de busca para guiar na direção da solução ótima [15].

Em termos gerais, pode-se se dizer que o algoritmo genético é um procedimento exploratório menos propenso a se perder em pontos de mínimo local por não utilizar derivadas, estando apto a localizar soluções próximas às soluções ótimas em problemas complexos que envolvem, por exemplo, variáveis discretas. Para isto é gerado um conjunto de indivíduos que são forçados a evoluir na direção de uma solução aceitável, utilizando-se de um processo que envolve avaliação, reprodução, recombinação e mutação.

4.2. Otimização do Turbo Gerador Quatro Polos

No capítulo 3 foram apresentadas as principais equações para o modelo em regime de um gerador síncrono de polos lisos. As equações conseguem descrever o gerador padrão do fabricante WEG, de quatro

polos, 60 Hz, carcaça 900, de 17,5 MVA, sendo possível, a partir delas, modificar diâmetros, número de ranhuras, espiras e outras medidas principais para se chegar a novas configurações. Como no projeto do gerador padrão, alguns dos parâmetros não atingem seus limites máximos permitidos, tais como as perdas Joule no rotor ou algumas das induções em partes de seu circuito magnético, na otimização desenvolvida neste trabalho, estes valores serão utilizados em seus valores máximos.

Em um primeiro momento é utilizado o programa CADES [16], e o conceito de máquinas imaginárias [14]: uma abordagem em que as características discretas do gerador são transformadas em características contínuas, possibilitando a utilização de algoritmos de otimização baseados em gradientes. Nesta etapa, é possível testar o modelo e os dados de entrada rapidamente, localizando erros e fornecendo uma solução, que analisada por um projetista experiente, já permite avaliar a qualidade dos dados de entrada. Entretanto, a resposta, embora rápida, exhibe valores que não podem ser implementados na prática. Conforme será visto adiante neste capítulo, a solução ainda necessitaria de um refinamento para ser utilizada.

Na sequência, para o projeto principal, com as equações desenvolvidas no Capítulo 3 e as equações de apoio que constam no anexo A, implementadas na planilha Excel chamada “CÁLCULO” considerando variáveis discretas, o projeto é otimizado para a maior relação de curto-circuito dentro da configuração existente, utilizando-se o algoritmo genético MOGAI, disponível em um software de otimização comercial chamado modeFRONTIER [17].

4.2.1. Utilização do Conceito de Máquina Imaginária.

Os geradores síncronos, assim como qualquer máquina elétrica, possuem parâmetros discretos intrínsecos: número de ranhuras, de condutores em paralelo, de espiras e outros devido aos processos industriais, como por exemplo, dimensões de ranhuras e dos condutores. Ao utilizar os parâmetros discretos deve-se ter o cuidado na escolha do tipo de algoritmo de otimização conforme discutido anteriormente, e dependendo do tipo de algoritmo deve-se cuidar da geração da população inicial e da escolha dos limites e restrições, que podem definir tanto a qualidade da solução encontrada quanto o tempo de processamento para se chegar a uma solução ótima. Todo cuidado e

experiência não impedem que sejam escolhidas entradas e até mesmo um modelo, que façam a otimização divergir ou convergir para valores tendenciosos.

Utilizando o conceito de máquinas imaginárias, até mesmo o número de ranhuras passa a ser considerado como parâmetro contínuo. Desta forma, é possível otimizar o modelo para se obter uma primeira idéia do gerador em um tempo curto e previamente utilizar a informação como controle na otimização da máquina real.

Aplicando o conceito ao gerador proposto neste trabalho, é utilizada uma versão do cálculo desenvolvido no capítulo anterior utilizando variáveis contínuas e o módulo de otimização do programa CADES [16].

As restrições e limites considerados para os dados de entrada utilizados neste programa são listados abaixo:

- Diâmetro do estator: 1000 a 1015 mm;
- Diâmetro do rotor: 958 a 970 mm;
- Número de ranhuras: 72 ou 84 ou 96 ou 108;
- Número de espiras por ranhura: 2 a 6;
- Número de condutores paralelos na altura: 2 a 6;
- Largura do Condutor: 3 a 8mm;
- Altura do condutor: 1 a 3,55 mm.

O objetivo único estabelecido para esta otimização é alcançar o maior RCC, considerando-se as restrições para os dados de saída listados abaixo:

- Espessura do dente da ranhura do estator: mínimo de 9 mm;
- Indução na coroa do estator: 1,3 a 1,5 T;
- Indução no dente da ranhura do estator: 1,4 a 2,0 T;
- Máximas Perdas Joule no Estator: 75 kW;
- Máximas Perdas Joule no Rotor: 92 kW;

Utilizando-se apenas variáveis contínuas, o valor do RCC encontrado nesta otimização (0,69) é 47% maior do que o valor do gerador original (0,47). Mas devido o número de espiras do enrolamento do estator por ranhura ($Z_1=5,2$) e a quantidade de ranhuras ($N_1=77,3$) não serem inteiros, o gerador encontrado é impossível de ser construído, mas introduz as alternativas possíveis:

- Aproximando-se o número de espiras para o inteiro mais próximo: 5 ou 6;
- Utilizando-se a quantidade de ranhuras próxima à quantidade encontrada de 77,3, ou seja: 72 ou 84.

É interessante observar que por ser extremamente rápida, esta metodologia permite que sejam explorados os dados de entrada, saída e inclusive o próprio modelo. A simulação da máquina real por algoritmos genéticos utilizando variáveis discretas é custosa, e, algumas vezes, apenas após algumas horas se percebe o problema de convergência.

A investigação usando a metodologia proposta neste item ajuda a prevenir estes obstáculos. Caso haja problemas no modelo, a incoerência nos resultados será observada logo nos primeiros resultados. Da mesma forma, caso o problema seja a convergência devido aos limites propostos, não será preciso esperar mais do que um segundo para perceber o fato.

4.2.2. Otimização do Gerador Real Utilizando Algoritmo Genético

Para a otimização final da máquina, considerando condições reais de projeto, ou seja, com utilização dos parâmetros discretos que definem uma máquina real, será utilizado algoritmo genético.

A planilha Excel chamada “CALCULO”, com as equações desenvolvidas no Capítulo 3, fornece a ligação entre a entrada e a saída de dados. As variáveis de entrada mostradas na Tabela 4 definem os parâmetros que serão alterados com o objetivo de se chegar às melhores soluções possíveis e as variáveis de saída, os parâmetros de controle, apresentando as restrições técnicas e de processos aos projetos testados pelo algoritmo de otimização.

Todas as variáveis são tratadas como variáveis discretas, com passos específicos, definidos conforme critérios de projeto e de processos: no caso dos diâmetros, por exemplo, são considerados passos de 1 mm, devido ao processo de fabricação, enquanto que no caso da largura dos dentes do estator, o limite de 10 mm refere-se a uma restrição de projeto devido à largura mínima que permite o uso de separadores que formam os canais de ventilação.

A ferramenta utilizada para integração da planilha e os dados de entrada e saída com o algoritmo de otimização é o modeFRONTIER, uma ferramenta de otimização comercial que também fornece os algoritmos para a geração da população inicial, a partir da qual se iniciará o processo de otimização.

O algoritmo de otimização escolhido para este trabalho é o MOGAI, um algoritmo genético multiobjetivo, que utiliza “crossover” direcional para acelerar a convergência, com eficiência regida por seus operadores e pelo uso de elitismo [18]. Sua utilização como ferramenta de otimização de função objetivo único, comparada com algoritmos especializados neste tipo de otimização, provou ser mais eficiente em vários casos estudados [19].

O resumo do problema é mostrado no Quadro 1, com as variáveis de entrada e de saída, seus valores e faixa de variação:

| Ferramenta de Otimização: | | Algoritmo Genético: | | MOGA II | | | |
|---------------------------|--|---------------------|----------|---------|------------------|---------|-----------------|
| Função Objetivo Único | | <i>Máximo RCC</i> | | | | | |
| VARIÁVEIS DE ENTRADA | | | | | | | |
| Variáveis de Entrada | Descrição da Variável | Abr. | Variação | | Tipo de Variável | Unidade | Passo |
| | | | Mínimo | Máximo | | | |
| | Dímetro Interno do Estator | Di1 | 1000 | 1015 | Contínua | mm | |
| | Dímetro Externo do Rotor | De2 | 958 | 970 | Contínua | mm | |
| | Altura do Fio do Enrolamento do Estator | hn1 | 1,0 | 3,55 | Discreta | mm | 0,15 |
| | Largura do Fio do Enrolamento do Estator | bn1 | 2,0 | 6,00 | Discreta | mm | |
| | Número de Caminhos Paralelos na Altura | Ncph1 | 2,0 | 6,00 | Discreta | | 1 |
| | Número de Espiras do Estator | Z1 | 3 | 8 | Discreta | | 1 |
| | Número de Ranhuras do Estator | N1 | 72 | 108 | Discreta | | 12 |
| VARIÁVEIS DE SAÍDA | | | | | | | |
| Variáveis de Saída | | | Mínimo | Máximo | Tolerância | Unidade | FUNÇÃO OBJETIVO |
| | Entreferro | δ | | | | | |
| | Espessura do Dente | D2_31 | 9 | | 0,0 | mm | |
| | Indução na Coroa | Bc10 | 1,3 | 1,5 | 0,0 | T | |
| | Indução no Dente | Bd10D2_3 | 1,4 | 2,0 | 0,0 | T | |
| | Perdas no Estator | Pj1 | | 75 | 3 | kW | |
| | Perdas no Rotor | Pj2 | | 98 | 2 | kW | |
| | Relação de Curto-Circuito | RCC | 0,500 | 0,700 | 0,005 | | Maximizar |

Quadro 1 – Condições da Simulação

Para gerar a população inicial (DOE - Design of Experiments), foi utilizado o Sobol, um algoritmo determinístico que gera uma sequência aparentemente aleatória, mas sem os empilhamentos característicos desta sequência. A escolha do tipo e da quantidade de indivíduos neste espaço inicial mostrou grande influência na convergência dos projetos testados neste trabalho: o uso do algoritmo de geração de sequência aleatória não convergia facilmente para uma solução.

Convém ressaltar que os dados de entrada e saída são exatamente os mesmos utilizados na otimização do gerador como uma máquina

imaginária. Contudo o cálculo utilizado nesta seção está implementado em uma planilha de Excel e as variáveis são discretas.

O problema estruturado no programa modeFRONTIER é mostrado na Figura 20. Na parte superior estão as variáveis de entrada, na parte inferior a variável a ser otimizada e as variáveis de saída com seus limites máximos e mínimos, e no centro da planilha estão o cálculo e o algoritmo genético utilizado.

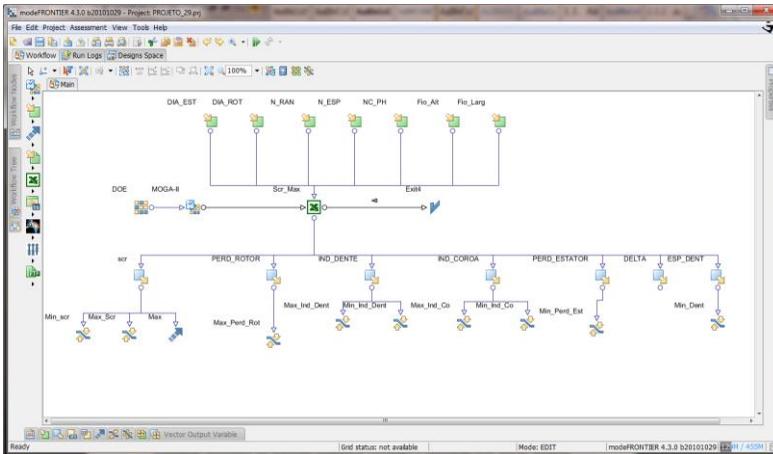


Figura 20 – Estrutura do problema de otimização no modeFRONTIER

4.3. Comparações e Resultados

Foram testadas duas situações para otimização do gerador tratado neste trabalho:

- Simulação com função objetivo única, utilizando variáveis contínuas e método gradiente de otimização (Máquina Imaginária-Situação 1).
- Otimização por algoritmo genético com função objetivo único (Situação 2).

4.3.1. Situação 1 - Máquina Imaginária e Resultados:

Algoritmo de Otimização: Rotina de otimização baseada no método gradiente.

RCC alcançado: 0,69.

A tabela 6 mostra a comparação entre os dados do projeto otimizado e o original, sendo indicados em vermelho os valores que não podem ser assumidos em uma máquina de construção real.

Tabela 6 – Comparação Gerador Imaginário – Gerador Original

| DESCRIÇÃO | | PARÂMETROS VARIÁVEIS | | GERADOR ORIGINAL | GERADOR IMAGINÁRIO |
|------------------------------------|------------------|----------------------------------|--|------------------|--------------------|
| ENTRADA | VARIÁVEL | D _{i1} | Diâmetro Interno do Estator [mm]: | 1000 | 1015 |
| | VARIÁVEL | De ₂ | Diâmetro Externo do Rotor [mm]: | 958 | 958 |
| | VARIÁVEL | N ₁ | Numero de Ranhuras: | 72 | 77,35 |
| | VARIÁVEL | bn ₁₁ | Largura do Condutor do Enrolamento do Estator [mm]: | 7,10 | 6,00 |
| | VARIÁVEL | hn ₁ | Altura do Condutor do Enrolamento do Estator [mm]: | 3,35 | 2,43 |
| | VARIÁVEL | Ncp ₁ | Número de Fios Paralelos na Altura | 2 | 3,00 |
| | VARIÁVEL | Z ₁ | Número de Espiras do Enrolamento do Estator por Ranhura: | 6 | 5,18 |
| FIXO | Ncp ₁ | Caminhos Paralelos no Estator | 2 | 2 | |
| FUNÇÃO OBJETIVA | RCC | Relação de Curto-Circuito | | 0,47 | 0,69 |
| ITERAÇÕES / TEMPO DE PROCESSAMENTO | | | | | 9 it / 258 [ms] |

Para se chegar a uma máquina que possa ser construída, é necessário efetuar uma análise dos dados obtidos:

- O número de ranhuras deverá ser inteiro ou 72 ou 84;
- O número de espiras deverá estar ser 5 ou 6.

Com as escolhas mais restritas, aparentemente existe a tendência para o projeto otimizado real caminhar para 5 espiras (deve-se considerar um número inteiro de espiras, e, quanto menor o número de espiras, maior o RCC) e para 84 ranhuras (diminuindo o número de espiras o número de ranhuras tenderá a um aumento). Portanto, considerando as colocações acima, o valor da relação de curto-circuito deve diminuir.

A conclusão, mostrada no parágrafo acima, foi alcançada baseando-se no conhecimento prévio do comportamento do gerador. Outras variáveis, como a altura do condutor e o número de fios em paralelo, ainda precisariam ser testados para se obter a(s) melhor(es) escolha(s).

O resultado da máquina imaginária não permite a construção de uma máquina real, mas sua simulação permite chegar a tendências de

valores que podem ser usados na pré-avaliação do modelo e do conjunto de dados antes da otimização por algoritmo genético

4.3.2. *Situação 2 – Gerador Otimizado com Algoritmo Genético e Resultados:*

Algoritmo de Otimização: Algoritmo Genético - MOGAI

Número de gerações: 40¹

Probabilidade de “Crossover” direcional: 0,5¹

Probabilidade de Seleção: 0,05¹

Probabilidade de Mutação: 0,1¹

Elitismo: Habilitado¹

DOE: Sobol¹

Número de Experimentos DOE: 50

Número de Projetos: 2000

Tempo de Processamento: 4 horas

A utilização do Excel no desenvolvimento da rotina de cálculo do modelo do gerador é um ponto que deve ser destacado. Embora seja uma ferramenta flexível, de fácil mobilidade e portabilidade e por isto escolhida para este trabalho, o tempo de processamento é várias vezes superior se comparado com uma rotina desenvolvida em Java ou Matlab. Este ponto deve ser repensado em trabalhos posteriores.

Valor do RCC: dois dos valores encontrados na simulação utilizando algoritmo genético estão mostrados na Tabela 7. Como não são valores únicos, ainda há escolhas que pertencem ao interesse do projetista, que pode encontrar, entre as opções, a que melhor satisfaz a solicitação técnica. Assim, é possível escolher, além do RCC, o gerador que mais se aproxima do objetivo pretendido, como menores valores de perdas ou de indução, por exemplo.

A Tabela 7 mostra a comparação entre dois projetos. Ambos são factíveis e atendem aos limites impostos nas considerações iniciais da otimização, no entanto a escolha do projeto 2 é a mais interessante. Além de conseguir os maiores valores de RCC, consegue-se as menores variações de indução, mesmo que sacrifique, um pouco mais, as perdas no rotor.

¹ Valores sugeridos pelo desenvolvedor do programa modeFrontier.

A utilização de ferramenta de otimização não isenta o projetista de escolhas durante o projeto, é claro, mas oferece as opções para sua finalização o que lhe confere certo grau de flexibilidade.

Tabela 7 – Comparação: Geradores Otimizados – Gerador Original

| | DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO | Ab. | UNIDADE | GERADOR ORIGINAL WEG * | PROJETO1 | VARIÇÃO DO PROJETO 1 COM GERADOR ORIGINAL | PROJETO2 | VARIÇÃO DO PROJETO 2 COM GERADOR ORIGINAL |
|----------------------|----------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---|----------|---|
| TOPOLOGIA DO GERADOR | DIÂMETRO DO ESTATOR | Dh1/D | [mm] | 1000 | 1008 | | 1011 | |
| | DIÂMETRO DO ROTOR | De2 | [mm] | 958 | 960 | | 960 | |
| | ENTREFERRO | δ | [mm] | 21 | 24 | | 25,5 | |
| | ALTURA DO FIO | hn1 | [mm] | 3,35 | 2,8 | | 2,8 | |
| | LARGURA DO FIO | bn11 | [mm] | 7,1 | 5,6 | | 5,6 | |
| | FIOS PARALELOS NA ALTURA | Ncph1 | | 2 | 3 | | 3 | |
| | NÚMERO DE ESPIRAS | Z1 | | 6 | 5 | | 5 | |
| | NÚMERO DE RANHURAS | N1 | | 72 | 84 | | 84 | |
| DADOS DE DESEMPENHO | INDUÇÃO NA COROA | Bc 10 | [T] | 1,36 | 1,47 | 8% | 1,47 | 8% |
| | INDUÇÃO NO DENTE | Bd10D2,3 | [T] | 2,01 | 2,1 | 4% | 2,08 | 3% |
| | RCC | RCC | | 0,47 | 0,55 | 17% | 0,58 | 23% |
| | PERDAS JOULE NO ESTATOR | PJ1 | [MW] | 74 | 71 | -4% | 71 | -4% |
| | PERDAS JOULE NO ROTOR | PJ2 | [MW] | 86 | 88 | 2% | 91 | 6% |
| COMPARAÇÃO | RESISTÊNCIA DO ESTATOR | r1q | [Ohm] | 0,046 | 0,044 | | 0,044 | |
| | RESISTÊNCIA DO ROTOR | r2q | [Ohm] | 0,933 | 0,934 | | 0,934 | |
| | CORRENTE DO ESTATOR | I | [A] | 732,1 | 732,1 | | 732,1 | |
| | CORRENTE DE CAMPO EM VAZIO | If0 | [A] | 97 | 111 | | 116 | |
| | CORRENTE DE CAMPO NOMINAL | IfN | [A] | 302 | 307 | | 312 | |

* REFERE-SE AO CÁLCULO DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO

O valor da relação de curto-circuito mostrado no projeto 2, conforme Tabela 7, apresenta um aumento de 23% em relação ao projeto original, um aumento significativo, especialmente se for considerado que foram mantidas as suas dimensões externas. A outra forma de se conseguir o mesmo resultado, seria aumentar o volume da máquina, o que não traz qualquer vantagem. Além da melhor percepção da máquina, do ponto de vista comercial, um gerador com maior valor de RCC representa um melhor desempenho em relação à estabilidade quanto conectado à rede.

A Tabela 8 mostra a validação dos resultados alcançados no Projeto 2 em relação ao cálculo VPSYN [13]. O cálculo VPSYN, como introduzido anteriormente, é o cálculo industrial de geradores síncronos, utilizado na empresa de WEG, divisão Energia, para os projetos de geradores de polos lisos.

Comparando-se os valores, encontram-se resultados bastante satisfatórios. As maiores diferenças se concentram no rotor, onde são

sentidas, de forma mais intensa, as aproximações assumidas para a simplificação do cálculo.

Ainda assim, com base nos resultados do cálculo SPSYN, a máquina encontrada no projeto 2 cumpre os requisitos que foram propostos para este trabalho: manter as dimensões externas de um gerador padrão e, sem alterar seus custos de fabricação significativamente, alcançar um maior valor para a relação de curto-circuito.

Tabela 8 – Validação do Projeto 2 pelo Cálculo Industrial de Geradores Síncronos de Polos Lisos SPSYN

| | DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO | Ab. | UNIDADE | PROJETO2* | SIMULAÇÃO SPSYN [13] | VARIAÇÃO DO PROJETO 1 COM GERADOR ORIGINAL |
|----------------------|----------------------------|----------|---------|-----------|----------------------|--|
| TOPOLOGIA DO GERADOR | DIAMETRO DO ESTATOR | Di1/D | [mm] | 1011 | 1011 | |
| | DIÂMETRO DO ROTOR | De2 | [mm] | 960 | 960 | |
| | ENTREFERRO | δ | [mm] | 25,5 | 25,5 | |
| | ALTURA DO FIO | hn1 | [mm] | 2,8 | 2,8 | |
| | LARGURA DO FIO | bn11 | [mm] | 5,6 | 5,6 | |
| | FIOS PARALELOS NA ALTURA | Ncph1 | | 3 | 3 | |
| | NÚMERO DE ESPIRAS | Z1 | | 5 | 5 | |
| | NÚMERO DE RANHURAS | N1 | | 84 | 84 | |
| DADOS DE DESPENHO | INDUÇÃO NA COROA | Bc10 | [T] | 1,47 | 1,51 | 3% |
| | INDUÇÃO NO DENTE | Bd10D2_3 | [T] | 2,08 | 2,1 | 1% |
| | RCC | RCC | | 0,58 | 0,6 | 3% |
| | PERDAS JOULE NO ESTATOR | PJ1 | [MW] | 71 | 75 | 6% |
| | PERDAS JOULE NO ROTOR | PJ2 | [MW] | 91 | 100 | 10% |
| COMPARAÇÃO | RESISTÊNCIA DO ESTATOR | r1q | [Ohm] | 0,044 | 0,046 | 5% |
| | RESISTÊNCIA DO ROTOR | r2q | [Ohm] | 0,934 | 0,939 | 1% |
| | CORRENTE DO ESTATOR | I | [A] | 732,1 | 732,1 | 0% |
| | CORRENTE DE CAMPO EM VAZIO | If0 | [A] | 116 | 129 | 11% |
| | CORRENTE DE CAMPO NOMINAL | IfN | [A] | 312 | 326 | 4% |

* VALORES ENCONTRADOS REFERENTES AO CÁLCULO DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO

5. CONCLUSÃO

Conforme a proposta deste trabalho, um gerador síncrono padrão de polos lisos WEG, de quatro polos e carcaça 900, foi modelado em regime permanente a partir de equações clássicas desenvolvidas nos Capítulos 2 e 3 e, em seguida, otimizado utilizando algoritmo genético, de acordo com o procedimento exposto no Capítulo 4. O objetivo era atender uma necessidade do mercado por geradores com RCC maior ou igual a 0,5, sem alterar as dimensões externas do gerador e, consequentemente, sem modificar seus custos.

O cálculo clássico desenvolvido foi validado com sucesso através de sua comparação com o cálculo industrial VPSYN [13], cálculo que vem sendo utilizado ao longo dos últimos dez anos pela WEG, e validado através de ensaios dos geradores de polos lisos, fabricados pela empresa neste período.

A utilização do algoritmo genético multiobjetivo na otimização de um problema prático de objetivo único, proposto em [19] por Poles, associado a uma pré-avaliação utilizando o conceito de máquinas imaginárias [14], cumpriu o objetivo proposto para esta aplicação específica: a topologia da máquina foi ajustada e se obteve um valor de RCC 23% superior em relação ao gerador WEG padrão, com a mesma configuração externa.

Como o trabalho apresentado nesta dissertação cobriu um amplo espectro de temas, muitos assuntos periféricos igualmente interessantes, como a estabilidade de geradores conectados à rede e a evolução do RCC ao longo dos anos, foram introduzidos. Além disto, como mencionado anteriormente, o modelo do gerador empregado nesta dissertação assumiu algumas aproximações que cumpriram seu objetivo final, mas que, através de maior desenvolvimento do cálculo, poderia ser melhorado.

A seguir, as sugestões de desenvolvimentos futuros que complementariam este trabalho são listadas:

- Influência da relação de curto-circuito, RCC, na estabilidade estática de geradores conectados à rede, em aplicações que utilizam reguladores de tensão digitais.
- Evolução dos valores de relação de curto-circuito através dos anos;

- Cálculo da reatância de dispersão pelo cálculo clássico e através de elementos finitos, e sua comparação com os valores usuais sugeridos na literatura técnica;
- Cálculo do fator de saturação, utilizando equações clássicas e dados ensaiados de chapas magnéticas, e a comparação destes resultados com aqueles obtidos pela análise por elementos finitos.
- Desenvolvimento do cálculo para o gerador síncrono de pólos lisos no regime transitório utilizando equações clássicas, e sua comparação com o resultado alcançado por outros métodos, tais como elementos finitos ou utilizando o modelo de relutâncias;
- Estudo do impacto de altos valores da relação de curto circuito na estabilidade dinâmica do gerador.
- Comparação da eficiência entre a utilização de algoritmos genéticos multiobjetivo e de objetivo único na resolução de problemas de objetivo único.
- Eficiência do emprego do conceito de máquinas imaginárias na otimização por algoritmos genéticos de máquinas elétricas, com relação ao estabelecimento das variáveis de entrada e ao teste do modelo utilizado.

ANEXO A - CÁLCULO DA TOPOLOGIA

Entreferro:

$$\delta = \frac{Di1 - De2}{2} \quad (A1)$$

Equação Auxiliar da Altura Total da Ranhura do Estator:

$$Aux = \{ \{ [Z1 \cdot Ncph1 \cdot (hn1 + eic1)] + (2 \cdot eib1) \} \cdot 2 \} \quad (A2)$$

Altura Total da Ranhura do Estator:

$$htr1 = Aux + hseb1 + hip + hib1 + Fa1 \quad (A3)$$

Largura Preliminar da Ranhura do Estator:

$$br1p = [(bn11 + eic1) \cdot Ncpl1] + (2 \cdot eib1) + Fl1min \quad (A4)$$

Largura Total da Ranhura do Estator:

$$br1p = [(bn11 + eic1) \cdot Ncpl1] + (2 \cdot eib1) + Fl1 \quad (A5)$$

Folga na Largura da Ranhura do Estator:

$$Fl1 = br1 - \{ [(bn11 + eic1) \cdot Ncpl1] + (2 \cdot eib1) \} \quad (A6)$$

Folga na Altura:

$$Fa1 = hr1 - (htr1 - Fa1) \quad (A7)$$

Passo de Ranhura:

$$\tau r = \frac{\pi \cdot (De2 + \delta)}{N1 \cdot Fp} \quad (A8)$$

Passo do Polo:

$$\tau = \frac{\pi \cdot (De2 + \delta)}{2 \cdot p} \quad (A9)$$

Altura da Coroa do Estator:

$$hc1 = \frac{De1 - [Di1 + (2 \cdot htr1)]}{2} \quad (A10)$$

Espessura do Dente da Ranhura Estator - Meio:

$$dm1 = \frac{\pi \cdot Di1 + (2 \cdot htr1/2)}{N1} - br1 \quad (A11)$$

Espessura do Dente da Ranhura Estator - Topo:

$$dt1 = \frac{\pi \cdot Di1 + htr1/2}{N1} - br1 \quad (A12)$$

Espessura do Dente da Ranhura Estator - Base:

$$db1 = \frac{\pi \cdot Di1}{N1} - br1 \quad (A13)$$

Espessura do Dente da Ranhura Estator - Esteca:

$$dest1 = \frac{\pi \cdot Di1 + 2 \cdot (hpr1 + hesr1/2)}{N1} - besr1 \quad (A14)$$

Espessura do Dente da Ranhura Estator - 1/3 da Base:

$$dm1 = \frac{\pi \cdot Di1 + 2 \cdot htr1/3}{N1} - br1 \quad (A15)$$

Massa da Coroa da Chapa do Estator:

$$Gc = \frac{\pi \cdot [(De1/2)^2 - ((Di1 + 2 \cdot htr1)/2)^2] \cdot L1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sigma fe \quad (A16)$$

Massa do Dente da Chapa do Estator:

$$Gd = \frac{\left[\pi \cdot \left[\left(\frac{Di1 + 2 \cdot htr1}{2} \right)^2 - \frac{Di1^2}{4} \right] - br1 \cdot htr1 \cdot N1 \right] \cdot L1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sigma fe \quad (A17)$$

Largura da Ranhura com Esteca do Estator:

$$besr1 = br1 + bers1 \quad (A18)$$

Altura Total da Ranhura Estator:

$$htr1 = hr1 + hpr1 + hers1 \quad (A19)$$

Passo do enrolamento da Bobina da Armadura:

$$ds1 = Integer \left[\left(\frac{N1}{2 \cdot p} \cdot \frac{5}{6} \right) \right] + 1 \quad (A20)$$

Fator de Passo:

$$Fp = \frac{ds1 - 1}{(N1/(2 \cdot p))} \quad (A21)$$

Passo de Bobina:

$$\tau b = \pi \cdot Di1/4 \cdot Fp \quad (A22)$$

Diâmetro no Meio da Ranhura:

$$Dmr = Di1 + (2 \cdot hpr1) + (2 \cdot hers1) \cdot (hr1/2) \quad (A23)$$

Passo Médio da Ranhura do Estator:

$$\tau r1 = \pi \cdot \frac{Dmr}{N1} \quad (A24)$$

Espessura da Bobina:

$$Espbob1 = bl1 - fl1 + eeb1 \quad (A25)$$

Ângulo de Inclinação da Bobina em Graus:

$$\alpha_{inc1} = \sin^{-1}(Espbob1/tr1) \quad (A26)$$

Comprimento da Cabeça por Passo de Ranhura:

$$Lamb = \frac{tr1}{\cos(\alpha_{inc1})} \quad (A27)$$

Altura da Cabeça de Bobina:

$$H1cab = Lm1 + (Lamb \cdot ((Ds1 - 1))/2) \quad (A28)$$

Dimensão de uma Bobina do Estator:

$$DimBob1 = \frac{2 \cdot Ltp1 + 4 \cdot \left(\frac{Lcb - Lm1}{\sin(\alpha_{inc1})} \right) + 4 \cdot Lm1}{1000} \quad (A29)$$

Seção de uma Bobina do Estator:

$$Area1 = hn1 \cdot Ncph1 \cdot bn11 \cdot Ncpl1 \quad (A30)$$

Resistência de Metade de Bobina do Estator:

$$r1_2bob1 = \frac{1}{58} \cdot \frac{Dimbob1}{Area} \cdot Z1 \quad (A31)$$

Resistência Total de um Grupo:

$$res1grupo = \left(\frac{N1}{\frac{2 \cdot p}{m}} \right) \cdot r1_2bob1 \quad (A32)$$

Resistência de um Caminho:

$$res1cam\dot{in} = \frac{2 \cdot \pi}{Ncp1} \cdot res1grupo \quad (A33)$$

Resistência de N Caminhos Paralelos:

$$resncam\dot{in} = \frac{1}{resncam\dot{in}} \quad (A34)$$

Resistência Total:

$$r1 = \frac{2 \cdot p / Ncp1}{2 \cdot p \cdot resncam\dot{in}} \quad (A35)$$

Largura de uma Bobina:

$$L2B = (bn2 + eic2) \cdot Ncpl2 \quad (A36)$$

Altura Da Cabeça de Bobina do Rotor:

$$Hcab = Lm2 + \left(\frac{N2}{\frac{2 \cdot p}{2} - 1} \right) \cdot eeb2 + \left(\frac{N2}{\frac{2 \cdot p}{2}} \cdot L2B \right) \quad (A37)$$

Altura Média de uma Cabeça de Bobina do Rotor:

$$Cab2med = \frac{Hcab - Lm2}{2} \quad (A38)$$

Quantidade de Bobinas em um Polo:

$$N2bob = \frac{N2}{2 \cdot (2 \cdot p)} \quad (A39)$$

Largura da Bobina Mais Externa do Rotor:

$$L2ext = \frac{\pi \cdot De2}{4} \quad (A40)$$

Largura da Bobina Mais Interna do Rotor:

$$L2int = \frac{\pi \cdot De2}{4} \cdot 0,7 \quad (A41)$$

Largura Média da Bobina do Rotor:

$$L2med = \frac{L2ext + L2int}{2} \quad (A42)$$

Dimensão De Uma Espira do Rotor:

$$DimBob2 = \frac{2 \cdot Ltp2 + 4 \cdot Cab2med + 2 \cdot Lmed}{1000} \quad (A43)$$

Seção de uma Espira do Rotor:

$$Area2 = Ncph2 \cdot Ncpl2 \cdot hn2 \cdot bn2 \quad (A44)$$

Resistência de uma Bobina:

$$r2bob = \frac{1}{58} \cdot Z2 \cdot \frac{DimBob2}{Area2} \quad (A45)$$

Resistência de um Polo do Rotor:

$$res1polo = N2bob \cdot r2bob \quad (A46)$$

Resistência do Rotor:

$$r2 = 4 \cdot res1polo \quad (A47)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOLDEA, I. The Electric Generators Handbook - Synchronous Generators. Timisoara: CRC Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [2] LIWSCHITZ, M. Calcolo e Determinazione delle Dimensioni delle Macchine Elettriche. Milano: Ulrico Hoepli Milano, 1946.
- [3] KOSTENKO, M., e PIOTROVSKY, L. Electrical Machines in Two Parts. Moscow: Foreign Languages Publishing House, 1956.
- [4] PYRHÖNEN, J., JOKINEN, T. e HRABOVCOVÁ, V. Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- [5] GRANVILLE, S., P. LINO, RALSTON F., e et al. Recent Advances of Sugarcane Biomass Cogeneration in Brazil. IEEE General Meeting. Calgary, 2009.
- [6] MARQUES DE AZEVEDO, J., e FD GALIANA. The Sugarcane Ethanol Power Industry in Brazil: Obstacles, Success and Perspectives. Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal: IEEE, 2009.
- [7] IEC DOCUMENT. Welcome to IEC. Geneva-Switzerland, 2010. Disponível em <http://www.iec.ch/about/brochures/pdf/about_iec> Acesso em 19/08/2011
- [8] STEPHAN, C.-E., e Z. BABA. Specifying a Turbogenerator's Electrical Parameters guided by Standards and Grid Codes. Electric Machines and Drives Conference. Cambridge: IEEE International, 2001. 63-68.
- [9] MÜLLER, G., VOGT, K., e PONICK, B.. Berechnung Elektrischer Maschinen. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

- [10] MAHON, L. L. J. Diesel Generator Handbook. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2008.
- [11] JAIN, G. C. Design, Operation and Testing of Synchronous Machines. Bombay: Asia Publishing House, 1966.
- [12] WAN, S., LI, H., LI, Y., et al. Reluctance Network Model of Turbo-Generator and Its Application-Part 1: Model. Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Nanjing : IEEE, 2005. 1988-1993.
- [13] PROGRAM VPSYN Autor: Dipl.-Ing. Thomas Strauß - Universität Hannover, Calculation of the Steady-State Performance of Cylindrical Rotor Synchronous Machines
- [14] WURTZ, F., KUO-PENG, P, S. DE CARVALHO, E. The Imaginary Pareto Front: a helpful Tool for setting Optimisation Problem for Design of Electromagnetic Devices. Aceito para Publicação COMPUMAG2011
- [15] GIERAS, J. K., e WING, M. Optimization. In: Permanent Magnet Motor Technology Design and Application, por J. K. GIERAS, 485-498. New York: Marcel Dekker , 2002.
- [16] WURTZ, F; BIGEON, J., POIRSON, C., A Methodology and a Tool for the Computer Aided Design with constraints of Electrical Devices, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, No 3, may 1996, pp. 1429-1432
- [17] modeFRONTIER 4.3.0 ESTECO, Optimization and Integration Software
- [18] POLES, S. MOGA-II - An improved Multi-Objective Genetic Algorithm. Technical Report 2003-006, Esteco, 2003.
- [19] POLES, S., RIGONI, E., ROBIC, T, MOGA-II Performance on Noisy Optimization Problems, BIOMA 04, Ljubljana, Slovenia , Oct. 2004, pp. 51-62
- [20] RODRIGUES FARIA BRIGHENTI, C. Integração do Cogrador de Energia do Setor Sucroalcooleiro com o Sistema

- Elétrico. São Paulo,2003. Dissertação de Mestrado - PIPGE, USP.
- [21] OGAWA, C. Otimização do Projeto de Máquinas de Corrente Contínua utilizando Algoritmos Genéticos . Florianópolis, 2001. Dissertação de Mestrado - , UFSC
- [22] ANDERSEN, O. W., Optimized Design of Electric Power Equipment. Computer Applications in Power, IEEE, 1991 Volume: 4, Issue:1., 11-15
- [23] FRENZEL, J. F. Genetic Algorithms - A New Breed of Optimization. IEEE Potential, 1933: 21-24.
- [24] ÇUNKAS, M., e AKKAYA, R. Design Optimization of Induction motor by Genetic Algorithm and Comparison with Existing Motor. Mathematical and Computational Applications, Vol. 11, No. 3, 2006, pp. 193-203.
- [25] HUNT, J. P. Capability Curves and Excitation Requirements of Saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems July 1967, pp. 855-859.
- [26] KONAKA, A., COITB, D. W., SMITHC, A. E. Multi-objective Optimization using Genetic Algorithms: a Tutorial. Elsevier Reliability Engineering and System Safety 91, 2006, pp. 992-1007.
- [27] DELINCHANT, B., DURET, D., ESTRABAUT, L., et al. An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 26 No. 2, 2007, pp. 368-379
- [28] KIAMEH, P. Power Generation Handbook. New York: McGraw-Hill Handbooks, 2002.