

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Edgardo Manuel Arrieta Martinez

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO MAGNÉTICO DE
GERADORES SÍNCRONOS COM FALHAS DE CURTO CIRCUITO NO
ROTOR USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e sistemas elétricos industriais.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Isaias de Lima Lopes

Coorientador: Prof. Dr. Jose Carlos Grilo Rodrigues

Setembro de 2017

Itajubá - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Edgardo Manuel Arrieta Martinez

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO MAGNÉTICO DE
GERADORES SÍNCRONOS COM FALHAS DE CURTO CIRCUITO NO
ROTOR USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 28 de setembro de 2017, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Isaias de Lima Lopes (Orientador)

Prof. Dr. Jose Carlos Grilo Rodrigues (Coorientador)

Prof. Dr. Marcelo Aroca Tomim

Prof. Dr. Délvio Franco Bernardes

Setembro de 2017

Itajubá - MG

Dedicatória:

Aos meus pais Manuel e Rosa, e ao meu irmão Juan Daniel, pelas suas cooperações e apoio incondicional durante esta etapa da minha vida. Este triunfo também é de vocês.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado a força e a sabedoria necessária para seguir em frente nos momentos mais difíceis e poder realizar este trabalho.

À minha família, pois apesar de estar longe deles, graças ao seu apoio, estímulo, confiança e colaboração foi possível alcançar esta meta.

Aos professores, Dr. Isaías Lima e Dr. Jose Carlos Grilo, por terem me aceitado como aluno, por toda a paciência, pelas orientações e por todas as sugestões que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro German Lozano pelas colaborações com os desenhos CAD.

A todos meus amigos que estiveram presentes durante a minha estadia no Brasil.

Aos meus amigos de minha cidade natal (Tolú) por sua amizade e irmandade.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio econômico mediante a bolsa de estudo durante o tempo de duração do mestrado.

Resumo

A grande importância dos geradores síncronos dentro do sistema de potência faz que a análise de falhas seja muito importante para prevenir paradas que possam afetar o funcionamento normal do sistema de geração. As falhas de curto circuito nas bobinas do estator são bastante comuns e podem influenciar tanto na temperatura do gerador síncrono como na tensão gerada por este.

As falhas de curto circuito nas bobinas do rotor, geralmente são difíceis de detectar pelos métodos comuns de análise de falhas. Uma das formas de detectá-las, portanto, é mediante a análise do comportamento da densidade de fluxo magnético em diferentes regiões das máquinas síncronas.

No presente trabalho se estuda o comportamento da densidade de fluxo magnético em máquinas síncronas de pequeno e grande porte, visando determinar como o curto circuito afeta a densidade de fluxo em várias regiões das máquinas quando estas trabalham a vazio e com carga, além disso, estuda-se como o curto circuito afeta a tensão de saída, e comparam-se os resultados da simulação da máquina de pequeno porte com os resultados de ensaios feitos no laboratório em uma máquina de características iguais.

Palavras chaves: Máquina síncrona, elementos finitos, densidade de fluxo magnético, curto circuito, Comsol.

Abstract

The great importance of synchronous generators in the power system, causes the failure analysis is very important to prevent downtime that may affect the normal operation of the generation system. Short circuit faults in the stator windings are quite common and can influence both the temperature of the synchronous generator and the voltage generated by the latter.

Short circuit faults in the rotor coils, generally are difficult to detect by common methods of failure analysis; one of the ways to detect this type of failure is by analyzing the behavior of the magnetic flux density in different regions of synchronous machines.

In this work we study the behavior of the magnetic flux density in small and large synchronous machines, in order to determine how the short circuit affects the flux density in various regions of the machines when they work-load and load, also studies how the short circuit affects the output voltage and comparing the small machine simulation results with the results of tests done in the laboratory on a machine with similar characteristics.

Keywords: finite elements method, synchronous machines, magnetic flux density, short circuit, Comsol.

Sumario

Dedicatória	I
Agradecimentos	II
Resumo	III
Abstract	IV
Sumario	V
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	X
Lista de Símbolos	XI
Lista de Abreviaturas.....	XIII
Conteúdo	XIV
Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Revisão Bibliográfica	4
Capítulo 2	10
2.1 Máquina Síncrona (MS).....	10
2.2 Métodos dos Elementos Finitos (FEM)	14
2.2.1 Definição	16
2.2.2 Vantagens e Desvantagens do FEM.....	17
2.2.3 Equações para Eletromagnetismo	18
2.2.4 Etapas do Cálculo com Software de Elementos Finitos.....	20
Capítulo 3	22
3.1 Simulação.....	22
3.1.1 Simulação em 2D	22
3.1.1 Simulação em 3D	23
3.2 Modelagens MS de Pequeno Porte	24
3.2.1 Modelo MS de Pequeno Porte.....	24
3.2.2 Análise dos Resultados da Máquina de Pequeno Porte.....	26

3.2.2.1	Análise em condições normais de operação e sem carga conectada.	27
3.2.2.2	Análise em curto-circuito na bobina de um polo e sem carga conectada.	31
3.2.2.3	Análise em condições normais de operação e com carga conectada.	34
3.2.2.4	Análise em curto-circuito e com carga conectada.	38
3.2.2.5	Análise em condições normais de operação do modelo em 3D.	44
3.2.2.6	Análise em curto-circuito do modelo em 3D.	45
3.3	Modelagem Máquina Síncrona de Grande Porte	46
3.3.1	Modelo Máquina Síncrona de Grande Porte	46
3.3.2	Análise dos Resultados Máquina de Grande Porte	48
3.3.2.1	Análise em condições normais de operação e sem carga conectada.	48
3.3.2.2	Análise com Curto-Circuito na Bobina de um Polo e Sem Carga Conectada. .	54
Capítulo 4	61
4.1	Conclusões	61
4.2	Trabalhos Futuros	62
Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

Figura 2.1: Turbina Acoplada ao Gerador Síncrono.	11
Figura 2.2: MSIP Superficial (a) e MSIP Internos (b) (DE ANGELO, 2004).	11
Figura 2.3: MS de Polos Salientes (a) e MS de Polos Lisos (b).	12
Figura 2.4: Diagrama de Conexões MS (FRAILE MORA, 2003).	13
Figura 2.5: Geometria 2D Dividida em Elementos Finitos.	17
Figura 2.6: Diagrama de Fluxo do Cálculo por Software de EF.	20
Figura 3.1: Cotas da MS.	25
Figura 3.2: Vista em Corte Transversal do Conjunto Estator/Rotor da MS.	25
Figura 3.3: Diagrama do Enrolamento da MS.	26
Figura 3.4: Mesh MS de Pequeno Porte.	26
Figura 3.5: Densidade de Fluxo Magnético da MS de Pequeno Porte em Condições Normais de Operação.	27
Figura 3.6: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator.	29
Figura 3.7: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS de Pequeno Porte.	29
Figura 3.8: Circuito Magnético.	30
Figura 3.9: Concentração Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator.	30
Figura 3.10: Tensões Estatísticas da MS em Condições Normais de Operação.	31
Figura 3.11: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Curto-Circuito em um Polo.	32
Figura 3.12: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS de Pequeno Porte com Curto-Circuito.	32
Figura 3.13: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito.	33
Figura 3.14: Tensões Estatísticas da MS com Polo em Curto-Circuito.	34
Figura 3.15: Fluxo Magnético da MS em Condições Normais de Operação e com Carga Conectada.	34
Figura 3.16: Tensões Estatísticas da MS em Condições Normais de Operação e com Carga Conectada.	35
Figura 3.17: Densidade de Fluxo Magnético da MS em Condições Normais de Operação Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].	35
Figura 3.18: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].	36
Figura 3.19: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].	36
Figura 3.20: Tensões Estatísticas da MS em Condições Normais de Operação Após Normalizá-la.	37
Figura 3.21: Bancada (FLORES; ASIAÍN, 2011).	37
Figura 3.22: Tensões Estatoricas da MS Medidas no Teste de Laboratório.	38
Figura 3.23: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Polo em Curto-Circuito e com Carga Conectada.	38

Figura 3.24: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro. Polo em Curto-Circuito e Carga no Estator.	39
Figura 3.25: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada.	40
Figura 3.26: Tensões Estatóricas da MS em Curto-Circuito Após Conectar uma Carga na Saída.	40
Figura 3.27: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Polo em Curto-Circuito e com Carga Conectada Após Normalizar a Tensão.	41
Figura 3.28: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada Após Normalizar a Tensão em 220[V].	42
Figura 3.29: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada Após Normalizar a Tensão em 220[V].	42
Figura 3.30: Tensão de Saída com Amplitude Normalizada em 220[V].	43
Figura 3.31: Tensões Estatoricas da MS Medidos no Teste de Laboratório, com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada.	43
Figura 3.32: Parte Externa da MS em Condição Normal.	44
Figura 3.33: Parte Interna da MS em Condição Normal.	44
Figura 3.34: Parte Externa da MS em Condição de Curto-Circuito.	45
Figura 3.35: Parte Interna da MS em Condição de Curto-Circuito.	45
Figura 3.36: Vista Lateral Parte Interna da MS em Condição de Curto-Circuito.	46
Figura 3.37: Corte Transversal da MS de Grande Porte.	48
Figura 3.38: Mesh MS de Grande Porte.	48
Figura 3.39: Densidade de Fluxo Magnético na MS de Grande Porte em Condições Normais de Operação.	49
Figura 3.40: Densidade de Fluxo na Região A da MS em Condições Normais de Operação.	49
Figura 3.41: Circuito Magnético da MS de Grande Porte em Condições Normais de Operação.	50
Figura 3.42: Densidade de Fluxo nos Dentes do Estator em Condições Normais de Operação.	50
Figura 3.43: Comportamento da Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Entreferro da MS em Condições Normais de Operação.	51
Figura 3.44: Comportamento da Densidade de Fluxo nos Dentes do Estator da MS em Condições Normais de Operação.	51
Figura 3.45: Corte Transversal MS Região com Duto de Ventilação.	52
Figura 3.46: Densidade de Fluxo Magnético na Região A da MS em Condições Normais de Operação.	53
Figura 3.47: Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Duto de Ventilação da MS em Condições Normais de Operação.	53
Figura 3.48: Tensão nas Bobinas do Estator em Condições Normais de Operação da MS.	54
Figura 3.49: Densidade de Fluxo Magnético na MS de Grande Porte com Curto-Circuito.	54
Figura 3.50: Densidade de Fluxo no Polo em Curto-Circuito.	55
Figura 3.51: Polo Adjacente ao Polo em Curto-Circuito.	55
Figura 3.52: Polo Fisicamente Localizado a 90° do Polo em Curto-Circuito.	56
Figura 3.53: Circuito Magnético Formado nos Polos Vizinhos ao Polo em Curto-Circuito.	56

Figura 3.54: Circuito Magnético Formado no Polo em Curto-Circuito.	57
Figura 3.55: Comportamento da Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Entreferro da MS em Curto-Circuito.	57
Figura 3.56: Comportamento da Densidade Fluxo nos Dentes da MS em Curto-Circuito.	58
Figura 3.57: Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS com Curto-Circuito.	58
Figura 3.58: Polo em Curto-Circuito.	59
Figura 3.59: Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Duto de Ventilação da MS em Condições de Curto-Circuito.	59
Figura 3.60: Tensão nas Bobinas do Estator na Condição de Curto-Circuito.	60

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Características Elétricas MS de Pequeno Porte.....	25
Tabela 3.3.2: Resistências.	25
Tabela 3.3: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos em Condições Normais de Operação.....	27
Tabela 3.4: Valores Densidade de Fluxo Magnético em Diferentes Regiões da MS.....	28
Tabela 3.5: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos em Condição de Curto-Circuito.	33
Tabela 3.6: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos Após Normalizar a Tensão de Saida em 220[V].....	36
Tabela 3.7: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos com Curto-Circuito e Carga no Estator.....	39
Tabela 3.8: Valores da Densidade de Fluxo Magnético nos Polos com Curto-Circuito e Carga no Estator Após Normalizar a Tensão.....	41
Tabela 3.9: Características Elétricas MS de Grande Porte.....	47
Tabela 3.10: Resistências a 75°C.	47
Tabela 3.11: Reatâncias.....	47

Lista de Símbolos

$R_{variavel}$	Resistência variável
CD	Componente continua
I_e	Corrente de excitação
A_t	Amperímetro
V_t	Voltímetro
$U_1, U_2, V_1, V_2, W_1, W_2$	Terminais da máquina síncrona
A, B, C	Fases da máquina síncrona
V	Tensão induzida
K_f	Fator dos enrolamentos das bobinas do estator
f	Frequência fundamental
N_v	Número de voltas nas bobinas do estator
Φ_m	Fluxo magnético em cada um dos polos do rotor
n_r	Velocidade de rotação
p	Número de polos do rotor
σ	Condutividade elétrica
A	Vector potencial Magnético
B	Densidade de Fluxo Magnético
μ_o	Permeabilidade do espaço livre
μ_r	Permeabilidade do material.
v	Velocidade do condutor.
J_e	Densidade de corrente externa
D	Densidade de corrente de deslocamento
E	Campo elétrico
$E_{material}$	Campo elétrico do material
n	Vetor normal
L	Comprimento estator da máquina síncrona
T_p	Temperatura
pA	Pressão atmosférica
A_r	Área de uma bobina
N, K	Número das funções que integram determinadas bobinas

1D	Plano unidimensional
2D	Plano bidimensional
3D	Plano tridimensional

Lista de Abreviaturas

MS	Máquina Síncrona
MSIP	Máquina Síncrona de Imã Permanente
EF	Elementos Finitos
FEM	Método de Elementos Finitos
CAD	Desenho Assistido por Computador
VFF	Tensão Fase-Fase
VFN	Tensão Fase-Neutro

Conteúdo

O capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos e motivações que fizeram desenvolver este trabalho, também a revisão bibliográfica onde se apresenta um breve resumo sobre os estudos desenvolvidos até hoje sobre elementos finitos aplicados a máquinas síncronas. Nos seguintes parágrafos, descrevem-se brevemente cada um dos capítulos que conformam este trabalho.

No capítulo 2, apresentam-se as generalidades das Máquinas Síncronas e seus princípios de funcionamento na hora de trabalhar como Gerador de energia elétrica. Também se dá a definição do Método dos Elementos Finitos, equações que utiliza para o cálculo eletromagnético em COMSOL Multiphysic, as vantagens e desvantagens de trabalhar com Elementos Finitos e os módulos de processamentos do software de Elementos Finitos durante o processo de cálculo das grandezas de interesse no sistema discreto.

Os modelos e simulações são definidos no capítulo 3, onde se analisam os resultados das simulações em 2D em modo temporal e em 3D em modo estacionário. Inicialmente se explica como se definem os parâmetros do modelo em COMSOL Multiphysic para a simulação, logo se estudam os resultados da máquina síncrona de pequeno porte e se comparam os valores da tensão com dados reais, logo se analisam os resultados da máquina de grande porte.

Para finalizar, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e também sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

1.1 Introdução

Para cumprir com a demanda energética que aumenta dia a dia, é necessário utilizar máquinas elétricas (máquinas síncronas) para a geração de energia elétrica, tanto em centrais de pequeno como de grande porte. Devido à necessidade mundial de ter sistemas de geração de energia mais eficientes e confiáveis, as empresas produtoras de energia estão incentivando as pesquisas desenvolvidas sobre máquinas síncronas, a fim de melhorar o rendimento destas e detectar falhas que podem obrigar o desligamento não programado, causando um longo tempo de indisponibilidade da máquina e alto custo de manutenção.

A particularidade da máquina síncrona é que esta gira a uma velocidade constante em estado estacionário. Ao contrário das máquinas de indução, o campo magnético e o rotor giram na máquina síncrona à mesma velocidade, chamada Velocidade Síncrona (SEN, 1997).

As máquinas síncronas podem ser utilizadas tanto como motores quanto geradores. Devido às características construtivas e ao seu custo maior em relação às máquinas de indução, elas são, entretanto, mais utilizadas como geradores em centrais elétricas, independentemente do seu tipo (hídrica, a carvão, a diesel, etc.). Grande parte da energia elétrica gerada no mundo é produzida por geradores síncronos em centrais elétricas, portanto a função principal de estes geradores é converter a energia mecânica em energia elétrica. Além de serem usados em centrais elétricas de grande porte, os geradores síncronos também são usados para gerar energia elétrica em centrais de pequeno porte e em geradores de emergência, que são instalados em indústrias, hospitais, aeroportos, etc. Neste caso o gerador não está ligado a um grande sistema de energia, mas funcionando de forma isolada (ANTUNES, 2007). Devido ao fato das máquinas síncronas serem usadas na maioria dos sistemas de geração de energia elétrica do mundo, a sua operação pode afetar tanto a confiabilidade como a estabilidade do sistema elétrico de potência; estas são consideradas como um dos principais elementos do sistema de potência.

Já que a máquina síncrona é um dos principais elementos do sistema elétrico falhas nas mesmas afetam diretamente o sistema. As falhas de curto circuito no bobinado do rotor podem causar aumento da temperatura e vibrações no rotor, assim como variação da tensão de saída. Esses tipos de falhas são difíceis de detectar através de medições simples de tensão e corrente

ou por análise de vibrações. Para diagnosticar esses tipos de falhas, é necessário fazer uma análise de outras magnitudes da máquina síncrona, como a densidade de fluxo magnético no entreferro ou em outras regiões da máquina. A análise da densidade de fluxo pode ser considerada como uma técnica preditiva para a detecção de falhas de curto circuito na bobina do rotor, permitindo diagnosticar os defeitos no bobinado do rotor e programar paradas de manutenção preventivas, poupando, desta forma, tempo e custo de manutenção.

Uma maneira de investigar com maior acerto a densidade de fluxo magnético da máquina síncrona é através de simulações computacionais baseadas no Método de Elementos Finitos. Os elementos finitos são uma ferramenta de análise matemática para a solução de problemas definidos por equações diferenciais parciais implicados em problemas físicos (MEUNIER, 2008). Nesta ferramenta um meio físico contínuo é discretizado em pequenas partes geometricamente bem definidas, preservando as propriedades do meio e do ambiente físico original. Todos os elementos geométricos que fazem parte da discretização são representados pelas equações anteriormente mencionadas e conjuntamente com as condições de contorno de cada elemento calculam-se as soluções do sistema discreto. O sistema completo é representado por uma matriz que contém o conjunto de equações de todos os elementos, chamado de Elementos Finitos.

Para a realização dessas simulações empregou-se o software *COMSOL Multiphysics*. Esta é uma plataforma computacional multipropósito com base em métodos numéricos avançados (elementos finitos), nesse programa pode-se modelar e simular uma grande quantidade de sistemas físicos. A vantagem das simulações sobre os testes reais, é que as simulações facilitam entender o comportamento do sistema. O tipo de estudo feito por meio de simulações computacionais é muito importante para as pesquisas já que permitem realizar análises minuciosas das grandezas de difícil medição ou descrição de seu comportamento, como é o caso da distribuição da densidade de fluxo magnético na máquina síncrona.

Em trabalhos feitos anteriormente, tem-se demonstrado que os estudos desenvolvidos usando simulações, baseadas em elementos finitos, são bastante eficazes, pois os dados obtidos como resultados são muito próximos aos valores obtidos de testes reais.

Neste trabalho validou-se dados resultantes das simulações com dados reais tomados de ensaios realizados em laboratório a fim de encontrar a convergência entre os mesmos e comprovar a eficiência das simulações.

1.2 Justificativa

Conforme descrito anteriormente, a máquina síncrona é um dos principais elementos do sistema de potência e o método dos elementos finitos é de grande utilidade para a avaliação da densidade de fluxo magnético em diferentes partes da máquina síncrona e, determinar seu comportamento quando a máquina atua em estado normal ou com falhas, como por exemplo, falhas de curto circuito em uma das bobinas do rotor.

Falhas de curto circuito no bobinado do rotor da máquina síncrona trabalhando como gerador podem causar aumento da temperatura, vibrações e diminuição da tensão de saída, resultando em danos irreversíveis no sistema de potência. Atualmente, os equipamentos utilizados para monitorar e detectar as falhas estão baseados em análises de vibrações, temperatura ou corrente do estator. No entanto, esses métodos não são suficientes para detectar um curto circuito em uma das bobinas do rotor.

A fim de facilitar, em trabalhos futuros, a detecção de falhas de curto circuito no bobinado do rotor numa máquina síncrona, por meio de simulações com elementos finitos analisa-se o comportamento da densidade de fluxo magnético nas diferentes regiões da máquina, nas condições normais e anormais de operação.

1.3 Objetivos

Como parte deste trabalho são vislumbrados os seguintes objetivos específicos assim como o objetivo geral.

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma análise qualitativa e quantitativa do comportamento da densidade do fluxo magnético em diferentes partes das máquinas síncronas, de pequeno e grande porte. Utiliza-se o método dos elementos finitos para estudar as falhas de curto circuito nas bobinas do rotor, quando as máquinas trabalham em vazio e com carga conectada no enrolamento estatórico. Por último realiza-se estudos comparativos dos dados resultantes das simulações da máquina de pequeno porte com dados obtidos em testes reais.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o comportamento da densidade de fluxo magnético da máquina síncrona de pequeno porte (4 polos-36 ranhuras) operando em regime normal em vazio e sob carga.
- Estudar o comportamento da densidade de fluxo magnético da máquina síncrona de pequeno porte (4 polos-36 ranhuras) com curto-circuito na bobina de um dos polos do rotor, em quanto opera em vazio e sob carga.
- Comparar os dados resultantes da simulação com dados tomados de testes feitos em laboratório em uma máquina síncrona das mesmas características.
- Como sugestão para trabalhos futuros, analisar os resultados preliminares da densidade de fluxo magnético da máquina síncrona de grande porte (60 polos-468 ranhuras) em regime normal e em curto-circuito na bobina de uns dos polos durante sua operação em vazio.

1.4 Revisão Bibliográfica

Como a máquina síncrona é um dos principais elementos do sistema de potência, falhas nessa podem causar um grande impacto no sistema elétrico. A maioria dos estudos com o método de elementos finitos aplicados às máquinas síncronas se referem ao dimensionamento e também à determinação dos parâmetros. Poucos estudos são realizados na área de análise de falhas, precisamente curtos-circuitos nas bobinas do rotor, o alvo de nosso estudo.

Ao longo dos anos tem-se utilizado vários métodos para o dimensionamento das máquinas síncronas. Seus testes, para a validação do comportamento da densidade de fluxo magnético e as tensões de saída, são feitos através de simulações computacionais usando o método dos elementos finitos.

A pesquisa desenvolvida por (JULIANI, 2007) trabalha o dimensionamento de uma máquina síncrona de ímãs permanentes no rotor. Neste estudo a máquina foi projetada utilizando-se a estrutura ferromagnética do estator de um motor de indução monofásico de 24 ranhuras, o qual recebeu um novo enrolamento trifásico. Também foi construído o rotor o qual é constituído de ímãs permanentes em sua superfície. Dessa maneira utilizou-se um programa computacional baseado no método de elementos finitos para a análise de grandezas como tensão

induzida, densidade de fluxo magnético, torque magnético e perdas. São apresentados resultados numéricos comparativos para a máquina síncrona, com alterações tais como: diminuição da distância do entreferro, troca do imã permanente por outro de maior energia, recálculo do número de espiras e diâmetro do enrolamento estatórico. O resultado mais importante obtido com estas mudanças foi o aumento do torque magnético.

Assim como em (JULIANI, 2007), em (SIMÕES, 2010) e (JIMÉNEZ, 2011), se trabalhou no dimensionamento de uma máquina síncrona de imãs permanentes. Em (SIMÕES, 2010) fez-se um trabalho de concepção e análise baseado em especificações prévias, como a tensão nominal em vazio e a densidade de fluxo magnético máxima no núcleo do estator. Foram dimensionados analiticamente os parâmetros geométricos e de bobinagem mais importantes que permitiram a construção de um modelo computacional, através do programa de elementos finitos. As simulações permitiram verificar a precisão do dimensionamento analítico e estudar aspectos como a qualidade da forma de onda da força eletromotriz em vazio e os níveis de indução magnética nas diferentes regiões da máquina síncrona. Em (JIMÉNEZ, 2011), fez-se um estudo teórico e de modelagem da máquina síncrona em vazio e sob carga. Em seguida, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos através da modelagem por elementos finitos e os resultados calculados com as fórmulas analíticas clássicas baseadas em máquinas ideais simplificadas. Esses estudos resultaram em densidades de fluxo magnético e tensões parecidas em ambos os casos, permitindo concluir que as leis e hipóteses baseadas em máquinas elétricas simplificadas. Atualmente, no âmbito teórico, podem ser consideradas como boas aproximações da realidade.

Em (KIMPARA, 2012), descreve-se a modelagem de geradores síncronos usando o Método de Reconstrução de Campo. Neste trabalho é desenvolvido a modelagem da máquina síncrona de rotor de polos lisos e polos salientes. A distribuição da densidade de fluxo magnético é determinada para condições arbitrárias de operação e se aplica a Teoria do Tensor de Maxwell para calcular a forças e os conjugados. A vantagem de utilizar a modelagem pelo método de reconstrução de campo é a rápida e precisa estimativa da densidade de fluxo magnético no entreferro da máquina. Os resultados da simulação usando os modelos foram comparados com a resposta do método dos elementos finitos, demonstrando que o modelo de reconstrução de campo proporciona uma solução acertada, com a vantagem de ser um pouco mais eficiente em termos computacionais, mas sempre vai depender do FEM, especificamente do desenho e do modelo.

Nos estudos desenvolvidos por (NABETA; CARDOSO, 1998) e (ZAMBRANO, 2003), se estabelecem os parâmetros operacionais de uma máquina síncrona de polos salientes, através da determinação das curvas características de resposta em frequência usando o método de elementos finitos em simulações computacionais. Em (NABETA; CARDOSO, 1998) a través das simulações numéricas são medidas as tensões e as correntes estatóricas da máquina síncrona durante uma faixa de frequência para a obtenção das curvas características. Estes resultados são comparados com valores obtidos de ensaios reais da máquina, em curto circuito trifásico, apresentando boa conformidade entre os valores da simulação e os valores reais. Em (ZAMBRANO, 2003), para a obtenção destas curvas alimentou-se a máquina síncrona com uma tensão senoidal e a frequência foi mantida constante. Com os resultados obtidos realizou-se o cálculo dos parâmetros para obter o circuito equivalente da máquina síncrona.

Em (SCHMIDT; GRABNER; TRAXLER-SAMEK, 2001), se determinam as reatâncias de uma máquina síncrona de grande porte com polos salientes operando em regime permanente. Considerou-se um método de análise otimizado para resolver o modelo de elementos finitos. Este método de análise utiliza um algoritmo de decomposição do domínio, permitindo a divisão de todo o modelo de elementos finitos em partes distintas do estator e partes do rotor. As reatâncias foram obtidas a partir do cálculo de espaço vectorial, o qual usa os valores da densidade de fluxo. Os resultados da análise foram comparados com dados obtidos a partir de medições demonstrando aderência entre os valores.

A determinação dos parâmetros de uma máquina síncrona de polos salientes, usando simulações por elementos finitos baseadas no domínio do tempo é feita em (AMAYA et al., 2003). No trabalho fizeram-se as simulações usando diferentes valores de tensão para demonstrar a influência da saturação nos parâmetros calculados. Os parâmetros foram calculados mediante avaliação das correntes e tensões após a simulação de um curto circuito repentino nos terminais da máquina síncrona. Obteve-se um erro relativamente pequeno entre os parâmetros calculados mediante a simulação e os parâmetros medidos, comprovando a efetividade do método dos elementos finitos.

Tanto em (AMAYA et al., 2003) como em (LUQUE; RUPPERT, 2012), se determinam os parâmetros de uma máquina síncrona de polos salientes, através da simulação dos ensaios de curto circuito, utilizando o método dos elementos finitos. Para a determinação dos parâmetros se empregaram métodos numéricos que utilizam as dimensões e características físicas da máquina síncrona. A partir da obtenção desses dados, é possível representar, mediante

a modelagem eletromagnética da máquina síncrona, os procedimentos para a simulação do curto circuito trifásico. Os dados resultantes das simulações foram comparados com dados de ensaios de curto circuito em uma máquina síncrona real, dando como resultados valores razoáveis para os parâmetros nos regimes permanente e transitório.

Em (VARGAS; HERNÁNDEZ, 2009), se estimam os parâmetros elétricos de uma máquina síncrona de grande porte, a partir da geometria e das propriedades ferromagnéticas dos materiais que conformam a máquina síncrona e simulações baseadas no método dos elementos finitos. A partir dos valores das propriedades descritas anteriormente e usando as equações em regime permanente de operação, obteve-se a densidade de fluxo magnético e suas linhas de distribuição. Em regime transitório, aplica-se curto circuito trifásico repentino nos terminais do gerador em vazio para se obter os valores de corrente de campo. Além disso, aplica-se curto circuito bifásico para obter os valores de corrente nos enrolamentos do estator. Através destas correntes, aplicando análise de circuitos, os parâmetros elétricos da máquina foram obtidos. Os resultados da simulação foram comparados com os dados fornecidos pelo fabricante observando a similaridade entre eles.

No trabalho desenvolvido por (SJOKVIST; ERIKSSON, 2013), determina-se o risco de desmagnetização dos ímãs permanentes de uma máquina síncrona acionada por uma turbina eólica. No programa de elementos finitos são simulados curtos circuitos no enrolamento estático para determinar como estes afetam a magnetização dos ímãs permanentes. No trabalho são usados diferentes tipos de ímãs, a fim de se comparar e determinar qual é mais afetado pelo curto circuito no enrolamento estático. Pode-se concluir de que ímãs de menor qualidade sofrem uma maior desmagnetização.

Em (GÜEMES; IRAOLAGOITIA, 2000), analisa-se a influência do tamanho dos ímãs no comportamento de uma máquina síncrona de baixa velocidade com ímãs na superfície do rotor. Através das simulações computacionais baseadas em elementos finitos são comparadas duas máquinas síncronas com diferentes geometrias de rotor e igual estator. Nos resultados apresentados, observa-se a influência da modificação do tamanho dos ímãs nas principais características da máquina, como: a corrente do estator, densidade de fluxo magnético e tensão de saída.

Em (BALTIERRA; CERVANTES; ESCARELA, 2004), baseado no método dos elementos finitos, estudou-se o modelo de um gerador síncrono de polos lisos. Utilizam-se diferentes valores de corrente de excitação para determinar a tensão de saída em comparação

com dados experimentais, podendo observar que a relação entre as correntes de excitação e as tensões de saída são muito parecidas, tanto nos dados experimentais, quanto os dados resultantes da simulação. Após fixar a tensão de saída em 13,8 kV mostra-se o comportamento da densidade de fluxo magnético quando a máquina está trabalhando sem carga. Também é simulada uma condição em regime transitório por meio de uma falha trifásica nos terminais no enrolamento estatórico e se mostra como esta afeta a distribuição da densidade de fluxo magnético no rotor e no estator da máquina.

No trabalho feito por (CHANDRA; RAM, 2011), utilizou-se o método dos elementos finitos para a avaliação da reatância de uma máquina síncrona trifásica quando está apresenta falhas de curto-circuito no bobinado estatórico. Com os valores de corrente e tensão obtidas das simulações calculou-se o valor da reatância usando os métodos analíticos tradicionais. Em trabalhos futuros, este modelo se utilizara para coletar valores de corrente e tensão para gerar uma base de dados e desenvolver um modelo ou método matemático capaz de detectar falhas de curto-circuito no bobinado interno da máquina síncrona.

Os métodos utilizados são os métodos analíticos tradicionais e o método dos elementos finitos. Os resultados de cada um destes métodos são apresentados graficamente. Os autores também fazem uma abordagem do estudo de falhas de curto circuito no enrolamento interno desta máquina síncrona, produzidas pela degradação do esmalte no bobinado estatórico.

Em (ARAÚJO, 2011) trabalha-se na detecção de falhas em geradores síncronos, enfatizando falhas de curto circuito nos enrolamentos das bobinas do rotor. Para este trabalho utilizou-se um gerador síncrono de polos lisos. Nesse estuda-se técnicas usadas para a detecção de falhas em geradores, por meio da análise da densidade de fluxo magnético no entreferro e desta maneira detectar o curto circuito nas bobinas do rotor. Os dados da densidade de fluxo magnético foram obtidos de simulações por elementos finitos, já que não dispunham de um protótipo de gerador para a realização do teste. Para a análise dos dados obtidos na simulação foram usadas técnicas de processamento de sinais, através da decomposição do sinal por series de Fourier, permitindo caracterizar a densidade de fluxo no domínio da frequência. Durante o estudo se fizeram várias simulações do gerador trabalhando em vazio e sob carga, com operação em estado normal e em curto circuito nos enrolamentos das bobinas do rotor. Na análise dos dados observou-se que, o padrão do espectro do sinal da densidade de fluxo magnético, apresentou alterações à medida que se colocavam curtos circuitos nos enrolamento das bobinas dos polos, permitindo identificar este tipo de falhas na máquina síncrona.

Duas formulações com foco em elementos finitos foram propostas em (KHALF; WAMKEUE; AGUGLIA, 2012) para prever o rendimento de uma pequena máquina síncrona de polos salientes. Os enfoques usados são: os problemas magneto-estáticas e os problemas transitórios de escalonamento no tempo. Usando essas duas formulações pode-se determinar o rendimento da máquina em regime permanente e transitório em vazio, além disso, pode-se prever o comportamento no caso de uma falha de curto circuito trifásico. Os resultados das simulações que envolvem os dois enfoques foram comparados com resultados experimentais demonstrando a eficiência dos métodos proposto, já que os valores ficavam muito próximos.

A análise das falhas em uma máquina síncrona de polos salientes é feita em (RODRIGUES, 2013). Através de simulações com programa de elementos finitos estudou-se o comportamento transitório da máquina síncrona na presença e ausência dos enrolamentos amortecedores. Também foi analisada a distribuição da densidade de fluxo magnético em diferentes regiões da máquina e as correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores, na ocorrência de um curto circuito trifásico nos terminais do enrolamento estatórico. Com os dados de densidade de fluxo magnético, obtidos das simulações do gerador operando a vazio e sob carga, faz-se um estudo comparativo para determinar as principais diferenças entre a operação em estado normal e em curto circuito. Paralelo a isto, analisa-se como se comporta o gerador com e sem os enrolamentos amortecedores. Como resultado do estudo pode-se observar a desmagnetização do estator durante a ocorrência do curto circuito. Além disso, observou-se uma forte magnetização no rotor no instante da ocorrência da falha e, quando os amortecedores são removidos, observa-se como as correntes de campo têm valores mais altos.

Os trabalhos descritos nos parágrafos anteriores não fazem ênfase e nem tem como objetivo estudar o comportamento da densidade de fluxo magnético quando a máquina síncrona de polos salientes apresenta falhas de curto-circuito nas bobinas dos polos do rotor. Como se disse anteriormente, nos trabalhos descritos acima o método de elementos finitos é aplicado com maior frequência ao dimensionamento e cálculo dos parâmetros das máquinas síncronas. Por estes motivos este trabalho é de grande importância, já que não existem precedentes neste tipo de pesquisas.

Capítulo 2

2.1 Máquina Síncrona (MS)

Quando se trata de geração de energia em centrais hidroelétricas a máquina síncrona (MS) é a principal escolha devido ao alto rendimento que pode atingir. A MS pela sua constituição pode definir-se simplesmente como um conversor eletromecânico de excitação múltipla (CORTES, 2004). Ao contrário das máquinas de indução, a MS opera a frequência e a velocidade constantes em regime permanente (NASAR, 1984). Durante todo esse tempo o campo girante, presente no entreferro, e o rotor giram à mesma velocidade, também chamada velocidade síncrona, justificando sua denominação. Dependendo do seu tamanho e potência uma MS pode ser completamente reversível e pode trabalhar, tanto como motor, quanto como gerador dentro dos seus limites de operação. Quando trabalha como gerador a máquina síncrona converte energia mecânica em energia elétrica de corrente alternada.

Uma máquina síncrona (gerador síncrono) consiste essencialmente em dois elementos: um tem a função de produzir um campo magnético de excitação e, o segundo é formado por um conjunto de bobinas onde há indução de tensão consequente do movimento relativo entre os dois elementos (ALTINO, 1984). O elemento onde é gerado o campo de excitação é conhecido como rotor, esta é a parte giratória da MS acionada através de uma máquina primária acoplada ao seu eixo como se pode ver na Figura 2.1. O elemento onde estão localizadas as bobinas onde são induzidas as tensões é conhecido como estator e é a parte fixa da máquina síncrona. O espaço interno da máquina entre o rotor e o estator recebe o nome de entreferro, o tamanho do entreferro é diretamente proporcional à corrente de excitação do rotor. Portanto, um aumento no entreferro requer uma corrente de excitação maior para compensar a redução do fluxo magnético pela alta relutância em essa área.

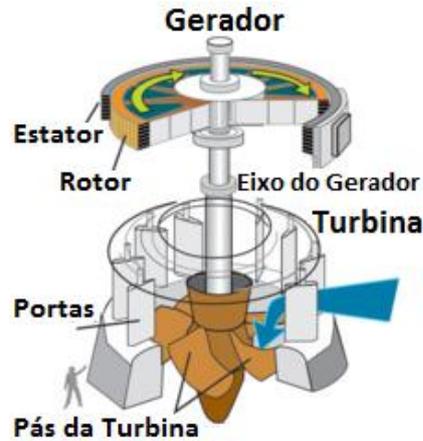


Figura 2.1: Turbina Acoplada ao Gerador Síncrono¹.

Existem dois tipos principais de MS's; máquina síncrona de imã permanente e a máquina síncrona de rotor bobinado, a qual foi usada para nosso estudo. A máquina síncrona de imãs permanentes (Figura 2.2) não possuem enrolamentos de campo, os quais são substituídos por imãs permanentes de alto produto energético que fornecem um fluxo de excitação constante no caso da máquina operar como gerador (DIAS et al., 2005; SPERB, 2013). Estes imãs são fixados sobre a superfície do rotor ou inseridos nele. Os imãs permanentes geram fluxo magnético naturalmente, sem necessidade de excitação. Assim, esse tipo de máquina não precisa de uma fonte de excitação de corrente contínua. Comumente essas são máquinas de pequeno porte.

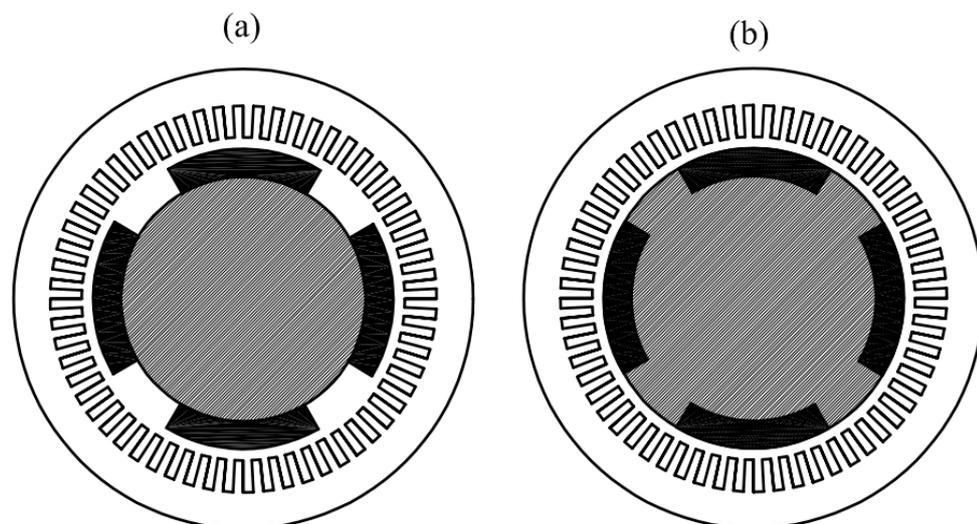


Figura 2.2: MSIP Superficial (a) e MSIP Internos (b) (DE ANGELO, 2004).

¹ Disponível em: https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica

A máquina síncrona de rotor bobinado tem polos magnéticos que, dependendo da aplicação, podem ser construídos salientes ou não salientes. Um polo saliente é um polo magnético que se projeta para fora da superfície do rotor e, um polo não saliente é um polo magnético construído ao mesmo nível ao longo da superfície do rotor (CHAPMAN, 2000).

Na Figura 2.3 apresenta-se como é constituída geometricamente uma máquina síncrona com polos salientes e com polos lisos. As máquinas síncronas de polos salientes são utilizadas para aplicações de baixa velocidade, principalmente em usinas hidrelétricas, já que as turbinas hidráulicas funcionam com velocidades relativamente baixas que requerem um alto número de polos para gerar a frequência desejada. Por tanto, os polos salientes se adaptam mecânica e aerodinamicamente a esta situação, já que em aplicações de altas velocidades, acontecem problemas mecânicos decorrentes da distribuição desuniforme da massa no rotor, além das perdas de atrito com o ar. Diferentemente, das turbinas hidráulicas, as turbinas a vapor e a gás, funcionam com velocidades relativamente altas, e os geradores síncronos acionados por estas turbinas, geralmente são máquinas de 2 ou 4 polos com rotor de polos lisos (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; KIMPARA, 2012).

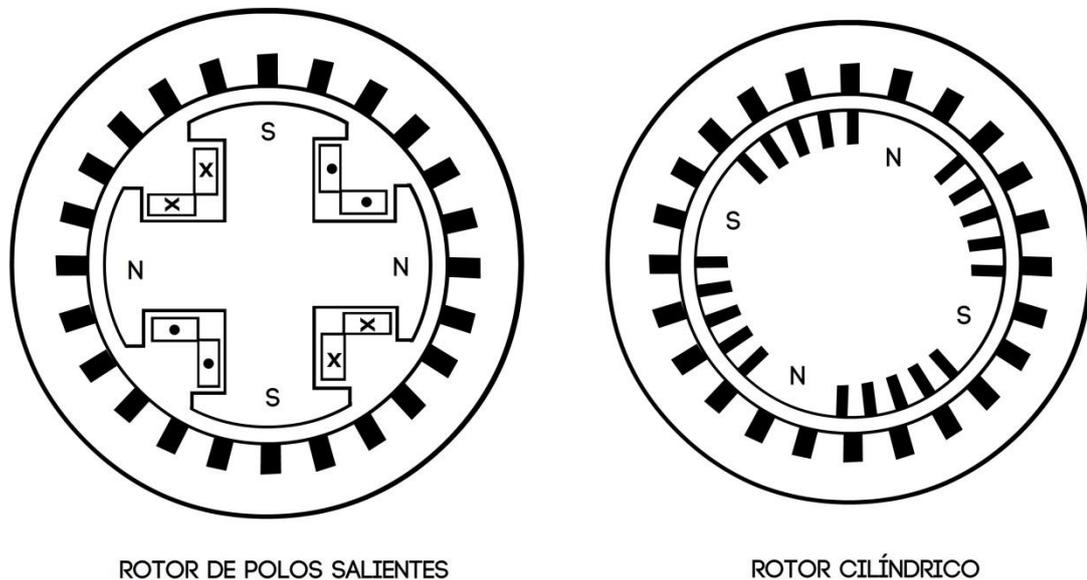


Figura 2.3: MS de Polos Salientes (a) e MS de Polos Lisos (b).

Independente da forma em que estão construídos os polos, estes são feitos de um material ferromagnético de alta permeabilidade. Para nosso estudo foram utilizadas duas MS's de 4 e 60 polos salientes. Nestas máquinas, o material ferromagnético do polo está envolvido por uma bobina, a qual é alimentada por uma corrente contínua, que com base na Lei de Ampère se

produz um fluxo magnético. Esse fluxo magnético, gerado nos polos do rotor é direcionado através do material ferromagnético para o estator, passando de forma radial pelo entreferro. O princípio de funcionamento da MS trabalhando como gerador, está baseado nos fenômenos de indução eletromagnética, ao que está sujeito um condutor ou uma espira quando está exposto a uma variação de fluxo magnético (MARTIGNONI, 1967). No estator de uma MS estão alojados enrolamentos monofásicos ou trifásicos, os quais são bastante parecidos aos enrolamentos de um motor de indução. Como no rotor, o estator é composto por um material ferromagnético de alta permeabilidade, possibilitando a criação caminhos magnéticos. Baseando-se na Lei de Faraday de indução eletromagnética, nos enrolamentos estatóricos são induzidas tensões devido ao movimento do fluxo magnético gerado no rotor. As tensões induzidas nestes enrolamentos são alternadas e, à medida que se aumenta o número de bobinas por fase no enrolamento estatorico, a forma de onda do sinal alternado será mais senoidal, apresentando menos nível de harmônicos. A conexão das fases dos enrolamentos estatóricos tem o mesmo padrão que nas máquinas de indução, possibilitando enrolamentos com ligação série-paralela ou estrela-triângulo (ANTUNES, 2007). Na Figura 2.4 mostra-se o diagrama de conexões da máquina síncrona operando como gerador.

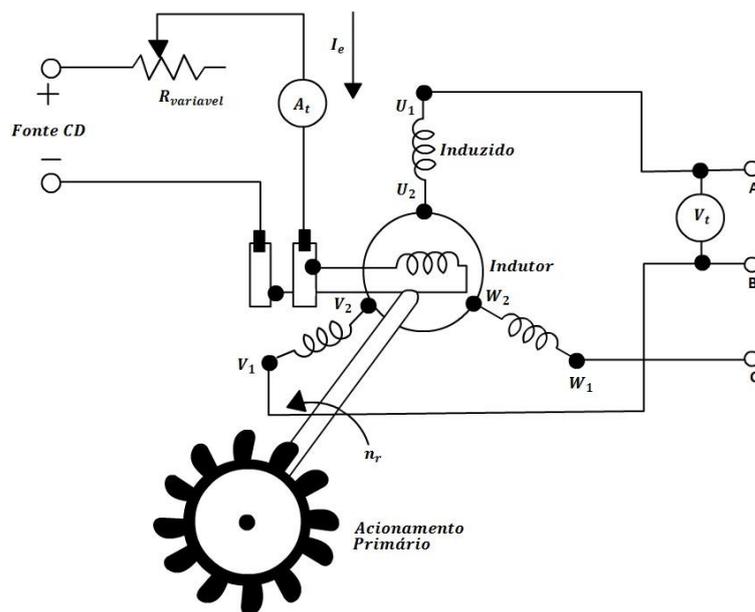


Figura 2.4: Diagrama de Conexões MS (FRAILE MORA, 2003).

As Tensões que são induzidas nos enrolamentos de cada uma das três fases do estator, na medida que os polos giram, são dadas pela Equação (2.1). As três fases do estator estão defasadas no tempo em 120° , que corresponde à separação espacial (graus elétricos) existente entre as bobinas do estator.

$$V = 4.44K_f f_e N_v \Phi_m \quad (2.1)$$

Onde: V – Tensão induzida em cada uma das fases.

K_f – Fator dos enrolamentos das bobinas do estator (Distribuição e Passo).

f_e – Frequência elétrica.

N_v – Número de espiras nas bobinas do estator.

Φ_m – Fluxo magnético em cada um dos polos do rotor

As MS's são máquinas elétricas cuja velocidade de rotação n_r está diretamente relacionada com a frequência da rede elétrica. A relação entre a rotação do rotor e a frequência da tensão gerada se expressa por meio da seguinte equação.

$$f_e = \frac{n_r p}{120} \quad (2.2)$$

Onde: f_e – Frequência da tensão produzida pelo gerador.

n_r – Velocidade de rotação em rpm.

p – Número de polos da máquina síncrona.

De (2.1) e (2.2), pode-se entender que a tensão induzida em cada um dos enrolamentos é proporcional ao fluxo magnético e à velocidade do rotor. Nas máquinas síncronas operando como geradores o fluxo magnético depende da corrente de excitação nas bobinas do rotor e quando esta é nula, a tensão induzida vai ser diferente de zero devido ao magnetismo residual (ANTUNES, 2007).

2.2 Métodos dos Elementos Finitos (FEM)

Na atualidade, o Método dos Elementos Finitos, também conhecido como FEM (do inglês, *Finite Elements Method*) é uma ferramenta muito utilizada para a solução de problemas de engenharia e física. Suas principais aplicações são nas áreas aeronáutica, nuclear, mecânica de sólidos, transferência de calor e estudo de fenômenos eletromagnéticos, na qual tem tido muita força nos últimos anos. Isto devido ao alto grau de exatidão que este método é capaz de alcançar, assim como sua capacidade para a modelagem de sistemas complexos (BASTOS; SADOWSKI, 2003). Portanto o método permite trabalhar com geometrias complexas e produzir soluções estáveis e muito próximas às reais com um tempo de cálculo que vai depender

da complexidade do modelo e das características do computador onde são realizadas as simulações (PAULA, 2011). O FEM permite analisar um sistema real através de um modelo matemático, que é mais fácil e econômico de modificar que um protótipo, possibilitando comparar distintas alternativas do protótipo a fim de se escolher o melhor.

O FEM é uma ferramenta com alto nível de desenvolvimento, tornando-o um dos métodos mais adequados para resolver diferentes problemas em engenharia. Estes problemas podem ser resolvidos como sistemas unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais (PATRICIA; MORALES, 2008), tomando em conta a descontinuidade entre as propriedades dos materiais, a dimensão na qual se estuda o sistema depende da aplicação ou da complexidade do modelo, por exemplo, o estudo da deformação de uma viga pode ser feito em uma, duas ou três dimensões. Já para a análise eletromagnética, a maioria dos estudos são feitos em duas ou três dimensões.

O Método dos Elementos Finitos permite resolver em grande escala, o complexo problema de campo eletromagnético, descrito através de estruturas de dados simples e gerais (S.RATNAJEEVAN; HOOLE, 1989). Na atualidade, o estudo dos fenômenos magnéticos nos processos indústrias e na área de geração de energia é muito importante, sobre tudo nas máquinas elétricas. Logo, o FEM a cada dia se consolida como uma ferramenta de grande importância para o estudo destes fenômenos.

Como formulação matemática, o FEM é relativamente novo, mas sua estrutura básica é conhecida há muito tempo. Nos últimos anos este método tem evoluído graças à sua aplicação em engenharia e aos avanços na computação (GIL; GARCIA; MASSAGUES, 2012). Os avanços na computação permitem usar este método para simular e resolver problemas complexos, que há poucos anos somente podiam ser resolvidos por meio de supercomputadores. Inicialmente o método dos elementos finitos foi desenvolvido para a análise estrutural (CHANDRUPATLA; BELEGUNDU, 1997), mas com o passar dos anos este método tem sido utilizado para resolver diferentes problemas físicos e de engenharia. Em 1941, Hrenikoff apresentou a solução a um problema de elasticidade através de uma coleção de barras e vigas (REDDY, 1993). Já em 1943, Courant propõe a utilização de funções polinomiais para a formulação de problemas de elasticidade em sub-regiões triangulares. Pela primeira vez, o termo Elemento Finito (EF) foi usado por Clough em 1960, no seu trabalho "*The Finite Element Method in Plane Stress Analysis*". Neste trabalho aplicaram EF's conformados por barras e

placas triangulares para a análise de estruturas aeronáuticas (CHANDRUPATLA; BELEGUNDU, 1997).

A partir de 1968 deu-se início ao uso de Elementos Finitos para a solução de problemas elétricos. Nessa vertente, os EF's foram utilizados inicialmente para a solução de problemas de guia de onda relativamente simples. Nos dias de hoje, no entanto já tem sido empregado em muitas áreas onde devem calcular-se potenciais escalares bidimensionais ou funções de ondas (SILVESTER; FERRARI, 1996).

2.2.1 Definição

O FEM é um método de aproximação de problemas contínuos que são divididos em um número finito de partes, denominados elementos finitos. Desse modo, a ideia principal do FEM é dividir um problema complexo e de grande área em problemas simples e de pequenas áreas. O comportamento destas pequenas áreas se especifica mediante um número finito de parâmetros associados aos nós, os quais são uma série de pontos que conectam entre si os elementos. O comportamento em cada elemento está definido por uma matriz, a qual está formada por grupo de funções polinomiais que dependem da interpolação de valores conhecidos nos nós. O processo de dividir o modelo geométrico discreto em pequenos EF's é chamado Malhado ou "Mesh" (SILWAL, 2012). Na Figura 2.5 podemos ver uma geometria de duas dimensões dividida em elementos triangulares com seus respectivos nós. Os elementos triangulares são muito utilizados, especialmente em análise de dispositivos magnéticos, já que matematicamente são fáceis de entender e seus resultados são bastante aproximados, além de ter um custo computacional menor (BALTIERRA; CERVANTES; ESCARELA, 2004). As equações que modelam o elemento contínuo também vão modelar o elemento discreto. A solução do sistema completo se faz mediante o ensemble de cada um destes pequenos elementos, formando um conjunto de equações algébricas, lineares ou não, que ao resolvê-las proporcionam os valores do comportamento do sistema.

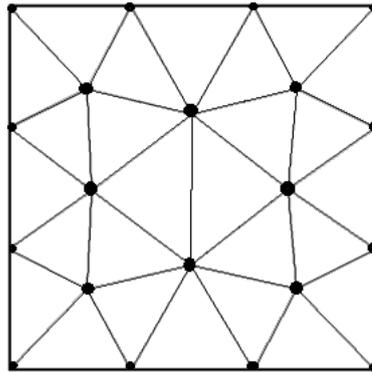


Figura 2.5: Geometria 2D Dividida em Elementos Finitos.

Geralmente para calcular a solução, o FEM se associa com Métodos Variacionais ou Métodos Residuais. Nos métodos variacionais o cálculo numérico se faz partindo de uma função de prova, até chegar à função mais próxima da solução exata do sistema. Para cada problema esta função deve ser definida, mas em alguns casos de estudo achar esta função pode ser um pouco complicado. Ao contrário dos métodos variacionais, os métodos residuais se relacionam diretamente com a equação física a ser resolvida. Isto faz que este método seja fácil de entender e aplicar. Por esta razão a grande parte dos estudos feitos com elementos finitos usam métodos residuais para os cálculos dos valores das funções (ALVARADO, 2012). O Método de Galerkin é o método residual mais usado, tanto para estudos magnéticos, como para outras áreas, graças à exatidão dos seus resultados e a sua matemática um pouco mais compreensível que a dos outros métodos, aqui se calcula o resultado ponderando os resíduos da equação diferencial.

2.2.2 Vantagens e Desvantagens do FEM

Para a análise e modelagem de elementos físicos, o FEM é a ferramenta computacional mais usada pelos engenheiros devido a sua versatilidade na aplicação das diferentes áreas da engenharia.

As principais vantagens do FEM são: amplo campo de aplicabilidade, já que pode ser aplicada a qualquer geometria e não tem inconveniente com a descontinuidade entre as propriedades dos materiais. O tempo de desenvolvimento de um produto vai ser muito menor e se podem identificar problemas nesta etapa antes da fabricação de um protótipo, além disso, reduz o número de etapas de ensaio e de protótipos. Para a análise de elementos que se

encontram em funcionamento na indústria, este método permite fazer um estudo detalhado e conhecer o funcionamento destes elementos sem a necessidade de parar todo o processo.

A desvantagem deste método se deve aos erros que podem ser gerados se não se definirem corretamente as condições de contorno, assim como as físicas e as propriedades dos materiais. A precisão dos resultados dependerá do número de malhas que conformam o elemento discreto: quanto maior número de malhas os resultados serão mais parecidos aos resultados do sistema real, mas o tempo de cômputo vai aumentar proporcionalmente.

2.2.3 Equações para Eletromagnetismo

Os fenômenos magnéticos que ocorrem dentro da MS são descritos mediante equações derivadas das Equações de Maxwell, as quais são representadas de forma diferencial e se complementam com as propriedades dos materiais que conformam a MS. A ideia principal do FEM é calcular o potencial vetor magnético dentro de um domínio que conta com regiões permeáveis e condutoras. A seguir, são apresentadas as equações utilizadas pelo software COMSOL *Multiphysic* para os cálculos magnéticos em análise dinâmica.

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \right) - \sigma \vec{v} \times \vec{B} = \vec{J}_e \quad (2.3)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.4)$$

Onde: σ – Condutividade do material

\vec{A} – Potencial vetor magnético (Wb/m).

\vec{B} – Densidade de fluxo magnético (T).

μ_0 – Permeabilidade do espaço livre ($4\pi * 10^{-7}$).

μ_r – Permeabilidade do material.

\vec{v} – Velocidade do condutor.

\vec{J}_e – Densidade de corrente externa (A/m^2)

A Equação (2.3) corresponde à lei de Ampère que é utilizada junto à Equação (2.4) para o cálculo do potencial vetor magnético. Em (2.3) a densidade de corrente de deslocamento é desprezada, devido as baixas frequências da aplicação e $|J_e| \gg \left| \frac{\partial D}{\partial t} \right|$. Além disso adiciona-se o termo $\sigma v \times B$, o qual representa as Correntes parasitas que são geradas graças ao fluxo

magnético variante dentro da MS. A densidade de corrente externa J_e é constante em toda a área condutora onde é aplicada. Em (2.4) se expressa a densidade de fluxo magnético em função do potencial magnético vetorial.

O COMSOL *Multiphysics* também usa a Lei de Faraday e a Lei de Gauss para calcular as grandezas de interesse. Essas equações não apresentam alterações na sua estrutura original como acontece com a Lei de Ampère e são representadas a seguir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

Em (2.5) \vec{E} representa o campo elétrico que dependerá da variação de densidade de fluxo magnético \vec{B} . Esta equação estabelece que um campo magnético variante no tempo induz um campo elétrico, o sinal negativo indica que o sentido do campo elétrico é contrário ao sentido da densidade de fluxo magnético. Em (2.6) as linhas de campo magnético não divergem em nenhum ponto. Diferentemente das linhas de campo elétrico, as de campo magnético não iniciam nem terminam em cargas diferentes, motivo pelo qual sua divergência é nula (HALLIDAY, 1994; SERWAY, 2000). Como a densidade de fluxo magnético dentro da MS gira junto ao rotor a uma determinada velocidade. Através da Equação (2.7) se impõem certas transformações adequadas às definições de campo elétrico em todos os domínios em função da velocidade de rotação.

$$\vec{E} = \vec{E}_{material} + \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

Além das equações para campo magnético e elétrico, também existem as equações das regiões de contorno as quais se devem cumprir para definir os limites de estudo onde se quer conhecer o potencial e a densidade de fluxo magnético.

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0 \quad (2.8)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

As Equações (2.8) e (2.9) representam os nós de isolamento magnético, estes tem condições de limites predeterminados para o potencial magnético vetorial e a densidade de fluxo magnético e estabelece que o produto vetorial entre o vetor normal \vec{n} e o potencial magnético nesta região seja igual à zero, sendo o mesmo resultado para o produto escalar entre o vetor normal e a densidade de fluxo magnético.

2.2.4 Etapas do Cálculo com Software de Elementos Finitos

COMSOL *Multiphysics* é o programa usado para a modelagem da MS, inicialmente era conhecido como FEMLAB. Este programa facilita o processo de modelagem, mediante uma interface que permite uma solução através de diferentes fenômenos físicos, por isso recebe o nome de *Multiphysics*. Os sistemas físicos podem ser resolvidos em uma, duas ou três dimensões (MENDOZA, 2013; RESA, 2011). Para resolver um problema físico usando este software, se realizam-se os passos representados no diagrama de fluxo da Figura 2.6.

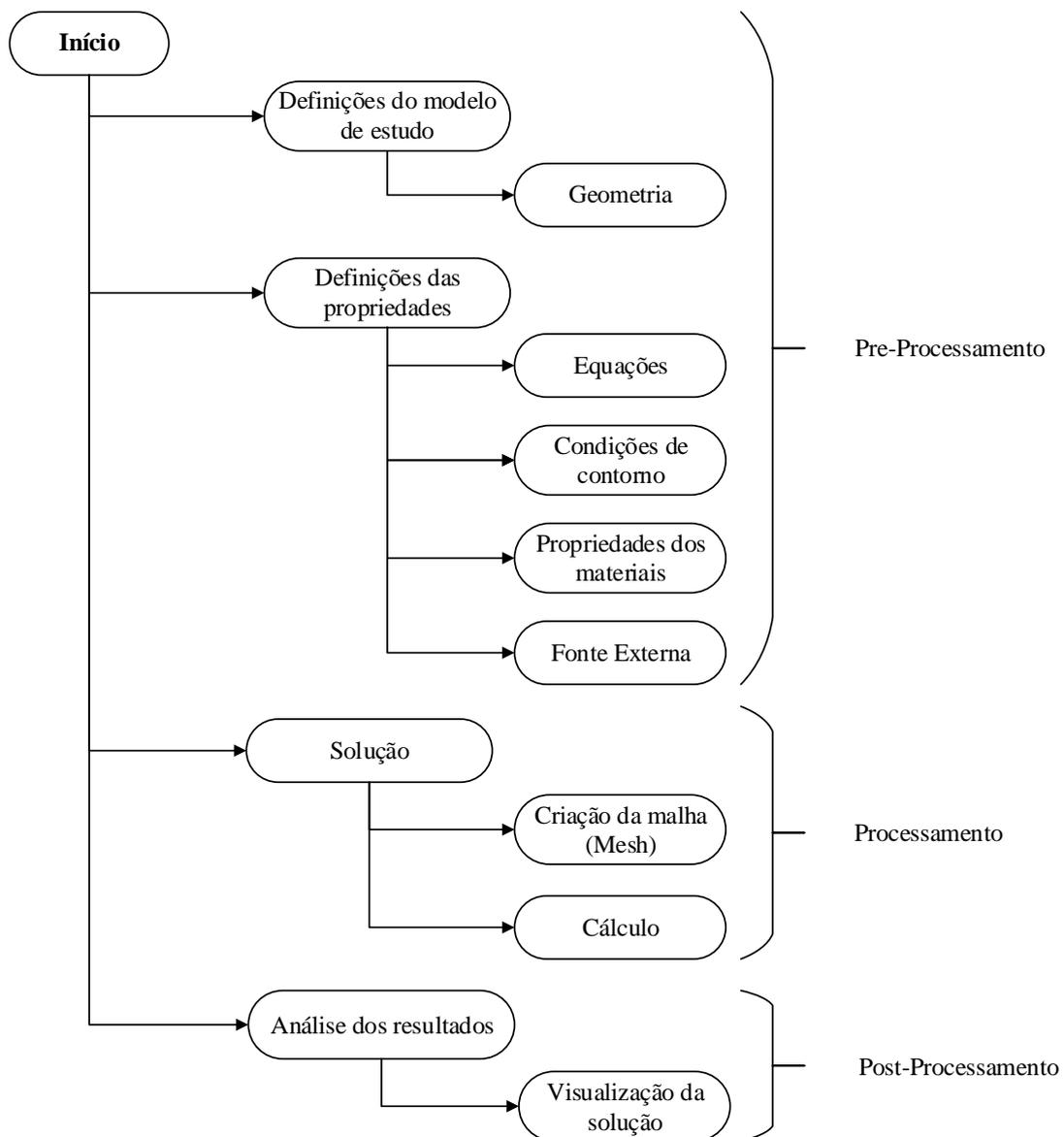


Figura 2.6: Diagrama de Fluxo do Cálculo por Software de EF.

No digrama de fluxo da figura anterior se apresenta uma solução de caráter geral de como o programa encontra a solução para o modelo de um meio físico. O processo para determinar a

solução do modelo está dividido em três módulos ou etapas. A primeira é a etapa de Pré-Processamento, na qual define-se o modelo do ponto de vista geométrico e físico. Na sequência temos as Definições das Propriedades onde define-se as equações, condições de contorno, propriedades dos materiais e a fonte externa. As equações são especificadas dependendo do tipo de análise (estático ou dinâmico) e as Leis de Maxwell usadas para o estudo (Ampère, Faraday, Gauss). As condições de contorno definem grandezas nas fronteiras da região de interesse. Nas propriedades dos materiais se definem os materiais que conformam o meio físico, os quais podem ser obtidos das bibliotecas do programa e por último nas definições das propriedades define-se a fonte de excitação do modelo, que, neste caso, consiste na densidade de corrente externa.

A solução faz parte da etapa de Processamento, no qual gera-se a malha do sistema discretizado. Além disso, durante o cálculo das equações que conformam o sistema são determinadas as grandezas de interesse, que para o presente estudo, consiste na densidade de fluxo magnético.

Como última etapa o Pós-Processamento, representa-se graficamente os resultados da simulação para a análise dos resultados. Também pode-se exportação os resultados para ser analisados em outros programas de processamento de dados.

Capítulo 3

3.1 Simulação

Neste trabalho foram feitas simulações em duas e três dimensões para a máquina de pequeno porte e, em duas dimensões para a máquina de grande porte. Estas simulações têm como alvo o estudo da densidade de fluxo magnético em condições normais de operação e com curto circuito no rotor. Para os dois tipos de MS o processo de simulação é igual.

3.1.1 Simulação em 2D

Para a construção do modelo em duas dimensões tomou-se como base o diagrama de fluxo da Figura 2.6. Inicialmente seleciona-se o espaço dimensional, que para este caso será em 2D. A física de estudo, neste caso é “*Rotating Machinery, Magnetic (rmm)*”, e se escolhe o modo temporal para realizar o estudo dependente do tempo. Logo, em definições globais são definidas alguns parâmetros, como: o comprimento do estator “*L*”, velocidade rotacional do rotor “*rpm*” e outros parâmetros como a temperatura “*T_p*” e a pressão atmosférica “*pA*”. Após esse processo inclui-se a geometria que representa a MS, a qual está dada por um corte transversal da máquina. Esta definição pode ser feita no COMSOL *Multiphysics* ou pode ser importada de outro programa por meio de um arquivo CAD na pasta “*Geometry*”. Em seguida, na pasta chamada “*Definitions*”, define-se o origem da geometria do modelo no sistema de coordenadas cartesianas. Nesta mesma pasta pode-se definir as bobinas do estator que serão integradas para o cálculo da tensão de saída. Tendo definido a integração das bobinas do estator, são adicionadas as funções para calcular a tensão induzida em cada uma das fases pela fórmula seguinte:

$$V = \text{comp1.intopN}(L * \text{rmm.Ez}/A_r) \quad (3.1)$$

A variável “*rmm.Ez*” é gerada pelo próprio programa e representa a componente *Z* do campo elétrico para cada seção transversal do enrolamento, logo de multiplica-lo pelo comprimento axial do rotor “*L*” e dividi-lo sobre a área da seção transversal da bobina “*A_r*”, faz-se a soma destes valores para todas as seções transversais do enrolamento. “*comp1.intopN*” representa cada um dos grupos de bobinas que conformam o enrolamento estatorico. O valor de “*A_r*” é obtido através do programa, fazendo a seleção do domínio de uma

bobina, através da opção “*Model Couplings*” só basta criar uma nova função de integração, definida da seguinte maneira:

$$A_r = \text{comp1.intopK}(1) \quad (3.2)$$

Onde K é o valor da função.

Na pasta de materiais, seleciona-se os materiais que constituem os domínios da MS, tais como ar e ferro macio. Para o ferro macio, a permeabilidade magnética relativa, em 60 Hz, varia de 700 (3,25% de Si) até 1100 (1,05% de Si). Para estas simulações, adotou-se o valor de 1000 para a permeabilidade magnética como característica do material. Ao definir os materiais também são definidas as curvas de histerese de estes. As características da máquina são especificadas na pasta “*Rotating Machinery, Magnetic (rmm)*”, onde é definida a velocidade de rotação na opção “*Prescribed Rotational Velocity*”, aqui são definidos os domínios em rotação, neste caso são o rotor e o ar presentes próximo ao estator e no entreferro, o valor da velocidade se define inserindo o parâmetro “*rpm*” na célula “*rps*”. As características magnéticas dos domínios são definidas na opção “*Ampere’s Law*”. Através da opção “*Pairs, Continuity*” é adicionada uma condição de contorno de continuidade para o campo magnético no entreferro. Para as correntes externas que percorrem as bobinas do rotor utiliza-se a opção “*External Current Density*”, que define os domínios submetidos à densidade de corrente externa. Depois de definir as características magnéticas, na opção “*Mesh*” defini-se a resolução ou tamanho das malhas de discretização. Por último, na opção “*Study Steps, Time Dependent*” pertencente à pasta “*Study*”, define-se o tempo de análise e o passo de tempo para a simulação. Tendo definido todos os parâmetros necessários para a simulação procede-se à execução da simulação selecionando a opção “*Compute*” que pode ser encontrada na opção “*Home*” ou na pasta “*Study*”.

Ao término das simulações, os resultados dos cálculos da densidade de fluxo magnético podem ser visualizados por meio da opção “*2D Plot Group, Surface*”. A opção “*Arrow Surface*” insere vetores que indicam a direção e sentido da densidade de fluxo magnético na superfície da MS. Para observar os resultados da tensão de saída da máquina síncrona na opção “*1D Plot Group, Global*” seleciona-se cada uma das tensões por fase.

3.1.1 Simulação em 3D

Devido ao alto custo computacional das simulações em modo temporal em 3D, se optou por realizar estas simulações em modo estacionário. Para as simulações em 3D basicamente são

os mesmo passos das simulações em 2D, só muda a escolha da física. Para realizar essas simulações seleciona-se o espaço dimensional 3D para iniciar a modelagem do elemento discreto, para o estudo em estado estacionário se seleciona a física “*Magnetic Fields (mf)*”. Igual que no modelo em 2D, a geometria da máquina pode ser desenhada no mesmo COMSOL ou importada em um arquivo CAD na pasta “*Geometry*”. Logo, se especificam os materiais que conformam os domínios da MS, os quais são ar e ferro macio. Em seguida, através da opção “*Ampères Law*” são definidas as características associadas a cada domínio. Define-se a densidade de corrente externa nas bobinas do rotor na opção “*External Current Density*”. Na opção “*Mesh*” é definido a forma geométrica dos elementos finitos nos quais se divide o modelo geométrico e o tamanho destes, aqui os elementos finitos tem a forma tetraédrica. Como o estudo é feito em estado estacionário não precisará ser definido o intervalo de tempo para a análise, e por último se seleciona a opção “*Compute*” para iniciar a simulação. Os resultados podem ser visualizados com a opção “*3D Plot Group, Surface*”.

3.2 Modelagens MS de Pequeno Porte

Em está secção são apresentadas as principais características físicas e elétricas utilizadas para as simulações da máquina síncrona. Como tem-se mencionado anteriormente, diversas simulações foram realizadas com o objetivo de estudar o comportamento das grandezas de grande importância, ante as diferentes condiciones da MS. Em está seção são expostos e analisados os resultados das mesmas e posteriormente são avaliadas usando dados reais que foram tomados de ensaios feitos no laboratório usando uma MS com as mesmas propriedades da máquina simulada.

3.2.1 Modelo MS de Pequeno Porte

O modelo geométrico para a simulação da MS de pequeno porte está baseada numa máquina de 4 polos e 36 ranhuras no estator e ligação YY. Os fios dos enrolamentos são fabricados em cobre e os núcleos em aço silício. As características geométricas e elétricas de esta máquina podem ser vistas na Figura 3.1 e nas Tabela 3.1 e 3.2.

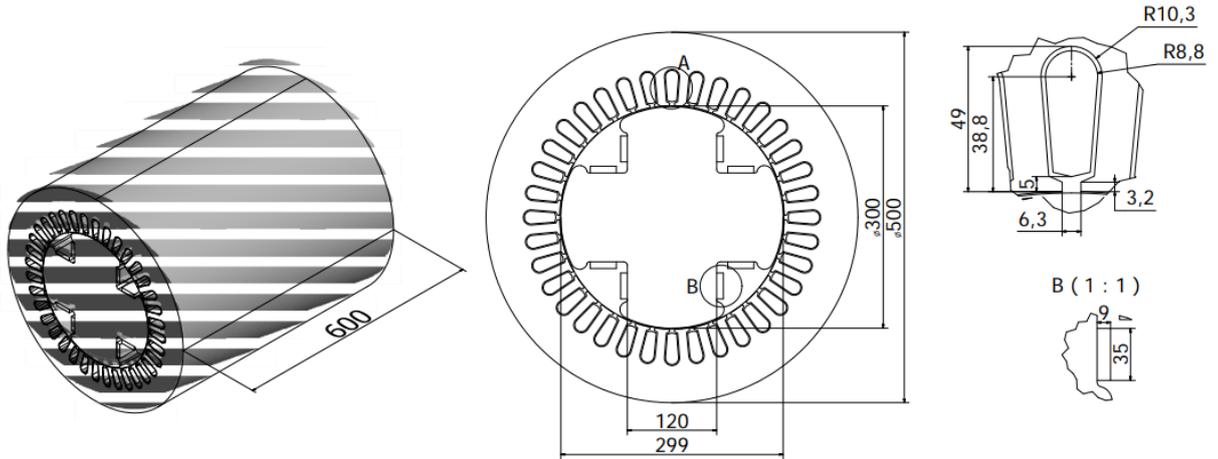


Figura 3.1: Cotas da MS.

Tabela 3.1: Características Elétricas MS de Pequeno Porte.

Número de Fases	3
Potência Aparente Nominal	35 [kVA]
Tensão Nominal	VFF = 380 [V] / VFN = 220 [V]
Corrente Nominal	53,2 [A]
Fator de Potência	$\text{Cos}\phi=0.8$
Velocidade Nominal	1800 [rpm]
Frequência de Operação	60 [Hz]

As resistências para o circuito do estator e de excitação do rotor foram obtidos mediante medições manuais e são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 3.3.2: Resistências.

Máquina Principal	
Estator	Rotor
0,3 [Ω] /fase	15 [Ω]

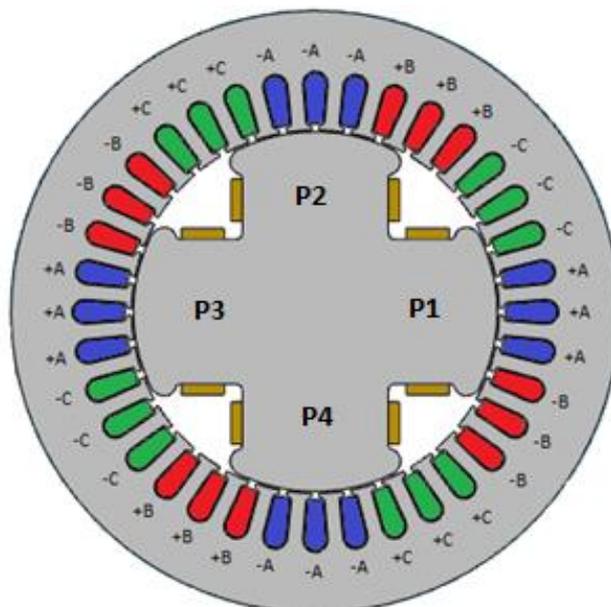


Figura 3.2: Vista em Corte Transversal do Conjunto Estator/Rotor da MS.

Na Figura 3.2 observa-se o enrolamento estático da máquina. As fases estão representadas pelas letras A, B e C. O sinal positivo indica que a corrente na bobina penetra pelo estator na ranhura indicada, enquanto o sinal negativo indica que ela sai por aquela ranhura, como é apresentado na Figura 3.3.

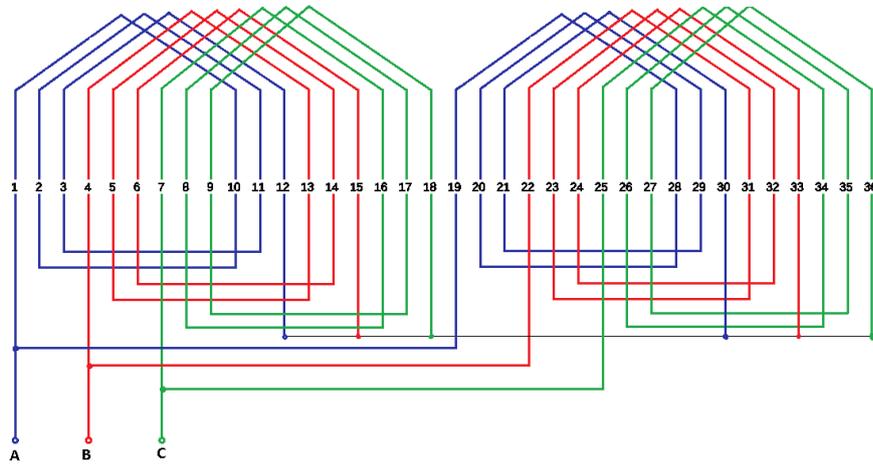


Figura 3.3: Diagrama do Enrolamento da MS.

3.2.2 Análise dos Resultados da Máquina de Pequeno Porte

O resultado do “*Mesh*” pode ser visto na Figura 3.4, a malha está conformada por um conjunto de elementos triangulares. O tamanho dos elementos triangulares foi escolhido automaticamente já que com esses valores se obtiveram dados bastante precisos. Na figura se observa que as áreas mais críticas do modelo geométrico têm elementos triangulares mais finos para que os resultados da simulação sejam mais exatos.

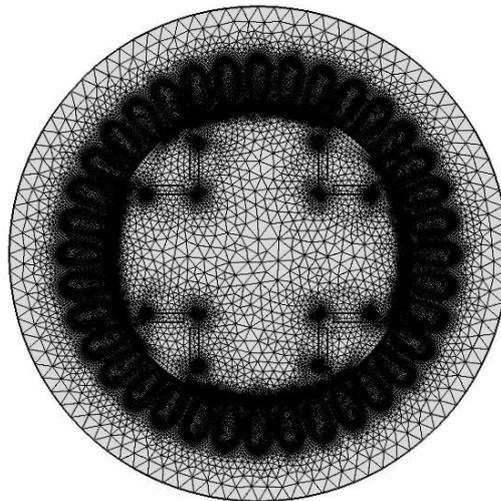


Figura 3.4: Mesh MS de Pequeno Porte.

3.2.2.1 Análise em condições normais de operação e sem carga conectada.

Da simulação em condições normais de operação (sem falha), resultou a seguinte figura, onde se mostra a densidade de fluxo magnético na superfície da MS.

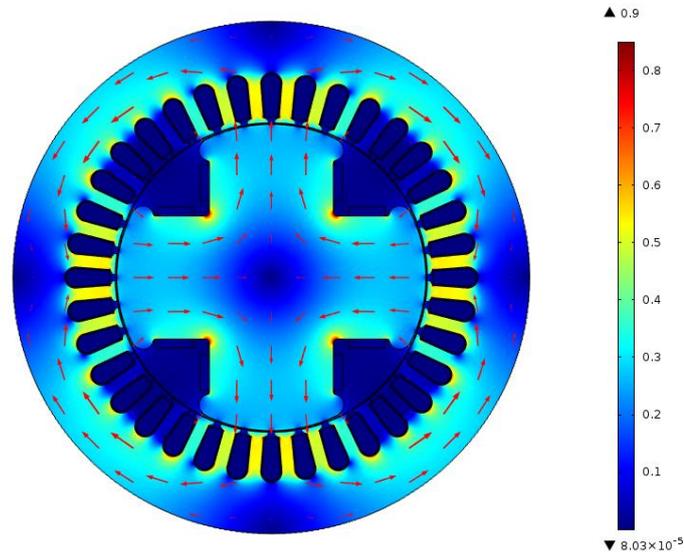


Figura 3.5: Densidade de Fluxo Magnético da MS de Pequeno Porte em Condições Normais de Operação.

Na Figura 3.5 observa-se que a densidade de fluxo magnético apresenta simetria radial que se mantém durante todo o tempo de funcionamento. Além disso, também se observa como estão estabelecidos os caminhos magnéticos, que saem de um polo norte e vão para um polo sul, através dos dentes e da coroa do estator. A densidade de fluxo magnético, ao passar pelos dentes do estator, é maior devido à redução na área disponível. A maior densidade de fluxo magnético dentro da MS se concentra nas quinas que unem os polos do rotor, com 0,88 [T] e, o valor mínimo da densidade de fluxo magnético está em torno a 80 [μ T]. Nos dentes do estator a densidade de fluxo atinge um valor máximo de 0,53 [T] quando está alinhado a um dos polos do rotor e um valor mínimo de 110 [μ T] quando está alinhado com a posição intermédia entre polos. Na Tabela 3.3 verifica-se outros valores da densidade de fluxo magnético na superfície da MS, onde se mostra que a densidade de fluxo magnético é idêntica em cada um dos polos.

Tabela 3.3: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos em Condições Normais de Operação.

	Polo 1	Polo 2	Polo 3	Polo 4
Fluxo no centro do polo do rotor [T]	0,26	0,26	0,26	0,26
Fluxo na lateral direita do polo do rotor [T]	0,34	0,34	0,34	0,34
Fluxo na lateral esquerda do polo do rotor [T]	0,34	0,34	0,34	0,34
Fluxo no ponto médio da coroa do rotor [T]	0,16	0,16	0,16	0,16

Na Tabela 3.4 mostram-se os valores da densidade de fluxo magnético nos dentes e no entreferro para cada ranhura.

Tabela 3.4: Valores Densidade de Fluxo Magnético em Diferentes Regiões da MS.

	Fluxo nos dentes do estator [T]	Fluxo no entreferro (frente ao dente) [T]	Fluxo no entreferro (frente à ranhura) [T]
Posição 1	0,53	0,28	0,11
Posição 2	0,53	0,25	0,10
Posição 3	0,49	0,21	0,09
Posição 4	0,35	0,01	0,03
Posição 5	0,04	0,001	0,004
Posição 6	0,001	0,01	0,03
Posição 7	0,04	0,21	0,09
Posição 8	0,35	0,25	0,10
Posição 9	0,49	0,28	0,11
Posição 10	0,53	0,28	0,10
Posição 11	0,53	0,25	0,09
Posição 12	0,49	0,21	0,03
Posição 13	0,35	0,01	0,004
Posição 14	0,04	0,001	0,03
Posição 15	0,001	0,01	0,09
Posição 16	0,04	0,21	0,10
Posição 17	0,35	0,25	0,11
Posição 18	0,49	0,28	0,10
Posição 19	0,53	0,28	0,09
Posição 20	0,53	0,25	0,03
Posição 21	0,49	0,21	0,004
Posição 22	0,35	0,01	0,03
Posição 23	0,04	0,001	0,09
Posição 24	0,001	0,01	0,10
Posição 25	0,04	0,21	0,11
Posição 26	0,35	0,25	0,10
Posição 27	0,49	0,28	0,09
Posição 28	0,53	0,28	0,03
Posição 29	0,53	0,25	0,004
Posição 30	0,49	0,21	0,03
Posição 31	0,35	0,01	0,09
Posição 32	0,04	0,001	0,10
Posição 33	0,001	0,01	0,11
Posição 34	0,04	0,21	0,10
Posição 35	0,35	0,25	0,09
Posição 36	0,49	0,28	0,03

Ao representar graficamente uns dos valores presentes na Tabela 3.4, obtemos o gráfico da Figura 3.6, onde se mostra o valor da densidade de fluxo magnético em cada um dos dentes do estator e como se comporta. Este comportamento é similar no entreferro, cujo comportamento da densidade de fluxo magnético é mostrado na Figura 3.7

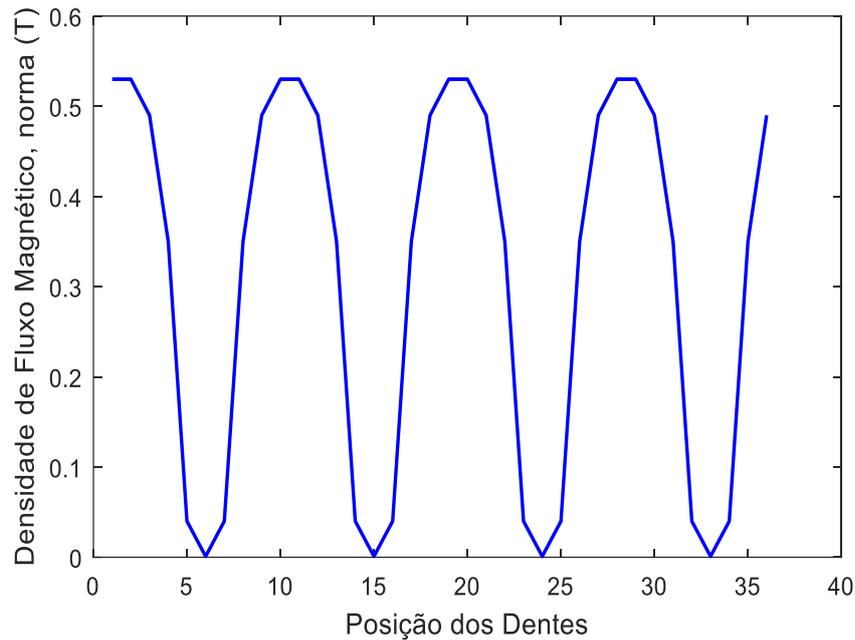


Figura 3.6: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator.

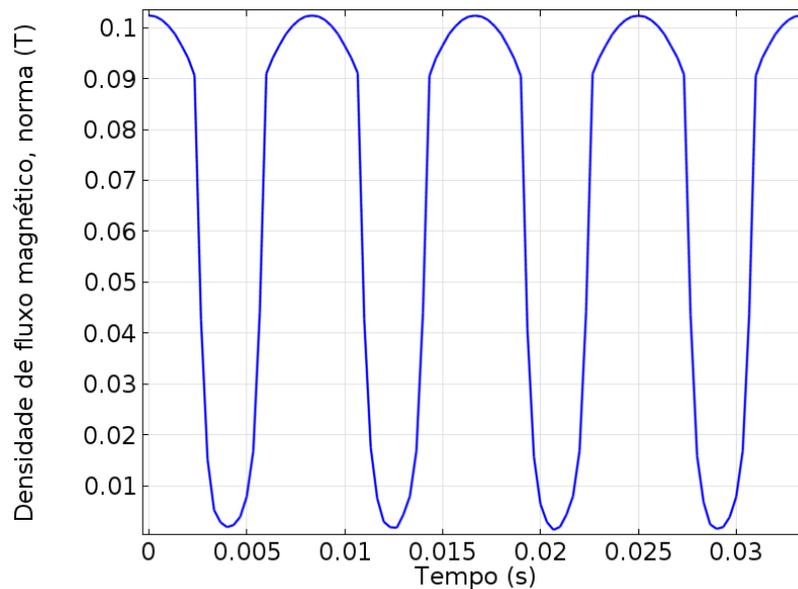


Figura 3.7: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS de Pequeno Porte.

Na Figura 3.7 observa-se a variação da densidade de fluxo em função do tempo no entreferro da MS. Cada um dos picos representa a densidade de fluxo magnético em um polo e os vales representam a densidade de fluxo no interpolo. Nota-se como o fluxo magnético diminui criticamente no espaço entre os polos. Como se mostra na Figura 3.6 o comportamento da densidade de fluxo magnético nos dentes do estator é semelhante ao comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro mostrado na Figura 3.7. A diferença em valores deve-se à alta relutância magnética do ar.

Analisando-se a distribuição da densidade de fluxo magnético na superfície da MS, ilustrada na Figura 3.8, pode-se observar que existem caminhos magnéticos bem definidos, os quais vão desde um polo norte até um polo sul, e passam pelo entreferro, dentes e a coroa do estator.

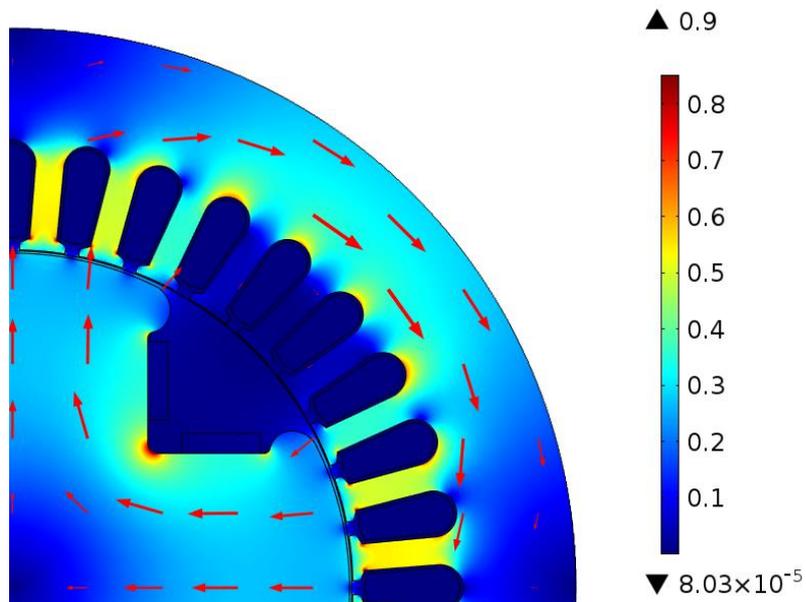


Figura 3.8: Circuito Magnético.

Ao se analisar mais de perto a distribuição da densidade de fluxo magnético nos dentes do estator, pode-se observar que nesta região está a maior concentração de fluxo magnético tal como se mostra na Figura 3.9, como se mencionou anteriormente isto acontece porque a área por onde passa o fluxo é menor que as outras áreas da MS.

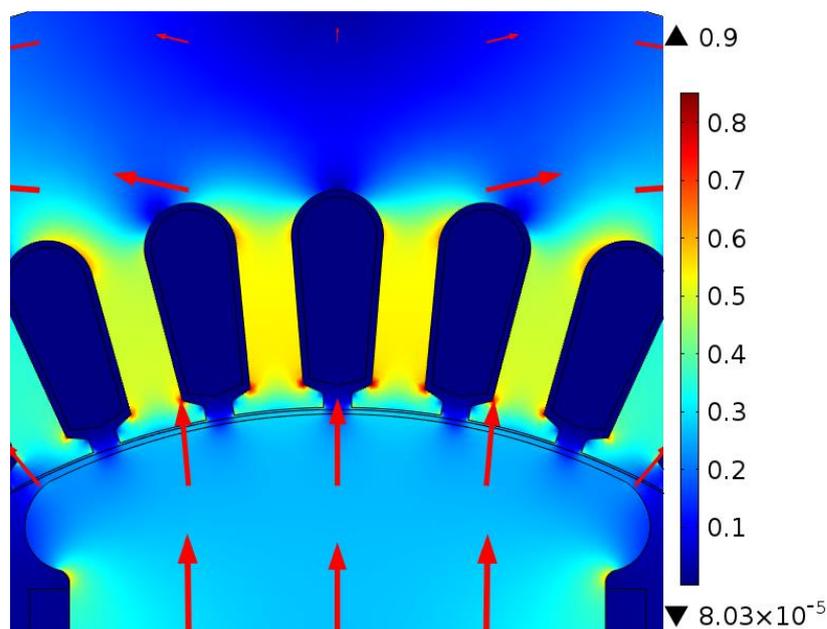


Figura 3.9: Concentração Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator.

Após realizar a análise da densidade de fluxo magnético, avaliou-se as tensões induzidas nas bobinas estatóricas, ilustradas na Figura 3.10, onde cada cor representa uma fase.

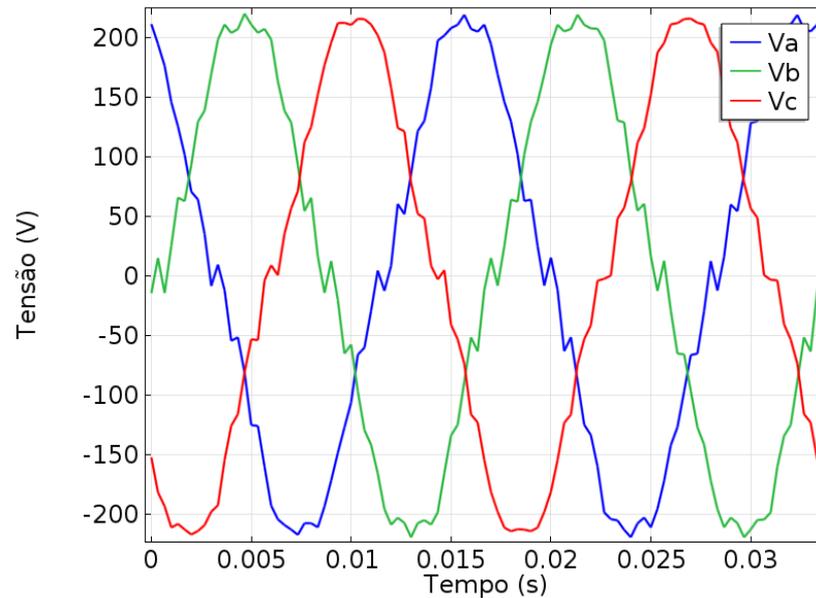


Figura 3.10: Tensões Estatóricas da MS em Condições Normais de Operação.

Na Figura 3.10 visualiza-se que as tensões das bobinas estatóricas apresentam um comportamento aproximadamente senoidal com defasagem de 120° , tem um valor eficaz (RMS) de 220 [V]. Também se observa que o sinal apresenta componentes harmônicos devido ao tipo de enrolamento usado no estudo: composto de apenas uma fase em cada grupo de bobinas, seis bobinas por fase e em única camada.

3.2.2.2 Análise em curto-circuito na bobina de um polo e sem carga conectada.

Quando se produz um curto-circuito em uma bobina o número de espiras se reduz. Segundo a lei de Ampere aplicada a uma bobina de N espiras apertadas, o fluxo magnético vai se reduzir, já que estas grandezas tem proporcionalidade direta. A corrente de excitação também é diretamente proporcional ao fluxo magnético (SERWAY, 2000), por tanto, para modelar o curto-circuito no bobinado defeituoso foi suposta uma corrente com um valor de 5 % da nominal nas simulações em condições normais de operação. A Figura 3.11 apresenta o comportamento da densidade de fluxo magnético em várias regiões da MS.

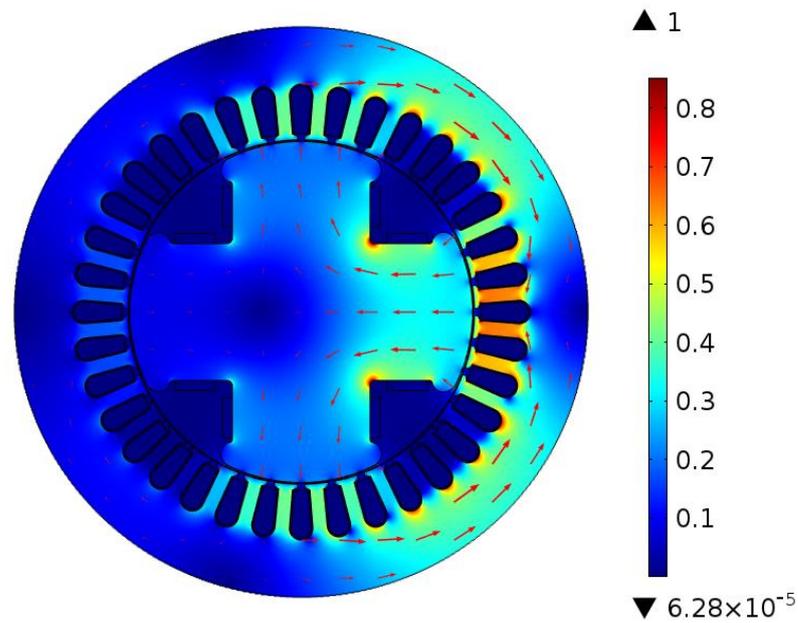


Figura 3.11: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Curto-Circuito em um Polo.

Na Figura 3.11, visualiza-se como o curto-circuito afeta a densidade de fluxo magnético, diminuindo o valor da densidade no polo com bobina em curto circuito e também nos polos adjacentes. No entanto, a densidade aumenta levemente no polo que se encontra oposto (P1) ao polo em curto circuito, como se observa na Figura 3.12 e na Tabela 3.5.

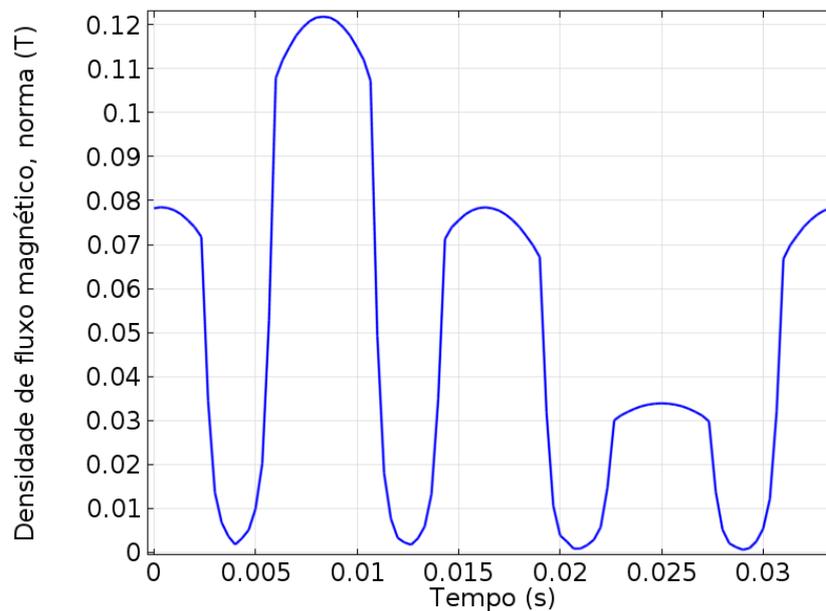
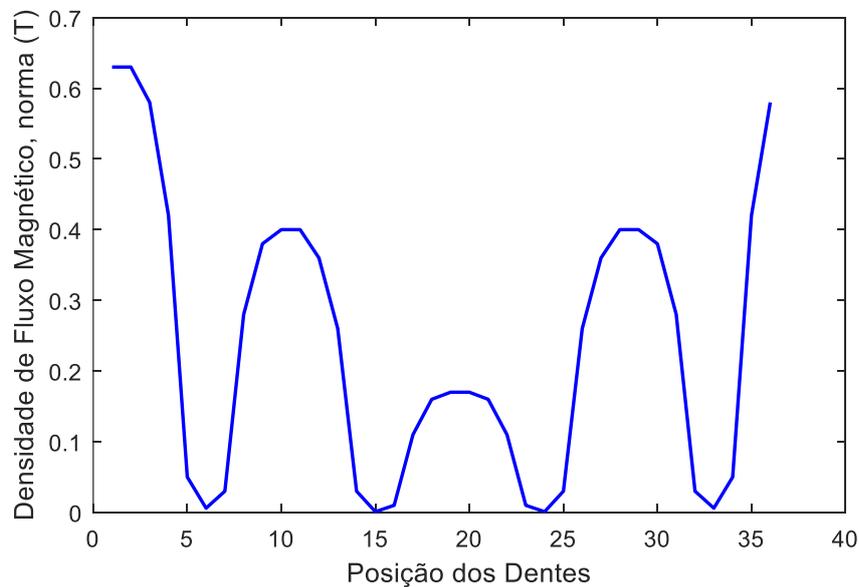


Figura 3.12: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS de Pequeno Porte com Curto-Circuito.

Tabela 3.5: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos em Condição de Curto-Circuito.

	Polo 1	Polo 2	Polo 3	Polo 4
Fluxo no centro do polo do rotor [T]	0,32	0,20	0,08	0,20
Fluxo na lateral direita do polo do rotor [T]	0,40	0,30	0,11	0,22
Fluxo na lateral esquerda do polo do rotor [T]	0,40	0,22	0,11	0,30
Fluxo no ponto médio da coroa do rotor [T]	0,22	0,14	0,05	0,14

Na Figura 3.12 pode-se observar que o pico com menor valor de fluxo magnético representa o polo em curto circuito e os picos de valor intermediário representam os polos adjacentes ao polo em curto circuito. Também, pode-se visualizar que o pico com maior valor representa o polo que está na parte oposta do polo em curto circuito. O valor máximo da densidade de fluxo magnético aumentou um 20% em relação ao valor mostrado Figura 3.7. Na Figura 3.12 mostra-se que este valor é de 0.12 [T], deve-se lembrar que esta medição da densidade do fluxo magnético é tomada no entreferro. Nos dentes do estator o comportamento da densidade de fluxo magnético será parecido, mas aumentarão os valores da densidade de fluxo magnético como é apresentado na Figura 3.13.

**Figura 3.13: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito.**

O curto-circuito no bobinado de um dos polos também afeta a tensão no enrolamento estatórico como se pode ver na Figura 3.14.

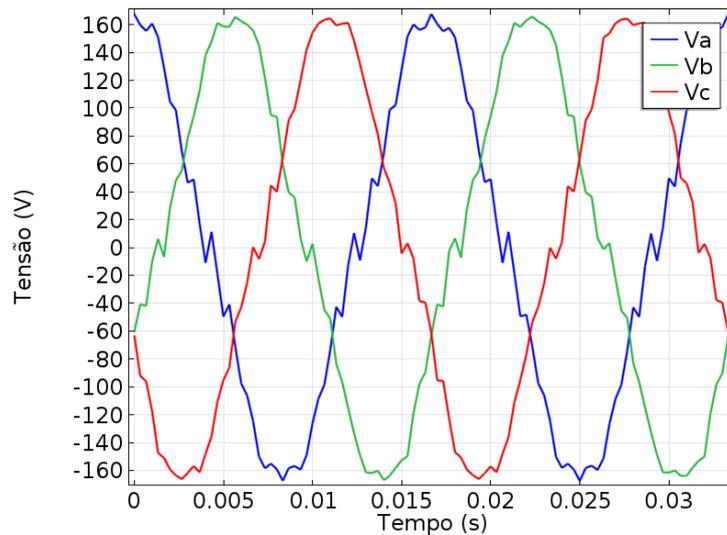


Figura 3.14: Tensões Estatóricas da MS com Polo em Curto-Circuito.

Na Figura 3.14 pode-se observar que a amplitude da tensão estatórica diminuiu, atingindo um valor rms de 168,7 [V] devido ao curto circuito no bobinado de um dos polos mas pode observar-se que os sinais apresentam um comportamento aproximadamente senoidal com defasagem de 120° entre cada uma das tensões de saída da máquina síncrona.

3.2.2.3 Análise em condições normais de operação e com carga conectada.

Para fazer a análise da operação da MS com uma carga conectada no enrolamento estatórico, foi simulada uma carga com características similares à carga usada nos testes em laboratório. Utilizou-se uma carga resistiva de 7,2 [kW] conectada em cada uma das fases do enrolamento estatórico. O comportamento da densidade de fluxo magnético na MS com esta carga conectada é observado na Figura 3.15.

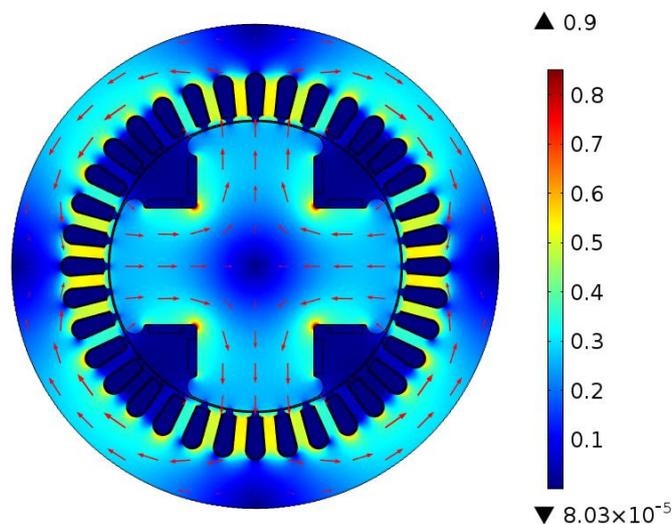


Figura 3.15: Fluxo Magnético da MS em Condições Normais de Operação e com Carga Conectada.

Na Figura 3.15, observa-se que sob carga equilibrada a densidade de fluxo magnético permanece constante, aqui a densidade de fluxo magnético apresenta o mesmo comportamento e os mesmos valores que na Figura 3.6 e na Figura 3.7, mas a amplitude da tensão dos enrolamentos estatóricos vai diminuir devido à queda de tensão nas impedâncias do circuito estatorico e da carga, este comportamento se observa no gráfico da Figura 3.16.

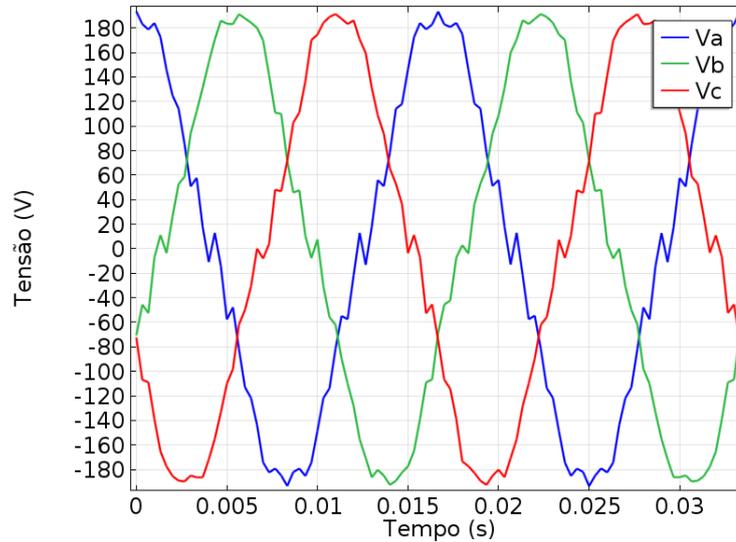


Figura 3.16: Tensões Estatóricas da MS em Condições Normais de Operação e com Carga Conectada.

No gráfico da Figura 3.16 visualiza-se como diminui a tensão de saída quando se conecta uma carga resistiva em cada uma das fases, neste gráfico pode-se ver que o valor da tensão rms de saída é aproximadamente 192 [V], para normalizar este valor para 220[V] deve-se aumentar a corrente de excitação das bobinas do rotor e assim também a densidade de fluxo magnético dentro da MS, como se observa nas Figuras 3.17, 3.18 e 3.19 e na Tabela 3.6.

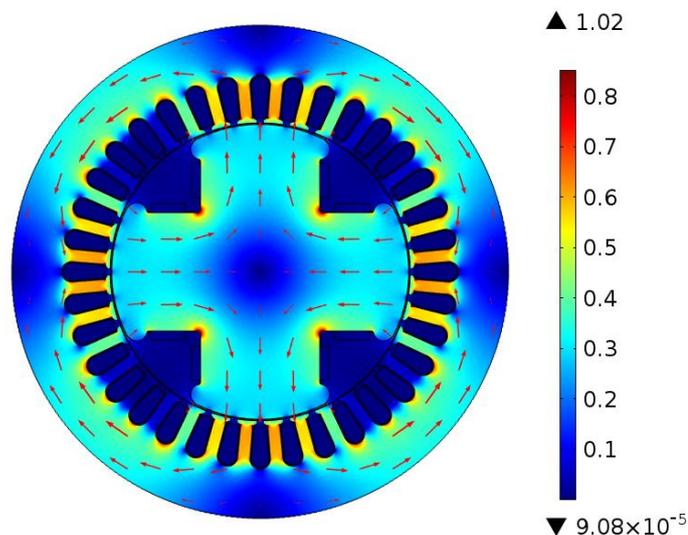


Figura 3.17: Densidade de Fluxo Magnético da MS em Condições Normais de Operação Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].

Tabela 3.6: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].

	Polo 1	Polo 2	Polo 3	Polo 4
Fluxo no centro do polo do rotor [T]	0,30	0,30	0,30	0,30
Fluxo na lateral direita do polo do rotor [T]	0,39	0,39	0,39	0,39
Fluxo na lateral esquerda do polo do rotor [T]	0,39	0,39	0,39	0,39
Fluxo no ponto médio da coroa do rotor [T]	0,19	0,19	0,19	0,19

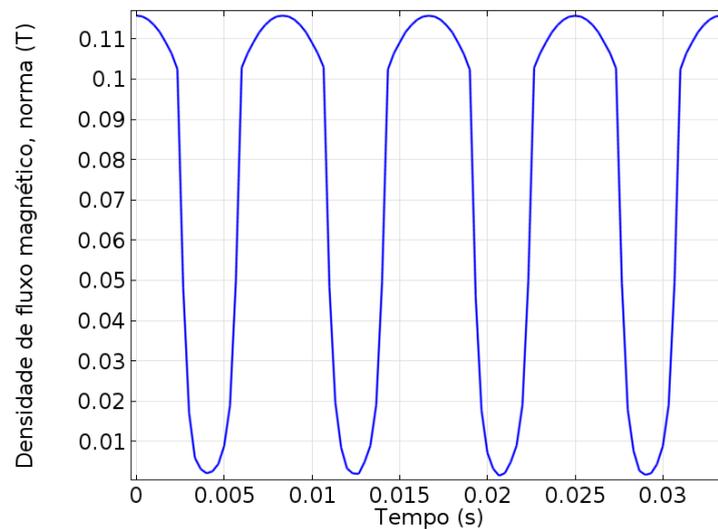


Figura 3.18: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].

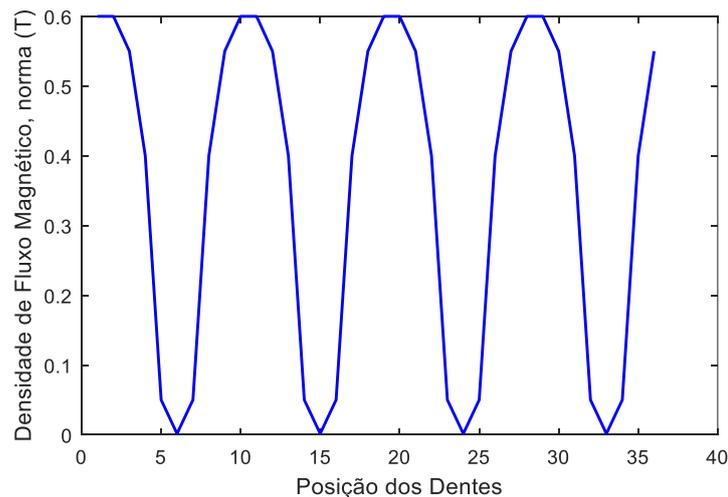


Figura 3.19: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator Após Normalizar a Tensão de Saída em 220[V].

Como se pode notar nas Figuras 3.18 e 3.19, após aumentar o valor da corrente de excitação, o valor da densidade de fluxo magnético no entreferro e nos dentes do estator também aumentou e com isto também a amplitude da tensão de saída como se pode ver na Figura 3.20,

demonstrando que existe uma relação de proporcionalidade direta entre a corrente de excitação, a densidade de fluxo magnético e a tensão induzida nos enrolamentos estatóricos.

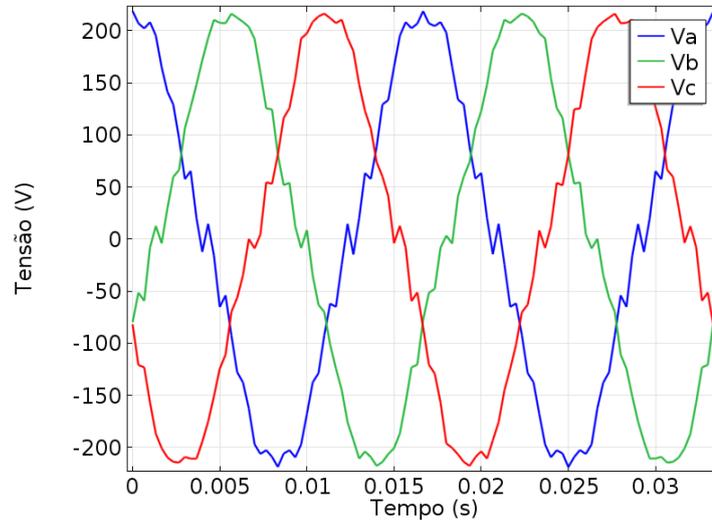


Figura 3.20: Tensões Estatóricas da MS em Condições Normais de Operação Após Normaliza-la.

Na Figura 3.20, observa-se como a tensão em cada uma das fases, aumenta novamente a 220[V] após aumentar a corrente de excitação. Nos testes feitos no laboratório aconteceu o mesmo, e os valores de tensão nas simulações são bastante parecidos aos valores obtidos nos testes de laboratório, como se visualiza na Figura 3.22.

Para o teste de laboratório se movimentou o rotor da máquina síncrona através de uma máquina primária unida mecanicamente ao eixo, como se pode ver na Figura 3.21. Logo de começar a operação da máquina síncrona e estabilizar a tensão de saída a um valor rms de 220[V], se procedeu a conectar a carga resistiva o que gerou uma queda na tensão de saída, por este motivo se aumentou a corrente de excitação para normalizar novamente a tensão. A Figura 3.22 mostra esta variação.

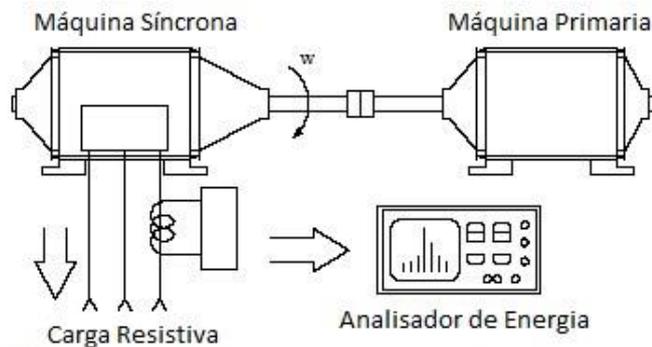


Figura 3.21: Bancada (FLORES; ASIAÍN, 2011).

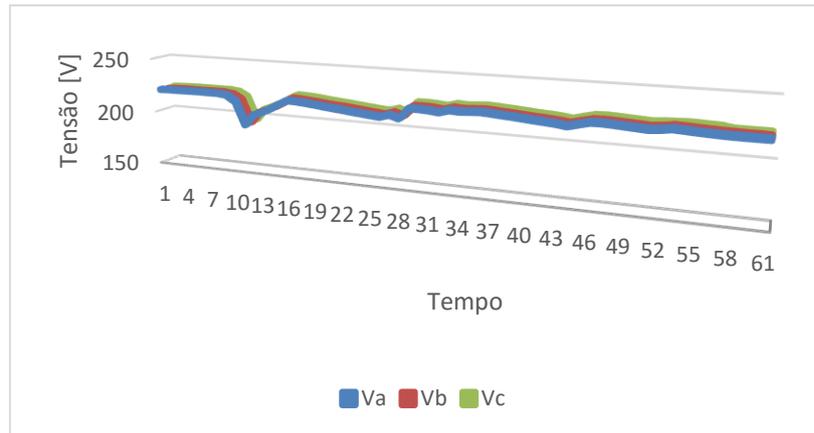


Figura 3.22: Tensões Estáticas da MS Medidas no Teste de Laboratório.

A Figura 3.22 apresenta o comportamento das tensões estáticas em cada uma das fases antes e depois de conectar a carga resistiva a cada uma destas fases. Pode-se notar que a tensão em cada fase corresponde a 220[V] antes de conectar a carga, a partir daí a amplitude da tensão diminui até um valor de 194[V] aproximadamente, tal como aconteceu nas simulações. Após diminuir até esse valor a tensão começou a se restabelecer ao variar a corrente de excitação, após um determinado tempo a tensão em cada uma das fases se estabiliza em 220[V].

3.2.2.4 Análise em curto-circuito e com carga conectada.

Para esta última análise, foi simulada uma carga resistiva com características similares à carga usada nos testes de laboratório. O curto-circuito foi modelado da mesma maneira que nas simulações da máquina síncrona operando a vazio, escolheu-se uma corrente com um valor de 5% do valor nominal. A Figura 3.23 apresenta o comportamento da densidade de fluxo magnético em várias regiões da MS quando esta opera sob carga com curto-circuito na bobina de um dos polos.

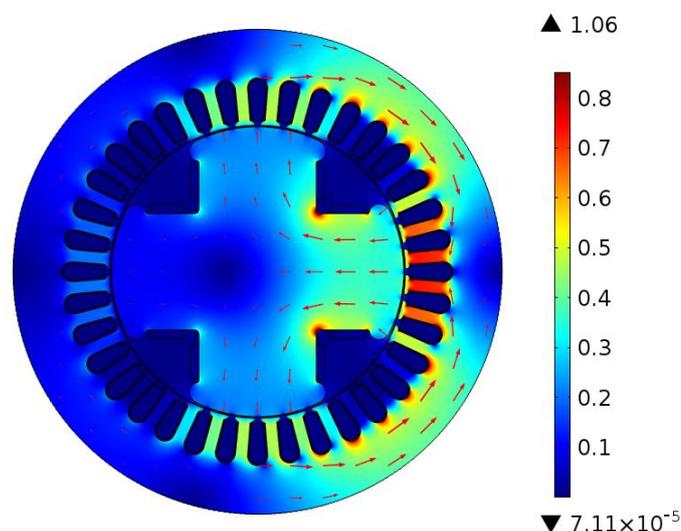


Figura 3.23: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Polo em Curto-Circuito e com Carga Conectada.

A Figura 3.23 mostra que a distribuição da densidade de fluxo magnético nos dentes do estator e na coroa dos polos não é uniforme devido ao curto-circuito presente em um dos polos. Isto diminui o valor da densidade de fluxo magnético em 3 dos 4 polos e aumenta o fluxo magnético no polo restante, oposto ao polo em curto-circuito, como se nota na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Valores Densidade de Fluxo Magnético nos Polos com Curto-Circuito e Carga no Estator.

	Polo 1	Polo 2	Polo 3	Polo 4
Fluxo no centro do polo do rotor [T]	0,36	0,23	0,09	0,23
Fluxo na lateral direita do polo do rotor [T]	0,46	0,34	0,13	0,25
Fluxo na lateral esquerda do polo do rotor [T]	0,46	0,25	0,13	0,34
Fluxo no ponto médio da coroa do rotor [T]	0,23	0,16	0,06	0,16

Na Figura 3.24 podemos ver como é o comportamento da densidade de fluxo magnético em função do tempo no entreferro.

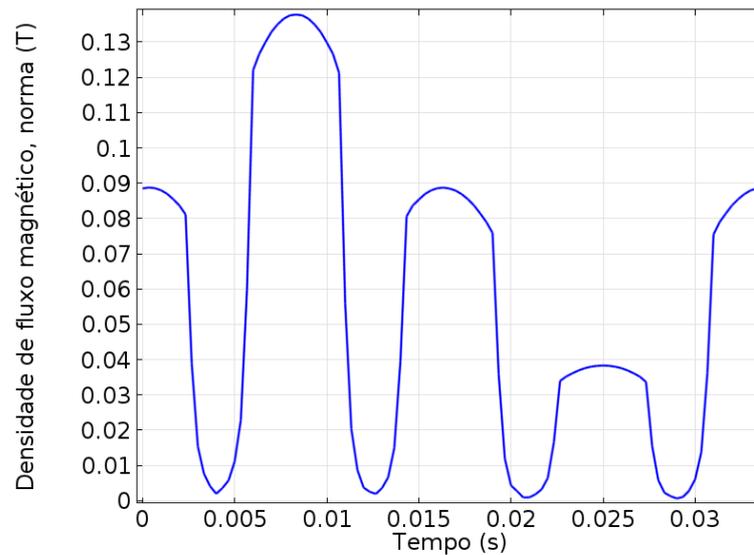


Figura 3.24: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro. Polo em Curto-Circuito e Carga no Estator.

O gráfico da Figura 3.24 mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético nos polos quando um deles está em curto-circuito. Observa-se que o valor máximo da densidade de fluxo magnético também aumenta. Na Figura 3.25 visualiza-se o comportamento do fluxo magnético em cada um dos dentes do estator.

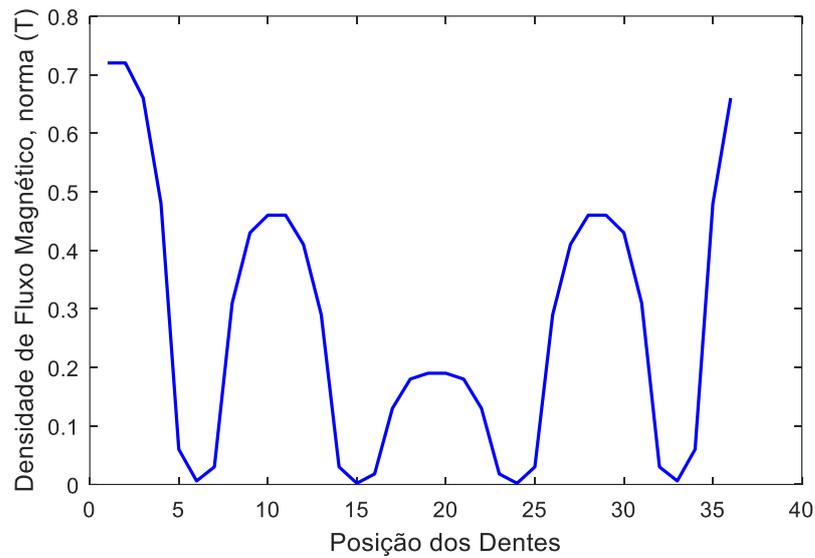


Figura 3.25: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada.

No gráfico da Figura 3.25 podemos ver o comportamento do fluxo magnético nos dentes ao longo do estator. Pode-se notar que em alguns dentes a densidade de fluxo aumentou um 20% em relação ao valor em modo normal de operação e com carga (Figura 3.19). Este curto-circuito também afeta a amplitude da tensão em cada uma das fases do enrolamento estatórico como se observa na Figura 3.26.

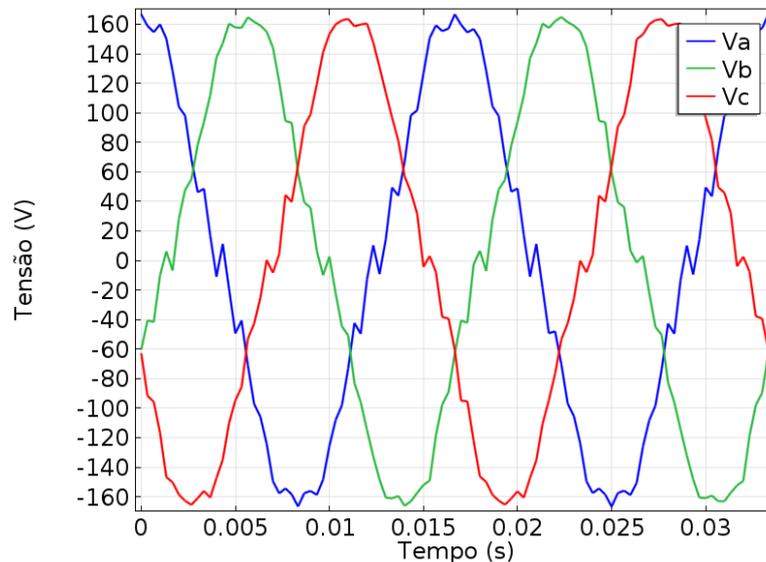


Figura 3.26: Tensões Estatóricas da MS em Curto-Circuito Após Conectar uma Carga na Saída.

Pode-se observar na Figura 3.26 como o curto-circuito na bobina de um polo reduz o valor da amplitude da tensão de saída em cada uma das fases, mas o ângulo de defasagem entre elas e a forma de onda senoidal permanecem iguais. Neste gráfico podemos ver que o valor da amplitude é aproximadamente 165,8 [V] que se aproxima do valor da tensão da MS observado

no teste de laboratório. Para compensar o valor da tensão reduzida pelo curto-circuito e normaliza-la, também se aumenta o valor da corrente de excitação. Na Tabela 3.8 podemos ver os valores da densidade de fluxo nos polos e nos gráficos seguintes podemos ver o efeito da normalização da tensão sobre a densidade de fluxo magnético quando as bobinas dos polos ainda apresentam curto-circuito.

Tabela 3.8: Valores da Densidade de Fluxo Magnético nos Polos com Curto-Circuito e Carga no Estator Após Normalizar a Tensão.

	Polo 1	Polo 2	Polo 3	Polo 4
Fluxo no centro do polo do rotor [T]	0,48	0,31	0,12	0,31
Fluxo na lateral direita do polo do rotor [T]	0,61	0,46	0,18	0,34
Fluxo na lateral esquerda do polo do rotor [T]	0,61	0,34	0,18	0,46
Fluxo no ponto médio da coroa do rotor [T]	0,29	0,22	0,09	0,22

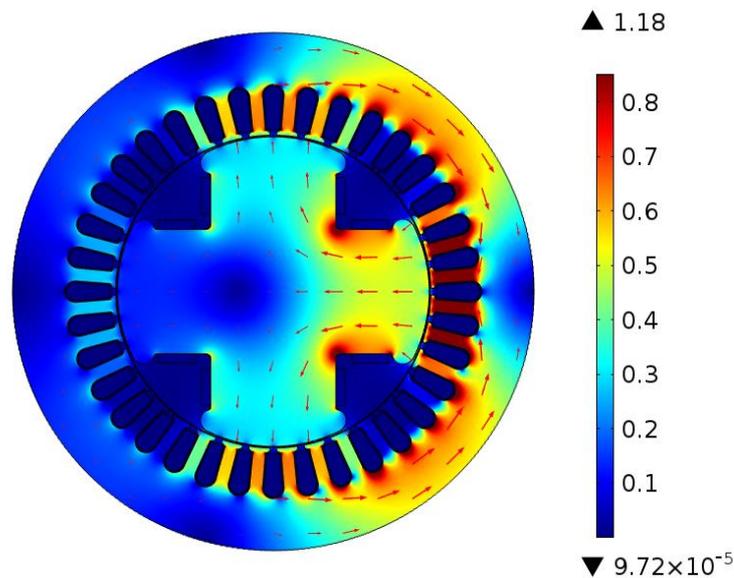


Figura 3.27: Densidade de Fluxo Magnético da MS com Polo em Curto-Circuito e com Carga Conectada Após Normalizar a Tensão.

Na escala de cores da Figura 3.27 observa-se o aumento da densidade de fluxo magnético em algumas regiões da MS, devido ao aumento da corrente de excitação para normalizar em 220 [V] a tensão de saída. As Figuras 3.28 e 3.29 apresentam o comportamento do fluxo magnético no entreferro e nos dentes do estator.

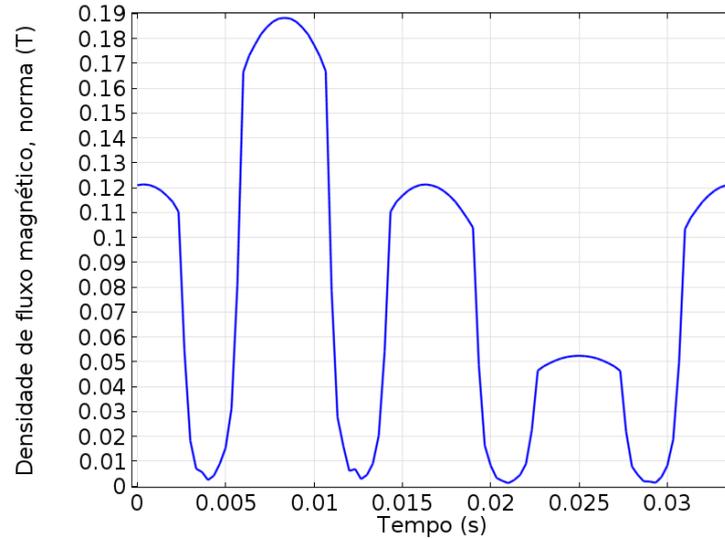


Figura 3.28: Comportamento da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada Após Normalizar a Tensão em 220[V].

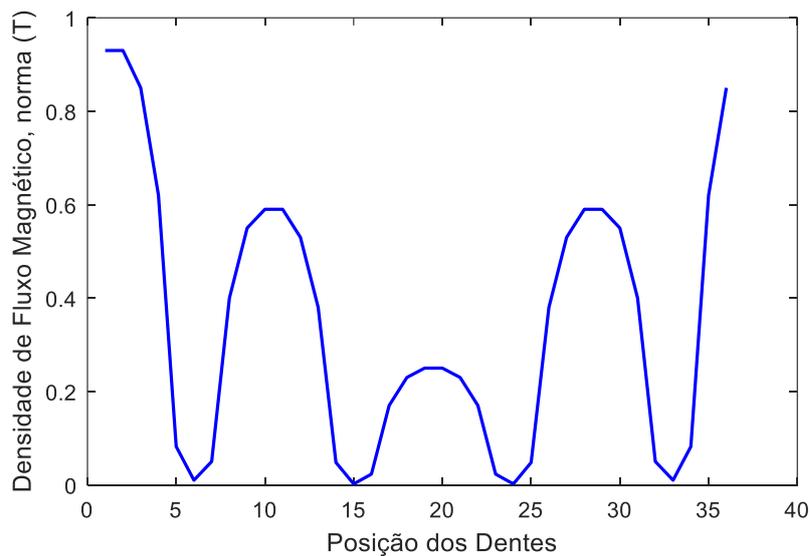


Figura 3.29: Densidade de Fluxo Magnético nos Dentes do Estator com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada Após Normalizar a Tensão em 220[V].

Nas Figuras 3.28 e 3.29 pode-se observar que quando a máquina síncrona trabalha sob carga e tem um curto-circuito na bobina de um dos polos, o comportamento da densidade de fluxo magnético é similar ao comportamento de esta grandeza, quando a máquina síncrona trabalha a vazio e com curto-circuito na bobina de um dos polos, somente muda a amplitude da densidade de fluxo, mas o comportamento é similar. Na Figura 3.30 se mostra a tensão de saída da MS após aumentar a corrente de excitação para normalizar a tensão em 220[V].

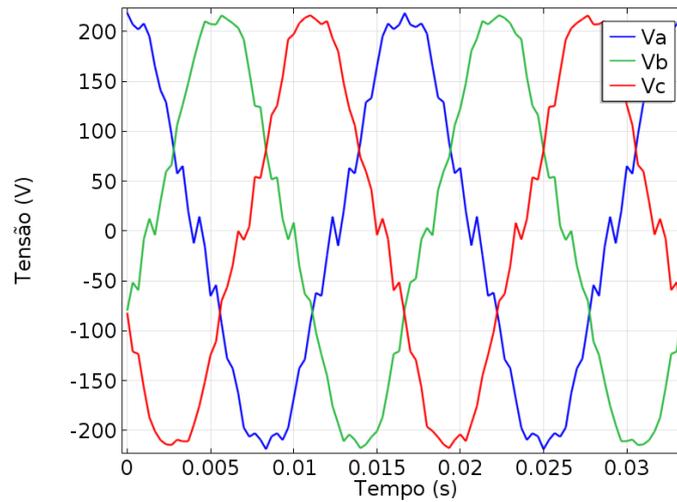


Figura 3.30: Tensão de Saída com Amplitude Normalizada em 220[V].

Após o aumento da corrente de excitação para compensar a tensão de saída, reduzida pelo curto-circuito, pode-se observar na Figura 3.31 que os resultados da simulação são muito próximos aos resultados obtidos no teste de laboratório.

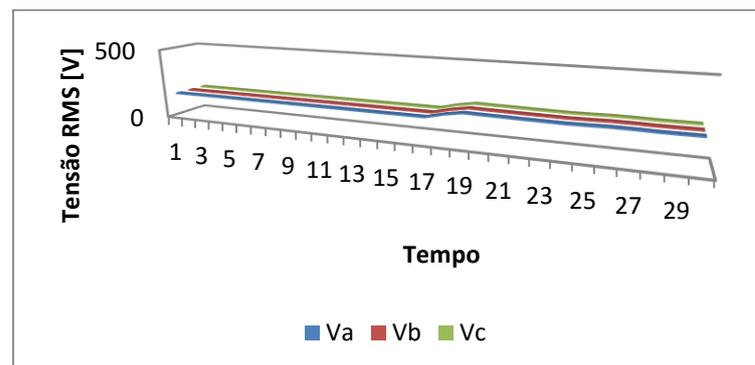


Figura 3.31: Tensões Estatoricas da MS Medidos no Teste de Laboratório, com Polo em Curto-Circuito e Carga Conectada.

O teste feito no laboratório consistiu em fazer um curto-circuito na bobina de um dos polos da máquina síncrona real e que representasse um 5 % do valor total desta, após fazer isto iniciou-se a operação da máquina síncrona e se conectou uma carga na saída. Quando a máquina entrou a regime estacionário percebeu-se que para os valores de corrente de excitação da MS trabalhando sem curto-circuito e sob carga a tensão de saída diminuiu até 175 [V], por tanto podemos dizer que o curto-circuito afetou a amplitude da tensão de saída. Por último aumentou-se a corrente de excitação para normalizar a tensão de saída até os 220 [V]. Comparando os resultados da simulação da MS com os dados mostrados na Figura 3.31, podemos ver que os resultados da simulação são próximos aos dados do teste de laboratório, quando na simulação se fez um curto-circuito em um polo, o valor da tensão diminuiu até 165,8 [V] e no teste de laboratório quando se fez este curto-circuito o valor da tensão diminuiu até 175[V]

aproximadamente, apresentando um erro do 5,2 %. No gráfico da Figura 3.31 também se mostra que a tensão se normaliza em 220 [V] após aumentar a corrente de excitação, como aconteceu nas simulações e ensaios de laboratório com a máquina operando com curto-circuito.

3.2.2.5 Análise em condições normais de operação do modelo em 3D.

Das simulações feitas em três dimensões em condições normais de operação e em estado estacionário, obtive-se as seguintes figuras que mostram a distribuição da densidade de fluxo magnético na superfície da MS.

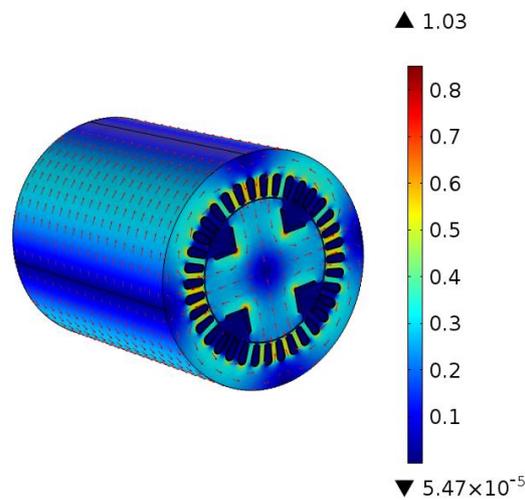


Figura 3.32: Parte Externa da MS em Condição Normal.

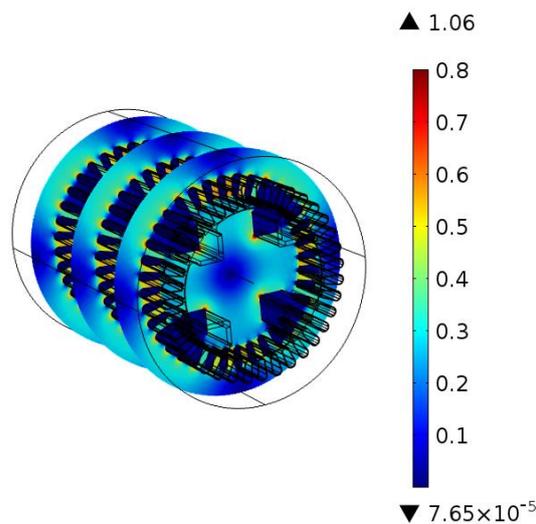


Figura 3.33: Parte Interna da MS em Condição Normal.

Nas Figuras 3.32 e 3.33, pode-se observar que a densidade de fluxo magnético é maior entre os dentes do estator que ficam na frente dos polos e também nas quinas onde se unem os polos. Além disso, pode-se observar que a densidade de fluxo magnético apresenta simetria

radial, tanto na parte externa da máquina como na parte interna, estes comportamentos são semelhantes aos mostrados nas simulações em 2D, mas nas simulações em 3D pode-se perceber o comportamento da densidade de fluxo no exterior da MS, algo que não é possível nas simulações em 2D. A densidade de fluxo também apresenta caminhos magnéticos que saem de um polo norte e vão para um polo sul.

3.2.2.6 Análise em curto-circuito do modelo em 3D.

Para a simulação em estado estacionário da máquina com curto-circuito foram tomadas as mesmas condições da simulação em 2D. O curto-circuito também foi modelado da mesma maneira como foi modelado nas simulações em 2D e com o mesmo valor. Os resultados da simulação são mostrados nas Figuras 3.34, 3.35 e 3.36.

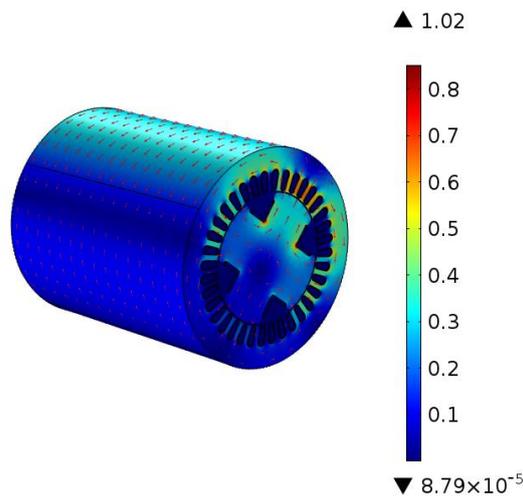


Figura 3.34: Parte Externa da MS em Condição de Curto-Circuito.

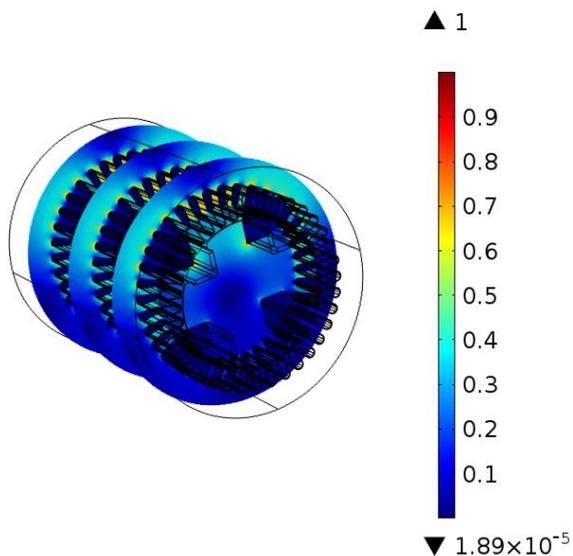


Figura 3.35: Parte Interna da MS em Condição de Curto-Circuito.

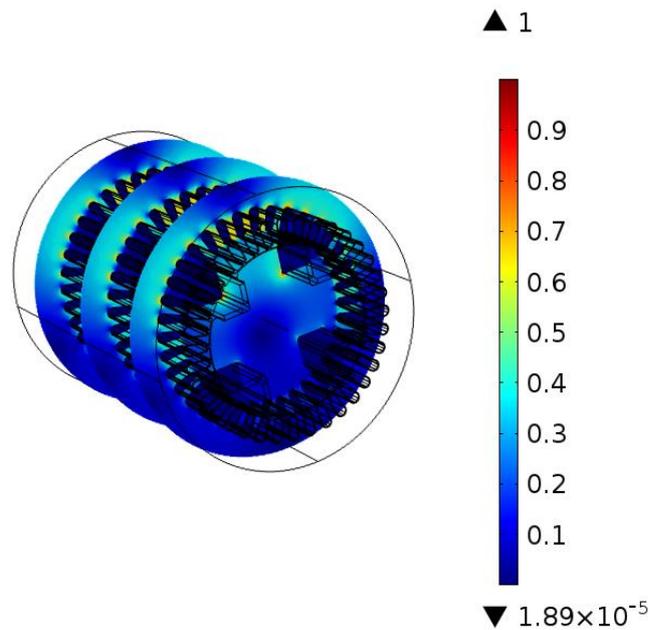


Figura 3.36: Vista Lateral Parte Interna da MS em Condição de Curto-Circuito.

Observa-se nas Figuras 3.34, 3.35 e 3.36 que desapareceu a simetria radial devido ao curto circuito existente em um dos polos e, que a densidade de fluxo magnético é maior no polo oposto ao polo em curto-circuito, igualmente os caminhos magnéticos se mostram com maior intensidade no polo oposto ao polo em curto-circuito, estes comportamentos são similares aos mostrados nas simulações em 2D.

3.3 Modelagem Máquina Síncrona de Grande Porte

Nos próximos itens são definidas as características elétricas e físicas da máquina síncrona de grande porte, também são analisados os resultados das simulações em diferentes regiões da máquina trabalhando em diferentes condições.

3.3.1 Modelo Máquina Síncrona de Grande Porte

O modelo geométrico da máquina de grande porte tem um total de 60 polos e 468 ranhuras no estator com duas camadas de bobinas por ranhura, este número de ranhuras é adequado para ter um enrolamento estático balanceado permitindo níveis de indução no circuito magnético adequados ao funcionamento do gerador. O tipo de enrolamento é imbricado. O diâmetro externo do estator é de 11,718 metros e do rotor é de 11,068. As características elétricas desta máquina podem ser vistas nas Tabelas 3.9, 3.10 e 3.11.

Tabela 3.9: Características Elétricas MS de Grande Porte.

Número de Fases	3
Potência Aparente Nominal	200 MVA
Tensão Nominal	13.8 KV
Corrente Nominal	8367 [A]
Fator de Potência	$\text{Cos}\phi=0.95$
Velocidade Nominal	120 [rpm]
Frequência de Operação	60 [Hz]

O material usado para a fabricação dos fios dos enrolamentos é o cobre e os núcleos são feitos de aço silício. Para o circuito estatorico e de excitação do rotor, as resistências estimadas com base em cálculos, para uma temperatura de referência de 75° C, são dadas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resistências a 75°C.

Máquina Principal	
Estator	Rotor (Circuito excitação)
0,00284 [Ω] /fase	0,3807 [Ω]

Os valores das reatâncias foram fornecidas pelo fabricante e são mostrados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Reatâncias.

Síncrona de Eixo Direto (xd)	Sub de Eixo Direto (xd'')	Transitória de Eixo Direto (xd')
1,24 pu	0,266 pu	0,332 pu
Síncrona de Eixo em quadratura (xq)	Sub de Eixo em quadratura (xq'')	De Sequência Zero (xo)
0,752 pu	0,353 pu	0,115 pu

Na Figura 3.37 pode-se apreciar a geometria do gerador síncrono mediante um corte transversal aplicado em uma determinada região do gerador para representá-lo em 2D. Nesta figura extrai-se uma vista de detalhe (região A) para representar de maneira mais minuciosa a distribuição do enrolamento estatórico e o comportamento da densidade de fluxo magnético após as simulações. No enrolamento estatórico as fases estão representadas pelas letras A, B e C. Esta MS adota um tipo de enrolamento imbricado distribuído em 468 ranhuras com duas camadas e com três circuitos em paralelo por fase.

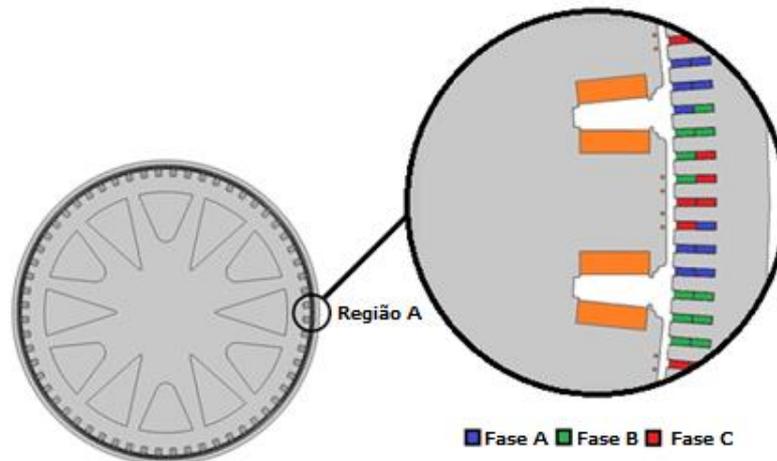


Figura 3.37: Corte Transversal da MS de Grande Porte.

3.3.2 Análise dos Resultados Máquina de Grande Porte

O modelo de elementos triangulares ou “Mesh” é mostrado na Figura 3.38. Para estas simulações o tamanho dos elementos triangulares também foi escolhido automaticamente pelo programa de elementos finitos. Pode-se observar que nas áreas mais críticas do modelo geométrico os elementos triangulares são mais finos para que os resultados da simulação sejam mais exatos.

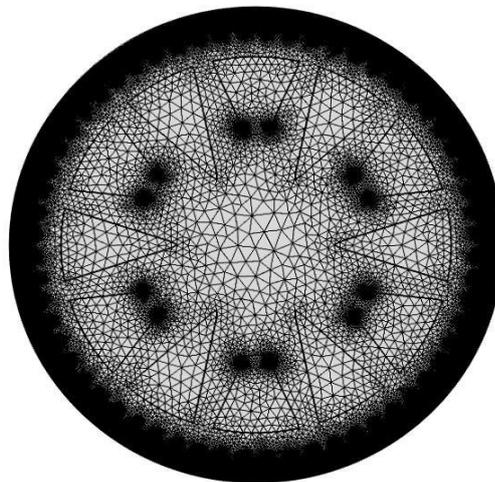


Figura 3.38: Mesh MS de Grande Porte.

3.3.2.1 Análise em condições normais de operação e sem carga conectada.

Nas simulações desenvolvidas no COMSOL *Multiphysics* é feita uma análise temporal da densidade de fluxo magnético. Os resultados das simulações são visualizados como uma imagem termográfica, onde se indica o valor da densidade de fluxo magnético segundo a escala de cores presente na imagem, permitindo observar como se comporta a densidade de fluxo na

MS trabalhando em condições normais de operação (sem falhas) e em condições de falhas quando tem curto-circuito nas bobinas do rotor.

Das simulações da máquina operando em condições normais resultaram as seguintes representações de densidade de fluxo magnético no interior da máquina:

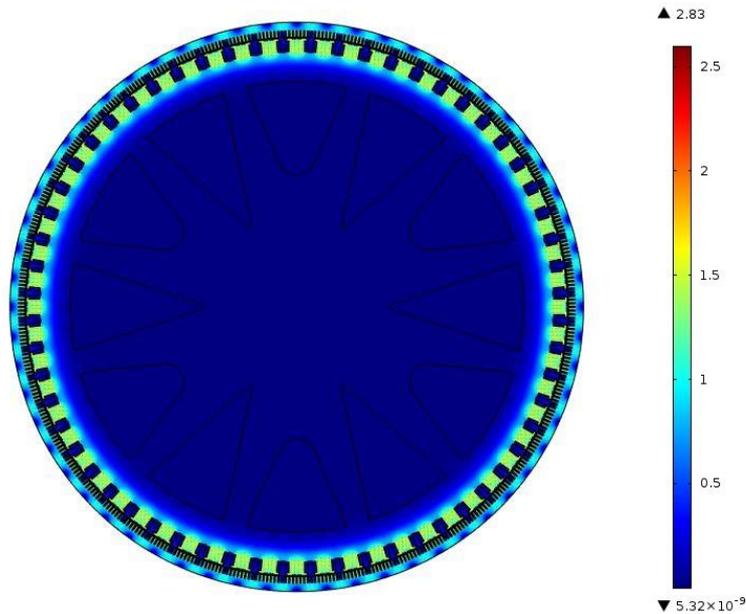


Figura 3.39: Densidade de Fluxo Magnético na MS de Grande Porte em Condições Normais de Operação.

Na Figura 3.39 se representa a densidade de fluxo em escala de cores ao longo da MS, aqui a densidade de fluxo magnético é medida em Tesla [T].

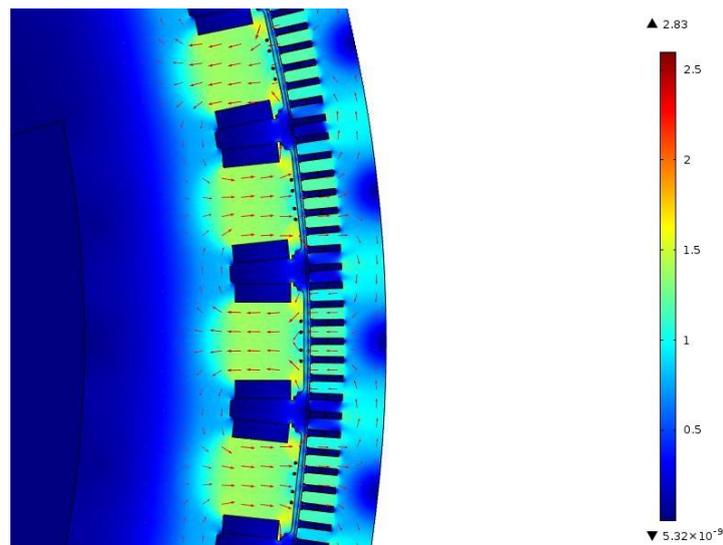


Figura 3.40: Densidade de Fluxo na Região A da MS em Condições Normais de Operação.

Pode-se observar na Figura 3.40 que o campo apresenta simetria radial, que se mantém durante todo o tempo de funcionamento. Também se pode observar que a densidade de fluxo magnético atinge seu máximo valor nas quinas superiores das bobinas do rotor. Nesta área a

densidade de fluxo tem valores próximos a 1,67 [T] e no centro dos polos a densidade de fluxo apresenta valores de 1,39 [T] aproximadamente.

Na Figura 3.41 pode-se observar os caminhos magnéticos da MS durante seu recorrido através dos polos, entreferro, dentes e coroa do estator. Esses caminhos magnéticos vão desde um polo norte e até um polo sul.

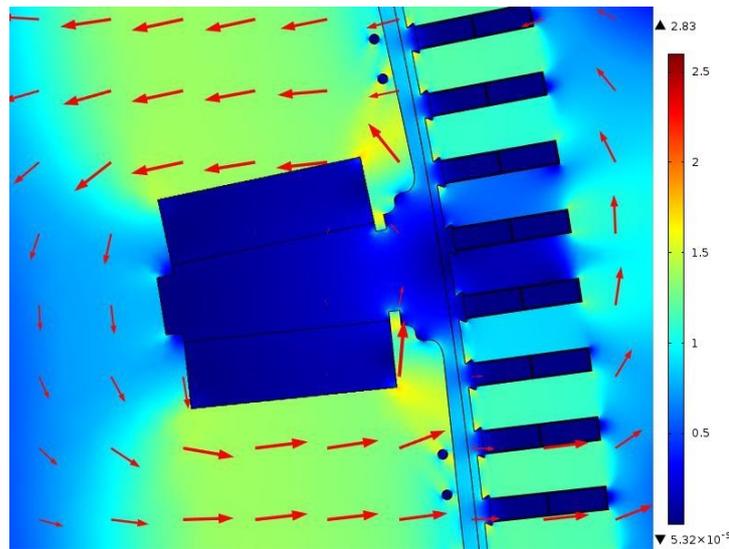


Figura 3.41: Circuito Magnético da MS de Grande Porte em Condições Normais de Operação.

Pode-se observar na Figura 3.42 a distribuição da densidade de fluxo magnético nos dentes do estator, a escala de cores mostra que a densidade de fluxo tem um valor aproximado de 1,22 [T] em cada um dos dentes. Diferentemente da máquina de pequeno porte, na máquina de grande porte o fluxo magnético não está totalmente concentrado nos dentes do estator, já que a área dos dentes é muito maior permitindo a livre passagem da densidade de fluxo magnético.

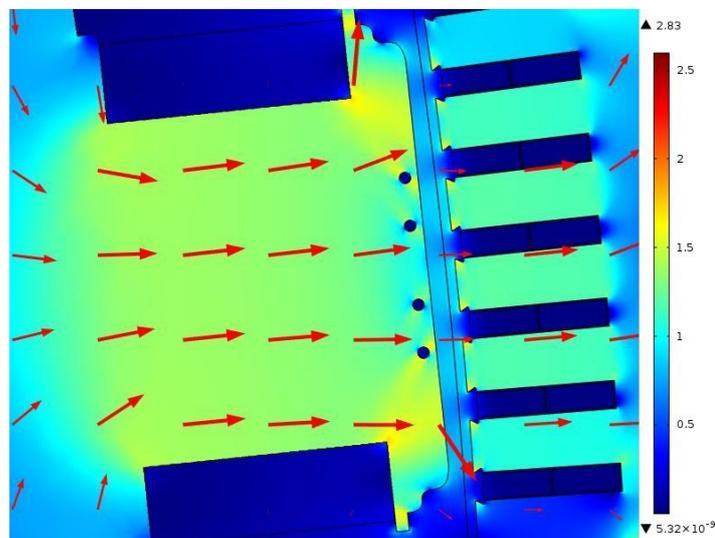


Figura 3.42: Densidade de Fluxo nos Dentes do Estator em Condições Normais de Operação.

Devido ao grande número de polos do rotor, dentes e ranhuras do estator, representa-se o comportamento da densidade de fluxo magnético somente de forma gráfica. Como o comportamento do fluxo magnético é simétrico, nos gráficos das figuras a seguir apresenta-se o fluxo magnético em uma pequena região da MS.

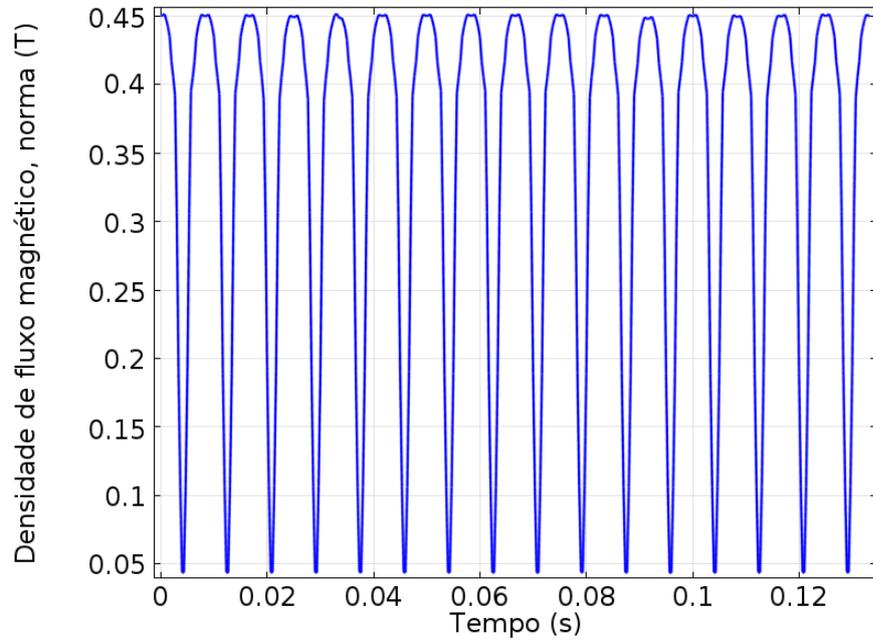


Figura 3.43: Comportamento da Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Entreferro da MS em Condições Normais de Operação.

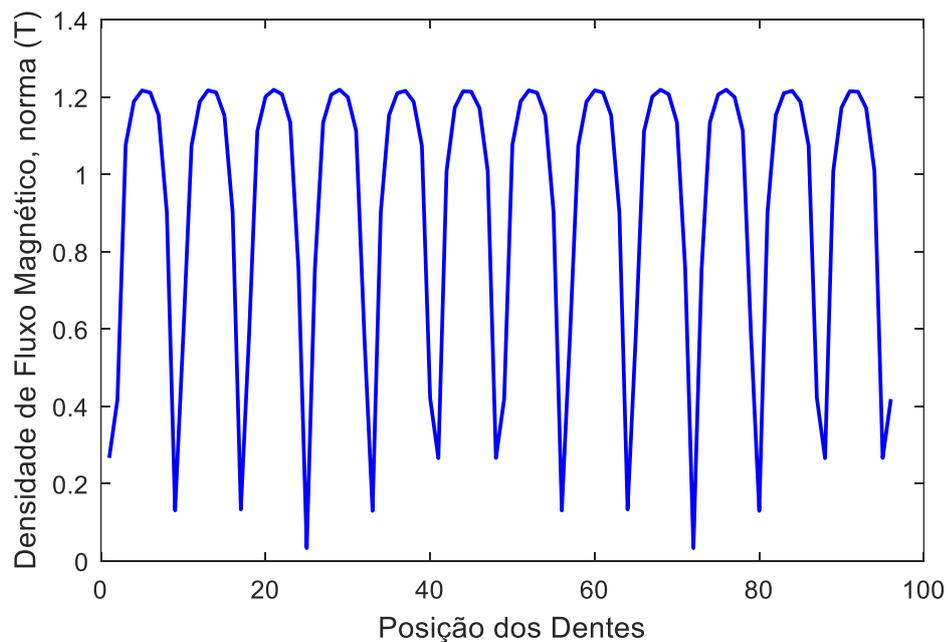


Figura 3.44: Comportamento da Densidade de Fluxo nos Dentes do Estator da MS em Condições Normais de Operação.

A Figura 3.43 mostra como se comporta a densidade de fluxo magnético no entreferro quando esta é analisada em função do tempo. Este gráfico faz analogia aos valores medidos por um sensor localizado no entreferro para analisar o fluxo nesta região da MS. Neste gráfico cada pico representa o fluxo em cada polo enquanto os vales representam os espaços entre os polos. O máximo valor da densidade de fluxo aqui é de 0,45 [T].

A Figura 3.44 mostra que nos dentes do estator o comportamento da densidade de fluxo é parecido ao comportamento no entreferro, porém, o comportamento varia para os valores mínimos da densidade de fluxo que correspondem aos dentes que não possuem na sua área frontal polos do rotor.

Outra das regiões onde se analisou o comportamento da densidade de fluxo magnético foi no duto de ventilação, estes percorrem todo o estator em determinadas áreas, a MS tem um total de 34 dutos de ventilação. Na Figura 3.45 se mostra um corte transversal da máquina em uma região que contém um dos dutos de ventilação, na imagem pode-se apreciar que a área de cor cinza escuro pertence ao duto de ventilação, como este é uniforme só representa-se uma pequena região devido ao grande tamanho da MS.

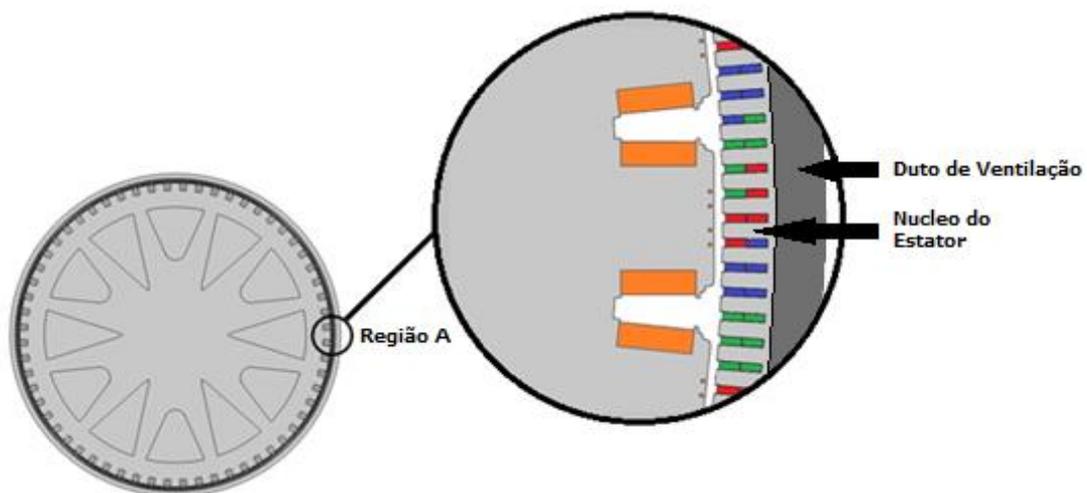


Figura 3.45: Corte Transversal MS Região com Duto de Ventilação

A Figura 3.46 mostra o fluxo magnético em escala de cores ao longo da MS, aqui se mostra um corte transversal da máquina em uma região que contém um dos dutos de ventilação. Pode-se observar como varia a densidade de fluxo magnético devido ao ar presente no duto de ventilação, a densidade de fluxo é maior no núcleo estator e mínimo no duto, já que o ar apresenta uma alta relutância magnética.

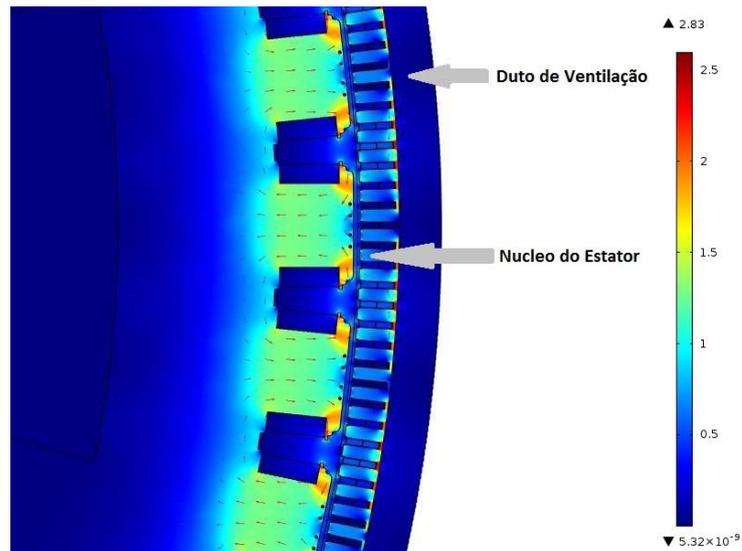


Figura 3.46: Densidade de Fluxo Magnético na Região A da MS em Condições Normais de Operação.

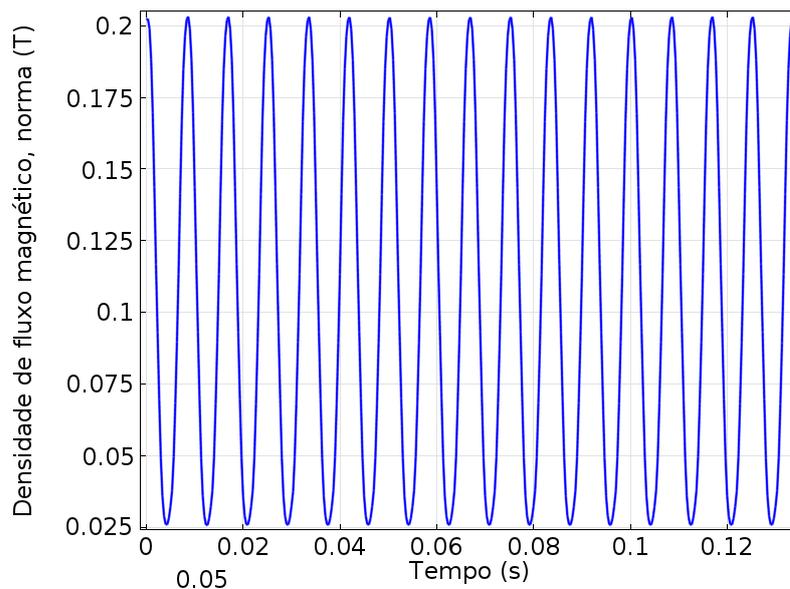


Figura 3.47: Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Duto de Ventilação da MS em Condições Normais de Operação.

Na Figura 3.47 é apresentado o comportamento da densidade de fluxo magnético no interior do duto de ventilação. Os picos representam os caminhos magnéticos formados pelos polos no estator. Percebe-se que o comportamento é completamente diferente ao comportamento da densidade de fluxo, tanto no entreferro, como nos dentes do estator, sendo os picos mais finos nesta região.

As tensões obtidas nas bobinas do estator apresentaram comportamento senoidal com uma defasagem de 120° entre cada uma das fases, como se pode observar na Figura 3.48.

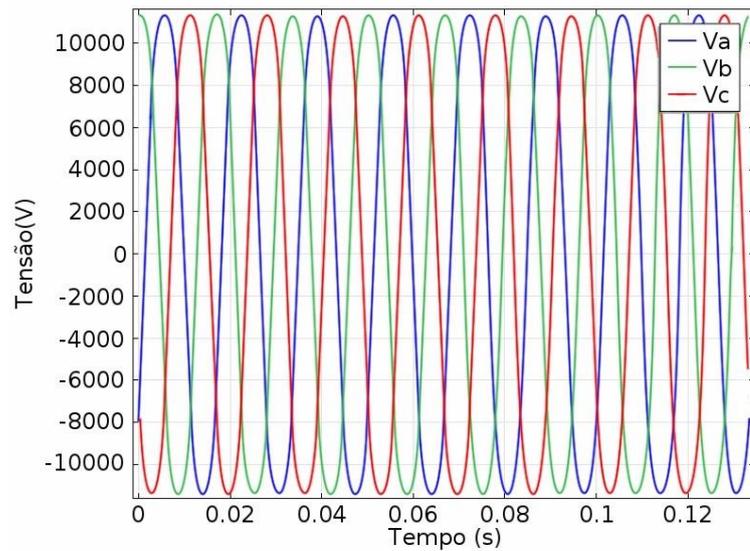


Figura 3.48: Tensão nas Bobinas do Estator em Condições Normais de Operação da MS.

A tensão pico de saída tem um valor de 11267 [V], pode-se perceber que a forma de onda é próxima da senoidal, devido ao tipo de enrolamento da máquina, que como foi dito anteriormente está composto de um grande número de espiras em série agrupadas por três circuitos em paralelo por cada fase, localizadas em 468 ranhuras com duas camadas. Isto leva à atenuação das componentes harmônicas que aparecem nas MS de pequeno porte.

3.3.2.2 Análise com Curto-Circuito na Bobina de um Polo e Sem Carga Conectada.

Do mesmo jeito que na máquina de pequeno porte, para modelar o curto-circuito na bobina de uns dos polos, escolheu-se uma corrente com um valor de 5% do valor nominal, os resultados obtidos das simulações podem ser vistos nas seguintes figuras.

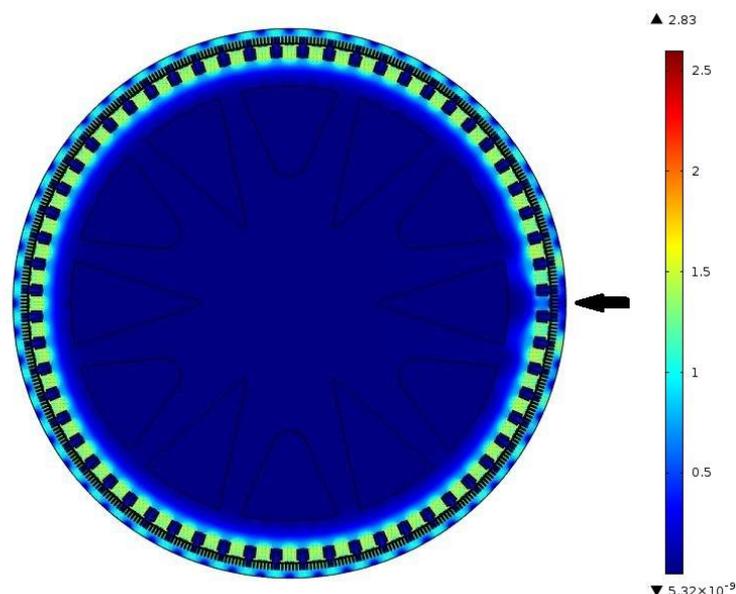


Figura 3.49: Densidade de Fluxo Magnético na MS de Grande Porte com Curto-Circuito.

Na Figura 3.49 a seta indica o polo que está em curto circuito. Pode-se observar como varia a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do gerador síncrono, por tanto a densidade de fluxo magnético não apresentará simetria radial como acontece quando a máquina funciona em condições normais. A Figura 3.50 apresenta uma vista em detalhe do polo em curto-circuito, no qual a intensidade da densidade de fluxo magnético torna-se menor que nos polos vizinhos. O fluxo magnético aumentará à medida que os polos se distanciam do polo em curto-circuito como visto nas Figuras 3.51 e 3.52. A densidade de fluxo magnético se mostra maior no polo localizado a 90° mecânicos do polo em curto-circuito.

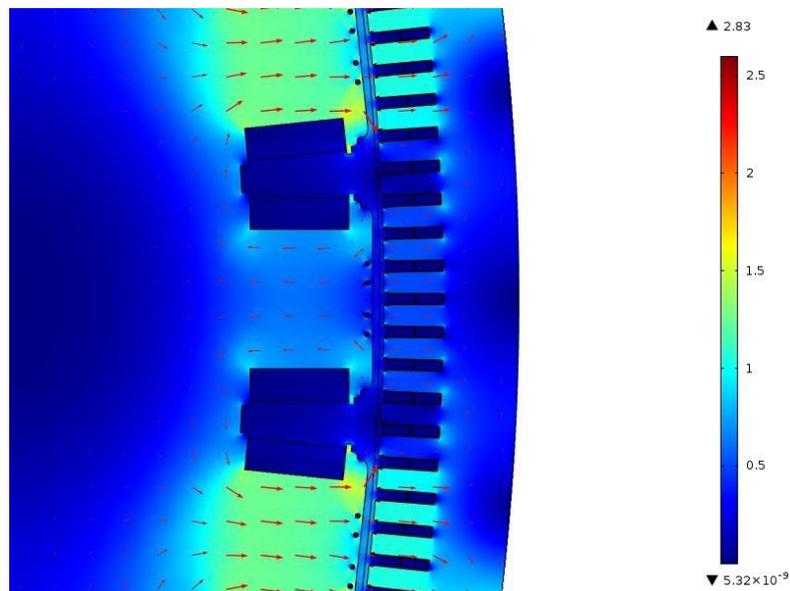


Figura 3.50: Densidade de Fluxo no Polo em Curto-Circuito.

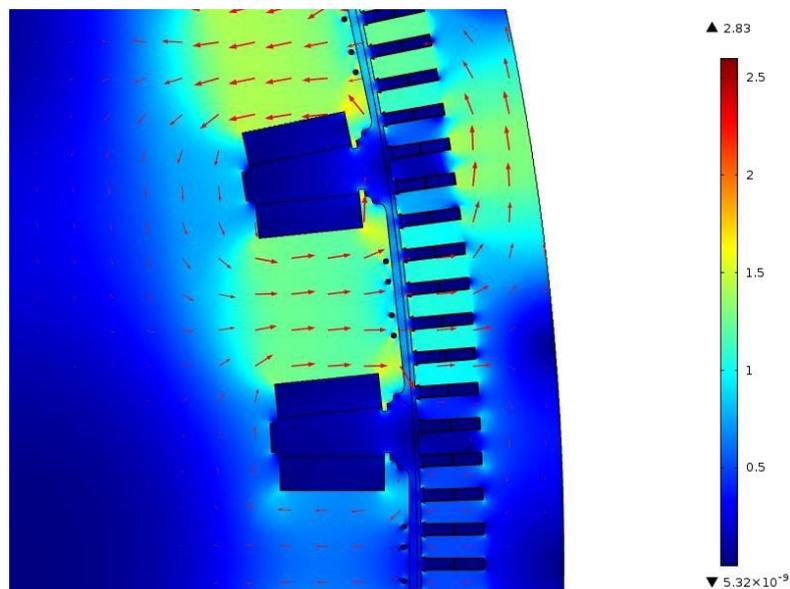


Figura 3.51: Polo Adjacente ao Polo em Curto-Circuito.

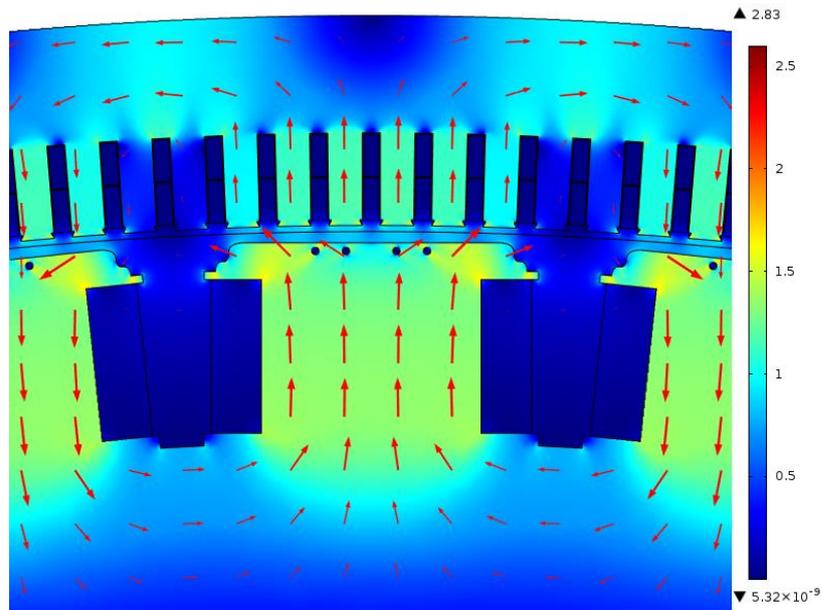


Figura 3.52: Polo Fisicamente Localizado a 90° do Polo em Curto-Circuito.

Nas Figuras 3.53 e 3.54 é apresentado como o circuito magnético formado pelos polos vizinhos ao polo em curto circuito fica mais intenso que o circuito magnético no polo em curto circuito.

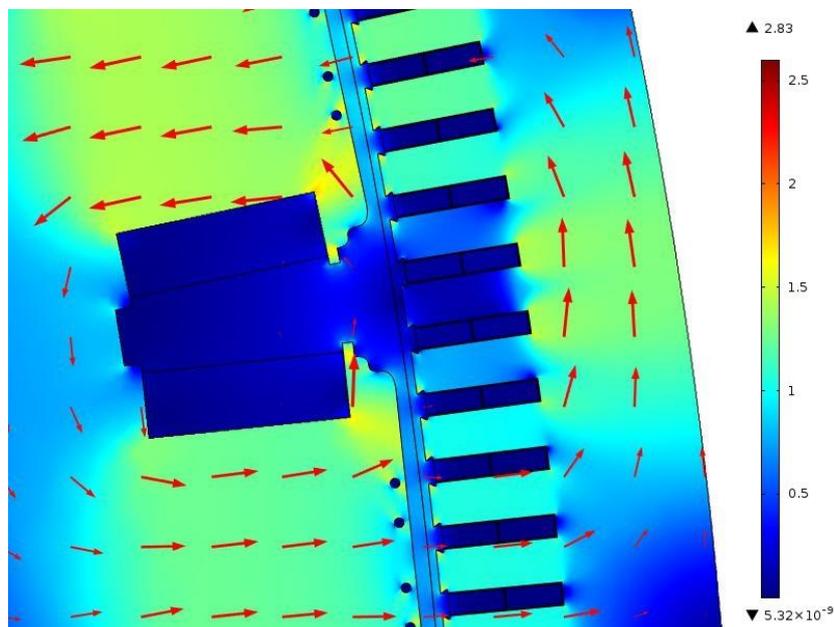


Figura 3.53: Circuito Magnético Formado nos Polos Vizinhos ao Polo em Curto-Circuito.

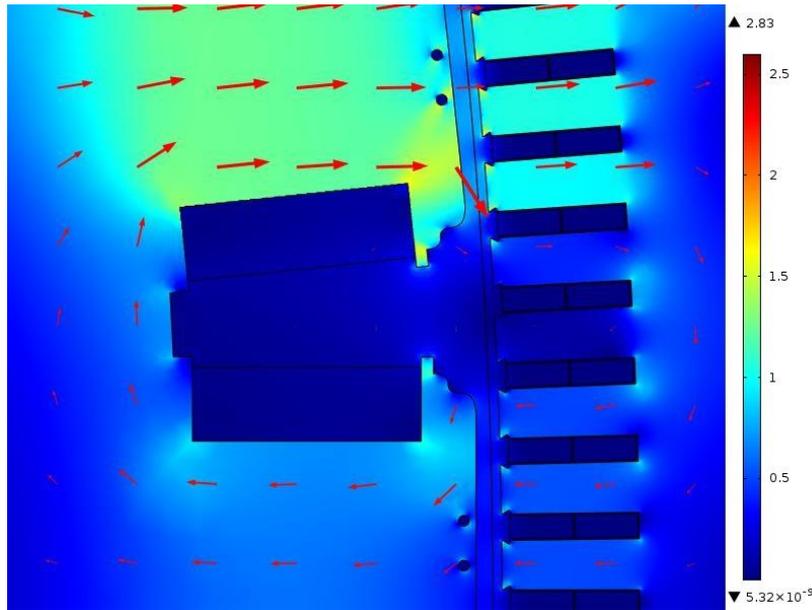


Figura 3.54: Circuito Magnético Formado no Polo em Curto-Circuito.

Nas figuras anteriores também percebe-se que nos dentes do estator que estão na área em frente ao polo em curto-circuito o fluxo máximo é de 0,51[T]. Nos dentes do estator que ficam na frente do polo fisicamente localizado a 90° do polo em curto circuito, o fluxo tem um valor de 1,20[T], estes valores podem ser corroborados no gráfico da Figura 3.56. Em algumas regiões a densidade de fluxo magnético atinge valores maiores que os obtidos para condições normais. Nas figuras a seguir pode-se verificar o comportamento da densidade de fluxo no entreferro e nos dentes.

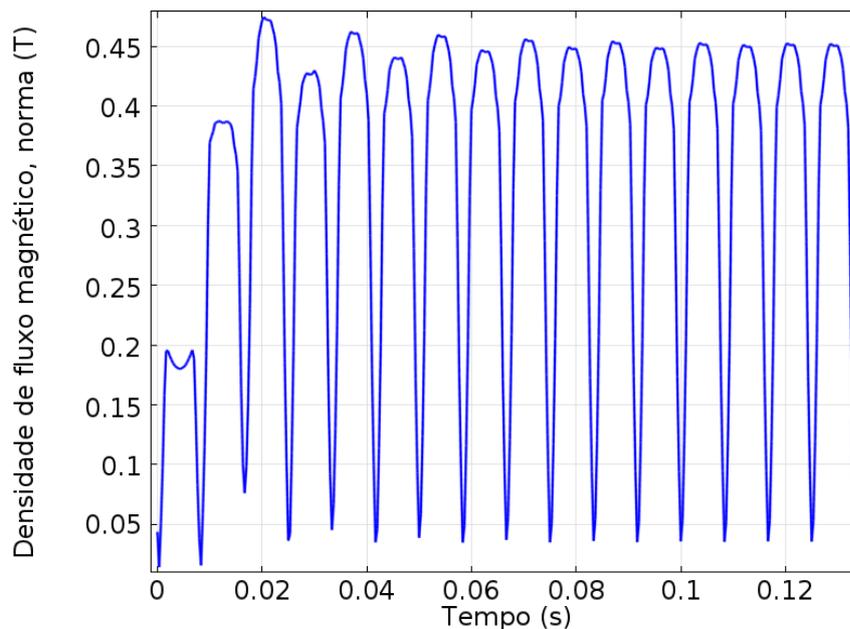


Figura 3.55: Comportamento da Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Entreferro da MS em Curto-Circuito.

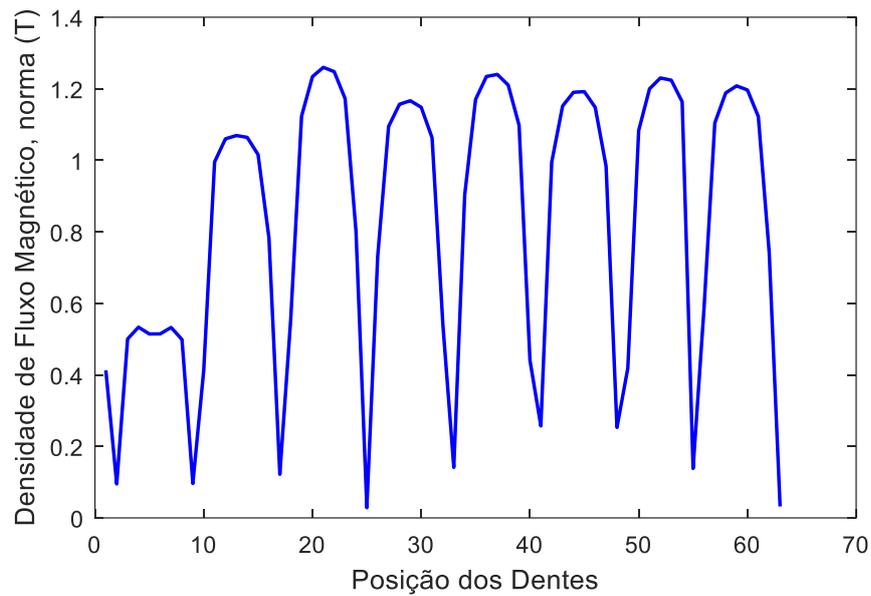


Figura 3.56: Comportamento da Densidade Fluxo nos Dentes da MS em Curto-Circuito.

Nos gráficos das Figuras 3.55 e 3.56 observa-se como varia o comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro e nos dentes do estator. Percebe-se que o comportamento é parecido e somente muda a amplitude da densidade de fluxo. O comportamento do fluxo magnético será um pouco instável a partir do fluxo gerado pelo polo em curto-circuito e se estabilizará a partir do fluxo gerado pelo polo fisicamente localizado a 90° do polo em curto-circuito.

O pequeno vale que se apresenta no bico do pico que representa o fluxo magnético do polo em curto-circuito, se deve ao grande tamanho do polo e ao pequeno valor da densidade de fluxo magnético que se gera devido ao curto-circuito, isto pode ser visto na Figura 3.57.

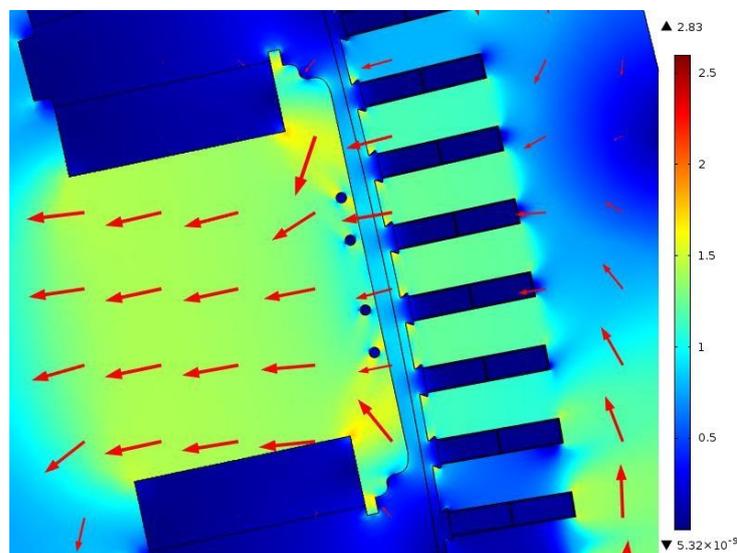


Figura 3.57: Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro da MS com Curto-Circuito.

Da análise no duto de ventilação se obtiveram os seguintes resultados, na Figura 3.58 mostra-se que o comportamento é semelhante ao mostrado na Figura 3.50 com algumas alterações devido à presença do duto de ventilação. O fluxo magnético está mais concentrado no núcleo do estator, já que este tem uma relutância magnética menor que a do ar presente no duto de ventilação.

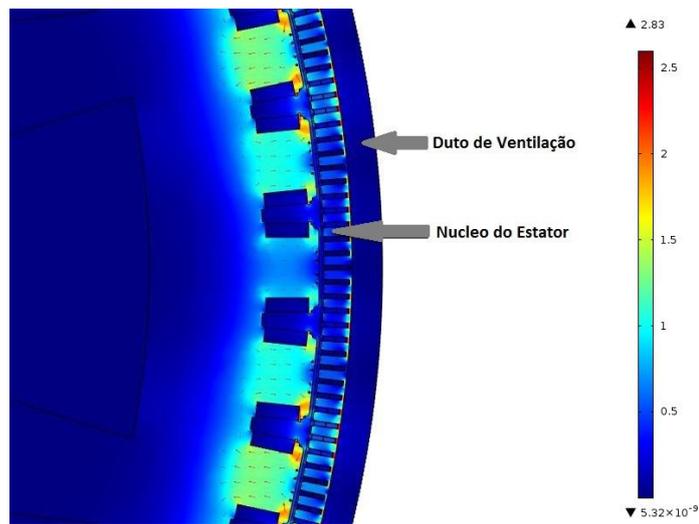


Figura 3.58: Polo em Curto-Circuito

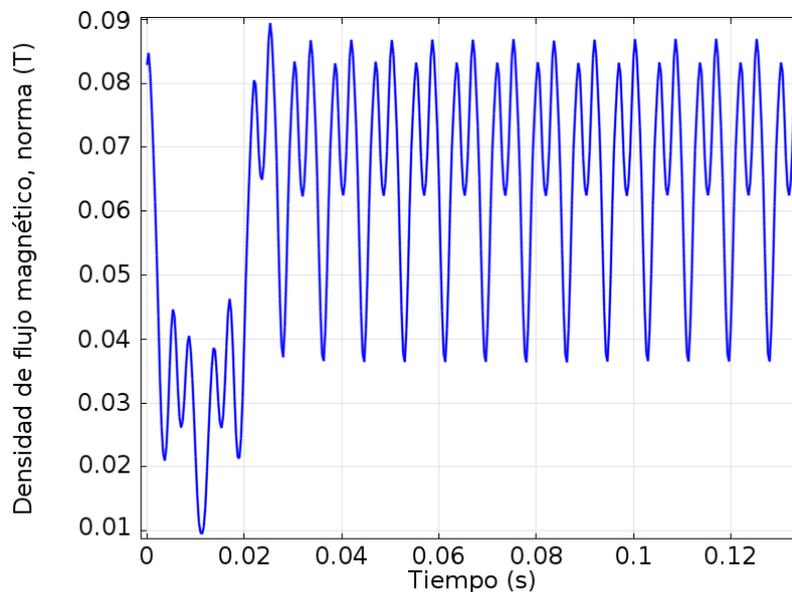


Figura 3.59: Densidade de Fluxo em Função do Tempo no Duto de Ventilação da MS em Condições de Curto-Circuito.

A Figura 3.59 mostra como se comporta a densidade de fluxo magnético no interior do duto de ventilação quando acontece a falha de curto-circuito na bobina de um dos polos. Os dois picos de menor valor representam os caminhos magnético entre o polo em curto-circuito e os polos vizinhos, desta maneira se pode perceber que existe um curto-circuito em um dos polos da MS.

O curto-circuito na bobina de um dos polos não afeta a forma de onda da tensão das bobinas do estator, que seguem apresentando um comportamento senoidal semelhante ao visto em condições normais, com defasagem de 120° , mas com redução da amplitude da onda. O valor da tensão pico diminui aproximadamente 200 [V], devido ao curto circuito presente na bobina de um dos polos. Observa-se este comportamento na Figura 3.60.

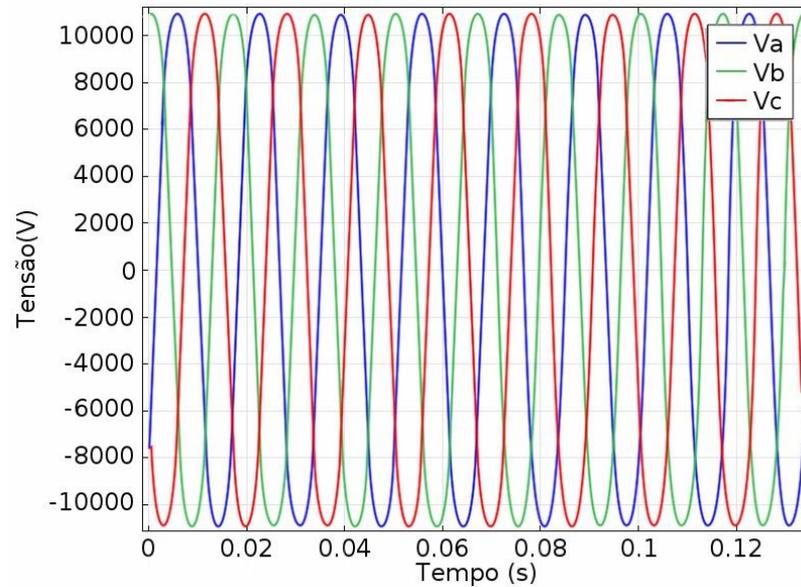


Figura 3.60: Tensão nas Bobinas do Estator na Condição de Curto-Circuito.

Capítulo 4

4.1 Conclusões

Considerando as análises dos resultados das simulações da MS em diferentes condições de operação podemos dizer que, tanto para a máquina de pequeno porte como para a máquina de grande porte, a densidade de fluxo magnético apresenta simetria radial e também é uniforme em algumas regiões da MS, a saber: os dentes e as coroas dos polos, isto acontece quando a máquina trabalha em condições normais. Quando se apresenta um curto-circuito na bobina de um dos polos a densidade de fluxo magnético não será uniforme nas diferentes regiões dos polos e perde-se a simetria radial. Além disso, a densidade de fluxo magnético no polo em curto-circuito diminuirá. Este também afeta a densidade de fluxo gerada pelos polos sem curto além de diminuir a amplitude da tensão de saída em cada uma das fases.

A densidade de fluxo magnético nos polos adjacentes ao polo em falha também diminuirá, mas nos polos vizinhos a estes polos adjacente a densidade de fluxo magnético apresenta um aumento para compensar o fluxo magnético não gerado no polo em curto.

Quando a MS possui uma grande quantidade de polos, o comportamento da densidade de fluxo magnético vai variar muito quando se apresenta um curto-circuito na bobina de um destes polos, portanto, o comportamento da densidade de fluxo no entreferro e no duto de ventilação é variante a partir do polo em curto-circuito e se regulariza a partir dos polos localizados fisicamente a 90° do polo em curto-circuito.

A densidade de fluxo magnético no entreferro e no duto de ventilação será menor que a densidade de fluxo no núcleo do rotor e estator devido à alta relutância magnética do ar, mas estes são lugares ideais para medir o fluxo magnético gerado pelos polos e detectar as falhas de curto-circuito, já que nestes pontos se pode perceber o padrão de comportamento da densidade de fluxo.

Os resultados obtidos das simulações realizadas no software de elementos finitos permitem fazer uma análise mais detalhada e compreender o comportamento da densidade de fluxo magnético nas diferentes regiões da MS. Após a validação dos dados resultantes das simulações com dados reais, se conclui que este é um software robusto e que seus resultados estão muito próximos aos dados reais, portanto os resultados obtidos fazem que este trabalho seja de grande

importância para as pesquisas neste campo, já que sem fazer o estudo em uma máquina síncrona real podemos obter resultados certos e conhecer como se distribui a densidade de fluxo magnético na MS nas diferentes condições de operação. Como foi dito anteriormente este trabalho pode ser bastante útil para pesquisas, sobretudo, para desenvolvimento de sensores de fluxo magnético aplicado a geradores síncronos porque os dados obtidos com estes podem ser comparados com os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados deste trabalho também permitem entender o comportamento do fluxo em cada um dos materiais que fazem parte da MS, assim como determinar uma relação entre a densidade de fluxo magnético e a tensão de saída da MS.

4.2 Trabalhos Futuros

Estudo mais detalhado da máquina síncrona de grande porte, durante seu funcionamento a vazio e com carga quando apresenta falhas de curto-circuito na bobina de uns dos polos. Também estudar o comportamento da densidade de fluxo magnético quando à máquina síncrona operasse sob diferentes tipos de cargas.

Desenvolvimento de um sensor interno para medir o comportamento da densidade de fluxo magnético na máquina síncrona, quando esta funciona como gerador. Assim como de um sistema para a aquisição e processamento dos dados obtidos pelo sensor, para deste modo poder detectar falhas de curto-circuito nas bobinas dos polos do rotor e poder evitar futuras paradas no sistema de geração. Os resultados obtidos das simulações feitas nesta dissertação de mestrado serão tomados como referência para comparar com os dados obtidos pelo sensor.

Referências Bibliográficas

- ALTINO, L.** Máquinas Síncronas: teoria e aplicações. Recife,Universitaria, 1984.
- ALVARADO, S.** Cálculo de Campos Magnéticos y Reactancias en Transformadores por el Método de Elementos Finitos.Universidad Simon Bolivar, 2012.
- AMAYA, M.** Identification of the synchronous machine parameters by the simulation of time domain tests using finite-elements method. IEEE International Electric Machines and Drives Conference. v. 1, n. 1, p. 1–5, 2003.
- ANTUNES, H.** Modelagem Matemática do Gerador Síncrono Trifásico de Pólos Salientes. Universidade Federal de viçosa, 2007.
- ARAÚJO, A.** Estudo de Técnicas de Detecção e Diagnóstico de Falhas em Geradores Síncronos. Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2011.
- BALTIERRA, A.; CERVANTES, I.; ESCARELA, R.** Simulación de un Generador Síncrono Mediante el Método de Elemento Finito con Aplicación a Control. Congreso AMCA. p. 206–211, 2004.
- BASTOS, J.; SADOWSKI, N.** Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. New York, Marcel Dekker.Inc. 2003.
- CHANDRA, J.; RAM, S.** Evaluation of Synchronous Generator Reactance Using Finite Element Method (fem). Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 27, pp. 68-76, 2011.
- CHANDRUPATLA, T.; BELEGUNDU, A.** Introduction to Finite Elements in Engeeneing. New Jersey, Prentice-Hall, 1997.
- CHAPMAN, S.** Máquinas Eléctricas. McGraw Hill, 2000.
- CORTES, M.** Curso Moderno de Maquinas Electricas Rotativas: Maquinas Síncronas y Motores C.A de Colector. Barcelona, Reverté, 2004.
- DE ANGELO, C.** Control para Máquinas de ca de Imanes Permanentes con FEM Arbitraria, sin Sensores Mecánicos. Universidad Nacional de La Plata, 2004.
- DIAS, M.** Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes. Tecnologia, V.6, pp. 107-127, 2005.
- FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A.** Máquinas Eléctricas. São Paulo, McGraw Hill, 1973.
- FRAILE MORA, J.** Máquinas Electricas. Madrid, McGraw Hill, 2003.

GIL, D.; GARCIA, J.; MASSAGUES, L. Diseño y Simulación de una Máquina Eléctrica Lineal de Reluctancia Conmutada con un Programa Informático. Universitat Rovira i Virgili, 2012.

GÜEMES, J. A; IRAOLAGOITIA, A M. Influencia de la Geometría del Rotor en la Corriente del Estator de MSIP(s). Universidad del País Vasco, 2000.

HALLIDAY, D. Física. Continental, 1994.

JIMÉNEZ, I. Estudio Teórico y Modelización por Elementos Finitos de una Máquina de Imanes Permanentes. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, 2011.

JULIANI, A. Análise do Campo Magnético de um Motor de Ímã Permanente no Rotor Utilizando o Método dos Elementos Finitos. Escola de Engenharia de São Carlos -Universidade de São Paulo, 2007.

KHALF, A.; WAMKEUE, R.; AGUGLIA, D. Finite Element Approach for Performances Prediction of a Small Synchronous Generator Using ANSYS Software. ,IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1–4, 2012.

KIMPARA, M. Modelagem e Análise de Geradores Síncronos Utilizando o Método de Reconstrução do Campo. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2012.

LUQUE, D.; RUPPERT, E. Estudo e Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos de Polos Salientes Utilizando Técnicas de Elementos Finitos (Parte I).UNICAMP, 2012.

MARTIGNONI, A. Máquinas Síncronas. São Paulo, EDART, 1967.

MENDOZA, A. Introducción al uso del software COMSOL Multiphysics. Universidad Veracruzana, 2013.

MEUNIER, G. The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling. London, ISTE, 2008.

NABETA, S.; CARDOSO, J. Determinação dos Parâmetros de Máquinas Síncronas pela Simulação por Elementos Finitos do Ensaio de Resposta em Freqüência. SBA Controle & Automação, v. 9, pp. 165–170, 1998.

NASAR, S. Máquinas Eléctricas. São Paulo, McGraw Hill, 1984.

PATRICIA, G.; MORALES, J. Medición y Simulación de Campos Electromagnéticos con Elementos Finitos de Subestaciones Pertencientes a la Empresa Eléctrica Centro Sur (EERCS). Universidad Politecnica Salesiana, 2008.

PAULA, G. Projeto de uma máquina síncrona com ímã permanente no rotor. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2011.

REDDY, J. An Introduction to the Finite Element Method. New York, McGraw Hill, 1993.

RESA, J. Cálculo de Pérdidas en la Cuba de un Transformador por el Método de los Elementos Finitos. Universidad Carlos III de Madrid, 2011.

RODRIGUES, T. Análise de Curto Circuito em um Gerador Síncrono de Pólos Salientes pelo Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

S.RATNAJEEVAN; HOOLE, H. Computer-Aided Analysis and Design of Electromagnetic Devices. New York, Elsevier, 1989.

SCHMIDT, E.; GRABNER, C.; TRAXLER-SAMEK, G. Reactance Calculation of a 500 MVA Hydro-Generator Using a Finite Element Analysis With Superelements. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. 838–844, 2001.

SEN, P. Principles of Electric Machines and Power Electronics. Canada, John Willey, 1997.

SERWAY, R. Electricidad y Magnetismo. McGraw Hill, 2000.

SILVESTER, P.; FERRARI, R. Finite Elements for Electrical Engineers. New York, Press, 1996.

SILWAL, B. Computation of Eddy Currents in a Solid Rotor Induction Machine with 2-D and 3-D FEM. AALTO University, 2012.

SIMÕES, B. Dimensionamento de uma Máquina Síncrona de Imãs Permanentes com Validação Através de um Software do Tipo Elementos Finitos. Universidade Federal de Viçosa, 2010.

SJOKVIST, S.; ERIKSSON, S. Study of Demagnetization Risk for a 12 kW Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Power. Energy Science and Engineering, pp. 128-134, 2013.

SPERB, E. Acionamento do Motor Síncrono de Imãs Permanentes Usando DSP. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2013.

VARGAS, C.; HERNÁNDEZ, T. Estimación de los Parámetros Eléctricos del Generador no. 15 de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, Basado en la Aplicación del Método de Elementos Finitos. Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, pp. 0–8, 2009.

ZAMBRANO, G. Simulação do Ensaio de Resposta em Frequência em Máquina Síncrona de Pólos Salientes Utilizando o Método dos Elementos Finitos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

FLORES, R.; ASIAÍN, T. Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales. Información Tecnológica, Vol. 22 N° 4, 2011.