

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO EM UM GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS
SALIENTES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Tiago Granato Rodrigues

2013



**Universidade Federal
do Rio de Janeiro**

Escola Politécnica

**ANÁLISE DE CURTO CIRCUITO EM UM GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS
SALIENTES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Tiago Granato Rodrigues

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM UM GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS
SALIENTES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Tiago Granato Rodrigues

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Richard Magdalena Stephan, D.Ing.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Agosto de 2013

Rodrigues, Tiago Granato

Análise de curto circuito em uma Máquina Síncrona de Pólos Salientes pelo Método dos Elementos Finitos / Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

xi, 73f : il.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p 78

1. Curto Circuito Trifásico 2. Gerador Síncrono Trifásico 3. Indução de correntes nos amortecedores 4. Distribuição de fluxo magnético no rotor, estator e entreferro. I. Título

*"O único lugar onde
sucesso vem antes de
trabalho é no dicionário."*

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me dar condições de realizar este trabalho.

“Porque Dele, e por meio Dele, e para Ele são todas as coisas. A Ele, pois, a glória eternamente. Amém!” (Romanos 11. 36).

Agradeço a meu pai e engenheiro Antonio Ribeiro Rodrigues por ter despertado meu interesse pela engenharia desde o curso técnico até a universidade. Agradeço a minha mãe Sandra Maria Granato Rodrigues por todo apoio, suporte e aconselhamento dados ao longo da minha vida. Agradeço a ambos por dedicarem sua vida a mim sem nunca esperar nada em troca. Sem eles essa conquista não seria possível.

Agradeço a meus irmãos Giovanni Granato e Cristiane Granato, por todo o apoio, amizade e companheirismo.

Agradeço à minha namorada Caroline Stersa pela cumplicidade e paciência durante a elaboração deste trabalho, sempre me motivando nos momentos de desânimo e me dando carinho nos momentos de dificuldade.

Agradeço a meu orientador, Antônio Carlos Ferreira, por toda a paciência durante minha orientação, pelos enormes conhecimentos transmitidos a mim e por toda a dedicação durante as etapas desse trabalho, pois mesmo com uma agenda cheia sempre encontrou um horário para se dedicar à minha orientação.

Agradeço aos membros da banca examinadora Prof. Sergio Sami Hazan e Prof. Richard Magdalena Stephan, pela contribuição muito respeitosa dada ao meu trabalho.

Agradeço a meus grandes amigos Felipe Cabral, Rafael Caetano, Rafael Mazza, Mayara Cagido, Jonathan Carvalho, Richard Paul e Vinícius Maia, pois certamente essa jornada foi menos cansativa com bons amigos ao meu lado.

Agradeço ao pessoal da secretaria Kátia e Oswaldo por sempre estarem à disposição para me ajudar em qualquer situação.

Agradeço ao CAPES e ao CNPq por ter fornecido as ferramentas necessárias ao desenvolvimento desse trabalho, pois sem a utilização do software Maxwell a realização desse estudo não seria possível.

Agradeço a todos os funcionários do Laboratório de Máquinas Elétricas da UFRJ que me auxiliaram com algumas fotografias utilizadas nesse trabalho.

E agradeço também a todos que contribuíram de alguma forma a minha formação, seja direta ou indiretamente.

In Memoriam, dedico esse trabalho à minha avó Djanira do Couto Granato por todo orgulho e todo carinho a mim prestado enquanto fui privilegiado com a presença dela na minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM UM GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS SALIENTES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Tiago Granato Rodrigues

Agosto/2013

O presente trabalho visa mostrar o comportamento transitório de um gerador síncrono de pólos salientes com a presença e com a ausência dos enrolamentos amortecedores, bem como o fluxo magnético no rotor e estator e as correntes induzidas nos seus enrolamentos amortecedores, quando existentes, durante a ocorrência de uma falta trifásica simétrica em seus terminais. Será utilizado o pacote RMaxprt do software Maxwell que é um programa dedicado a análises de dispositivos eletromagnéticos através do Método dos Elementos Finitos.

Será feita uma breve introdução teórica sobre o funcionamento das máquinas síncronas em geral, explicando objetivamente e resumidamente os principais fenômenos físicos pertinentes ao funcionamento da máquina, incluindo aspectos construtivos, equações e a modelagem física e matemática. Para as simulações dos transitórios a máquina será modelada no software Maxwell sob condições de operação pré-falta distintas, em um determinado momento as barras amortecedoras serão removidas da análise e os resultados serão comparados a fim de averiguar as principais diferenças entre a operação com os enrolamentos amortecedores e sem os enrolamentos amortecedores. Paralelamente serão obtidas as distribuições do campo magnético para diferentes regiões da máquina bem como as distribuições de corrente nos enrolamentos amortecedores.

Índice

Índice de Figuras	ix
1. Introdução:	1
1.1. <i>Motivação</i> :	1
1.2. <i>Objetivo</i> :	1
2. Conceitos Básicos da Máquina Síncrona Trifásica	2
2.1. <i>Constituição</i> :	2
2.2. <i>Princípio de Funcionamento</i> :	4
3. Modelagem Matemática da Máquina Síncrona de Polos Salientes (MSPS)	6
3.1. <i>O Problema Transitório</i> :	6
3.2. <i>Equações Gerais</i> :	6
3.3. <i>Transformação dq0</i> :	9
3.4. <i>Modelo da MSPS pela transformação dq0</i> :	10
4. Curto Circuito Trifásico nos terminais de um gerador síncrono	16
4.1. <i>Período Subtransitório</i> :	16
4.2. <i>Período Transitório</i> :	21
4.3. <i>Regime Permanente</i> :	23
4.4. <i>Equações do curto circuito trifásico simétrico</i> :	24
5. Programa utilizado	27
5.1. <i>Visão geral do RMXprt</i> :	27
5.2. <i>Visão geral do Maxwell 2D</i> :	33
6. Simulações e Resultados	39
6.1. <i>Gerador em Vazio com enrolamento amortecedor</i>	40
6.2. <i>Gerador em Vazio sem enrolamento amortecedor</i>	51
6.3. <i>Gerador com carga nominal com enrolamento amortecedor</i>	57
6.4. <i>Gerador com carga nominal sem enrolamento amortecedor</i>	64
7. Conclusões:	69
7.1. <i>Considerações Finais</i> :	69
7.2. <i>Sugestão de trabalhos futuros</i> :	69
8. Referências Bibliográficas:	70

Índice de Figuras

Figura 2.1- Tipos de máquinas síncronas	2
Figura 2.2-Enrolamentos Amortecedores	3
Figura 2.3-Anéis coletores de uma excitatriz com escovas.....	3
Figura 2.4-Representação das tensões nos terminais de um gerador síncrono.....	5
Figura 3.1-Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.	6
Figura 3.2-Decomposição em eixos direto e em quadratura para a MSPS	9
Figura 3.3-Circuitos equivalentes para o eixo direto e em quadratura da MSPS.	14
Figura 4.1-Corrente de curto circuito trifásico em uma fase com componente de corrente contínua nula.....	17
Figura 4.2-Eschema elétrico para a máquina em regime subtransitário.	17
Figura 4.3-Circuito equivalente para o eixo direto em curto circuito.....	18
Figura 4.4-Circuito equivalente para o eixo direto com os terminais em aberto.	19
Figura 4.5-Circuito equivalente para o eixo em quadratura em regime subtransitário.	19
Figura 4.6-Circuito equivalente para o eixo em quadratura em curto circuito	20
Figura 4.7-Circuito equivalente para o eixo em quadratura em circuito aberto.	20
Figura 4.8-Circuito equivalente de eixo direto para o período transitório.....	21
Figura 4.9-Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito.	21
Figura 4.10-Circuito equivalente para o eixo direto em circuito aberto.....	22
Figura 4.11-Circuito equivalente de eixo direto em regime permanente.	23
Figura 4.12-Circuito equivalente de eixo em quadratura em regime permanente.....	23
Figura 4.13-Diagrama esquemático do curto circuito trifásico simétrico.....	25
Figura 5.1-Escolha do exemplo adequado	28
Figura 5.2-Configuração dos enrolamentos de armadura do modelo escolhido.	29
Figura 5.3-Configuração do rotor escolhido.	30
Figura 5.4-Condições de operação, aba "General".....	31
Figura 5.5-Condições de operação, aba "SYNM"	32
Figura 5.6-Dados do modelo definido.....	32
Figura 5.7-Aba "Motion Setup"	33
Figura 5.8-Ramo de excitação.	34
Figura 5.9-Opções do ramo "Excitations".	35
Figura 5.10-Configurações de análise, aba "General"	36
Figura 5.11-Configuração de análise, aba "Save Fields".	36
Figura 5.12-Configuração de resultados.	37
Figura 5.13-Seleção dos campos a serem escolhidos.	38
Figura 6.1-Configuração do gráfico para a curva de magnetização da máquina.....	40
Figura 6.2-Curva de magnetização em vazio da máquina.....	41
Figura 6.3-Configuração do enrolamento de campo.	42
Figura 6.4-Tensão Terminal do Gerador.	43
Figura 6.5-Configuração do enrolamento de armadura - Fase A.....	44
Figura 6.6-Correntes de Armadura para o gerador em vazio e com os amortecedores..	44
Figura 6.7-Corrente de campo para o gerador em vazio e com os amortecedores.....	45

Figura 6.8-Corrente nos amortecedores no Gerador em Vazio.....	46
Figura 6.9-Correntes de curto circuito em regime permanente.....	46
Figura 6.10-Linhas de fluxo magnético e densidade de campo magnético no rotor, estator e entreferro antes do defeito.	47
Figura 6.11-Linhas de fluxo e densidade de campo no entreferro antes do defeito.....	47
Figura 6.12-Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.....	48
Figura 6.13-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor e estator imediatamente após a ocorrência do defeito.	48
Figura 6.14- Linhas de campo e densidade de fluxo no entreferro imediatamente após a ocorrência do defeito.	49
Figura 6.15-Densidade de corrente nas barras amortecedoras imediatamente após a ocorrência do defeito.	49
Figura 6.16-Linhas de fluxo e densidade de campo algum tempo após a ocorrência do defeito.	50
Figura 6.17- Linhas de fluxo no rotor, estator e entreferro um tempo depois da falta.	50
Figura 6.18-Correntes induzidas nos amortecedores após o defeito.	51
Figura 6.19-Troca do material das barras amortecedoras.....	52
Figura 6.20-Corrente de armadura para o Gerador em Vazio sem indução de correntes nas barras amortecedoras.	52
Figura 6.21-Comparação entre as correntes da fase A para os casos com e sem amortecedores para o gerador em vazio.....	53
Figura 6.22-Corrente de campo para o gerador em vazio sem amortecedores.	54
Figura 6.23-Comparação entre as correntes de campo dos casos com e sem amortecedores para o gerador em vazio	54
Figura 6.24-Correntes de curto circuito em regime permanente para o gerador em vazio sem amortecedores.	55
Figura 6.25-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor, estator e entreferro da máquina antes do defeito.	55
Figura 6.26-Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.....	56
Figura 6.27-Linhas de fluxo e densidade de campo para o caso sem amortecedores durante o defeito.	56
Figura 6.28- Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor, estator e entreferro.....	57
Figura 6.29-Modelagem do enrolamento de campo.	58
Figura 6.30-Correntes de armadura na ocorrência de um defeito trifásico em um Gerador com carga nominal.	58
Figura 6.31-Corrente de campo para o gerador com carga nominal.....	59
Figura 6.32- Corrente nos amortecedores para o gerador com carga nominal.	59
Figura 6.33-Linhas de fluxo magnético e densidade de campo magnético no rotor estator e entreferro antes do defeito.	60
Figura 6.34-Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.....	60
Figura 6.35-Fluxo magnético e densidade de campo no entreferro antes do defeito.	61
Figura 6.36-Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no rotor estator e entreferro na ocorrência do defeito.....	61
Figura 6.37-Correntes induzidas nos amortecedores no instante do defeito.	62
Figura 6.38-Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no entreferro na ocorrência do defeito	62

Figura 6.39-Fluxo magnético e densidade de campo no rotor, estator e entreferro após a ocorrência do defeito.	63
Figura 6.40-Correntes induzidas no enrolamento amortecedor.	63
Figura 6.41-Corrente de armadura para o gerador com carga e sem amortecedores.....	64
Figura 6.42-Comparação entre as corrente de armadura na fase a entre os geradores com carga com e sem amortecedores.	65
Figura 6.43-Corrente de campo para o gerador com carga e sem amortecedores.....	65
Figura 6.44-Comparação entre as correntes de campo entre os geradores com e sem amortecedores.	66
Figura 6.45-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor estator e entreferro.	66
Figura 6.46-Correntes no amortecedores.....	67
Figura 6.47- Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no rotor, estator e entreferro.....	67
Figura 6.48-Linhas de fluxo e densidade de campo magnético instantes depois do defeito.	68
Figura 6.49-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor estator e entreferro.	68

1. Introdução

1.1. *Motivação*

A energia elétrica se tornou fundamental em todos os setores da atividade humana, desde a nossa vida cotidiana até as atividades comerciais e industriais. Com isso o consumo de energia elétrica no Brasil e no mundo tem crescido exponencialmente ao longo dos anos. Sabemos que esse crescimento está intimamente relacionado com o crescimento das nossas atividades. Para atender a essa demanda crescente, é imprescindível a utilização de geradores elétricos para converter a energia nas formas encontradas na natureza em energia elétrica, e se fazendo fundamental o estudo do comportamento dos diferentes tipos de geradores elétricos.

Os três tipos de máquinas elétricas mais utilizadas são as máquinas de corrente contínua, máquinas síncronas de corrente alternada e máquinas assíncronas também de corrente alternada. As máquinas de corrente contínua têm sua principal utilização em aplicações onde se necessita de um conjugado de partida elevado, ou ainda quando a fonte de tensão, disponível (motores) ou desejada (geradores), é de corrente contínua. As máquinas assíncronas de indução, são máquinas mais baratas construtivamente e com baixo custo de manutenção. Tradicionalmente são utilizadas em aplicações que necessitam de um torque de partida mais suave e com variações pequenas de velocidade. Atualmente esses problemas básicos já foram solucionados com a evolução da eletrônica de potência, uma vez que com a utilização de conversores e inversores de frequência é possível variar a velocidade das máquinas e manter seu torque em nível desejado. As máquinas síncronas têm uma gama menor de aplicação, principalmente por causa de seu custo elevado se comparado, por exemplo, com a máquina de indução. Ela é uma máquina comumente utilizada em aplicações de alta potência (da ordem de centenas de kW), daí o fato de ser amplamente utilizada nas grandes usinas hidrelétricas e termelétricas, geração nas plataformas de extração e prospecção de petróleo, geração de emergência em refinarias e etc.

Por todos esses motivos se faz necessário o estudo cada vez mais detalhado do comportamento das máquinas e de seus componentes internos tanto em regime permanente como em regime transitório, basicamente representado pela partida e por faltas na rede.

1.2. *Objetivo*

O objetivo deste trabalho é simular o comportamento transitório de um Gerador Síncrono de Pólos Salientes durante uma falta trifásica simétrica sob diferentes condições de operação, gerador em vazio e em carga nominal, observar a influência dos enrolamentos amortecedores no defeito e, através da utilização do Método dos Elementos Finitos, observar o comportamento do fluxo magnético no rotor e estator e as corrente induzidas nos enrolamentos amortecedores.

2. Conceitos Básicos da Máquina Síncrona Trifásica

2.1. Construção:

A máquina síncrona trifásica é constituída basicamente de 3 enrolamentos cujos eixos magnéticos estão defasados de 120° elétricos ao longo do perímetro do entreferro, constituindo o estator, internamente existe um enrolamento em torno de um núcleo de ferro alimentado por corrente contínua que produz um fluxo magnético estático, constituindo o rotor que também é chamado de enrolamento de campo ou de excitação.

Como todas as máquinas elétricas, a máquina síncrona é uma máquina reversível, isto é, ela pode funcionar tanto transformando energia elétrica em energia mecânica (motor) quanto de forma reversa, ou seja, ao fornecer energia mecânica ao eixo do rotor, colocando-o em determinada velocidade angular ω , o fluxo magnético de campo induzirá corrente elétrica nos enrolamentos do estator, transformando energia mecânica em energia elétrica (gerador).

O rotor da máquina síncrona pode ser construído de 2 formas – Rotor Cilíndrico e Rotor de Pólos Salientes. A figura 2.1 a) mostra uma máquina síncrona de rotor liso de 2 pólos e a figura 1 b) mostra uma máquina síncrona de pólos salientes.

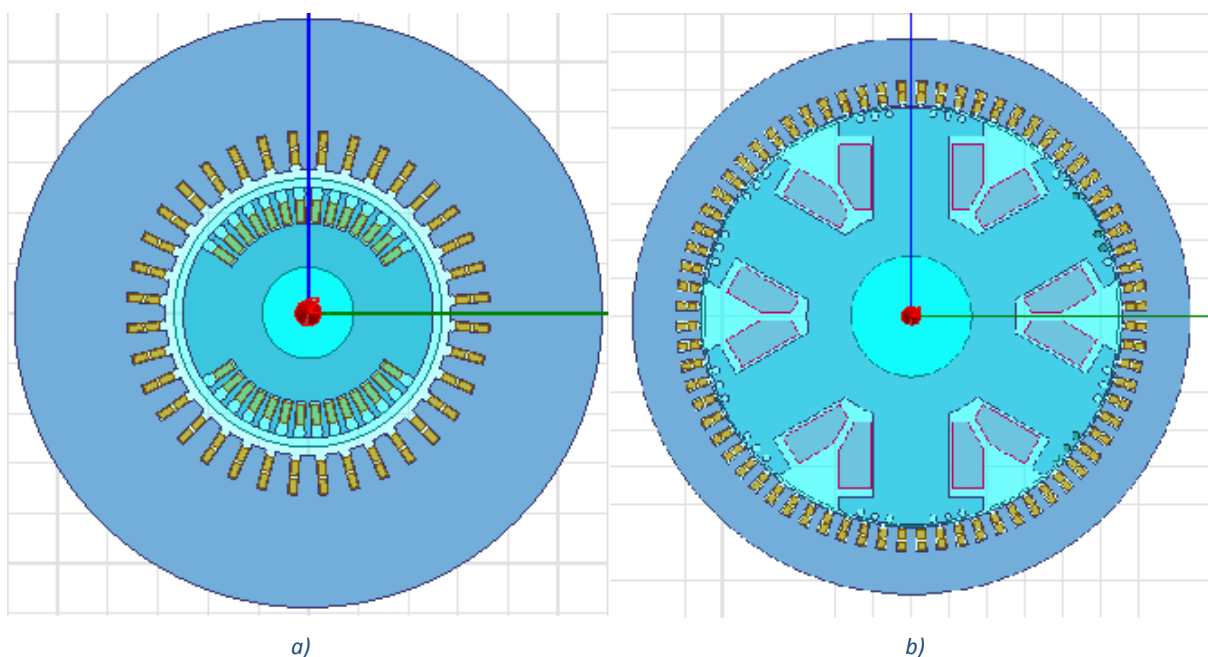


Figura 2.1 - Tipos de máquinas síncronas

Os enrolamentos amortecedores também fazem parte da máquina síncrona, e estão localizados em ranhuras no rotor, tratando-se de barras de material condutor curto circuitadas nas extremidades através de um anel condutor, e possui a finalidade de dar a partida como uma máquina de indução até atingir a velocidade síncrona, uma vez que o motor síncrono só produz torque em velocidade síncrona, e garantir a estabilidade da máquina sob variações de carga e eliminar oscilações de velocidade.

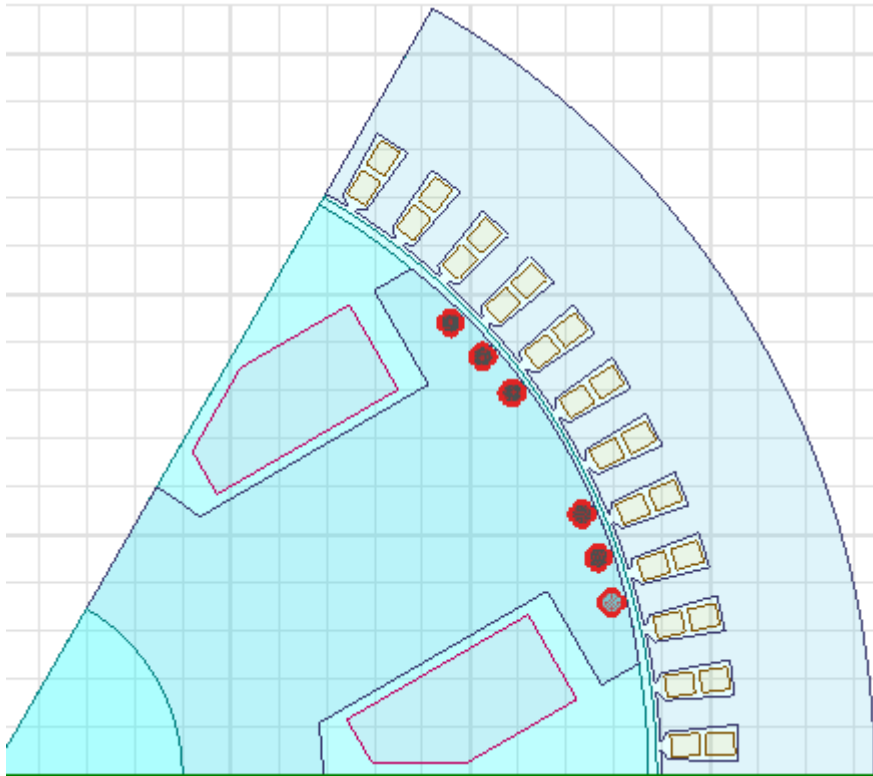


Figura 2.2 - Enrolamentos Amortecedores

Outros componentes importantes são os mancais, que são dispositivos mecânicos responsáveis por suportar o eixo da máquina, e por sua vez o eixo é o componente responsável por transmitir o torque.

E por fim a excitatriz, que é responsável por fornecer corrente para os enrolamentos de campo, que pode ser com ou sem escovas.

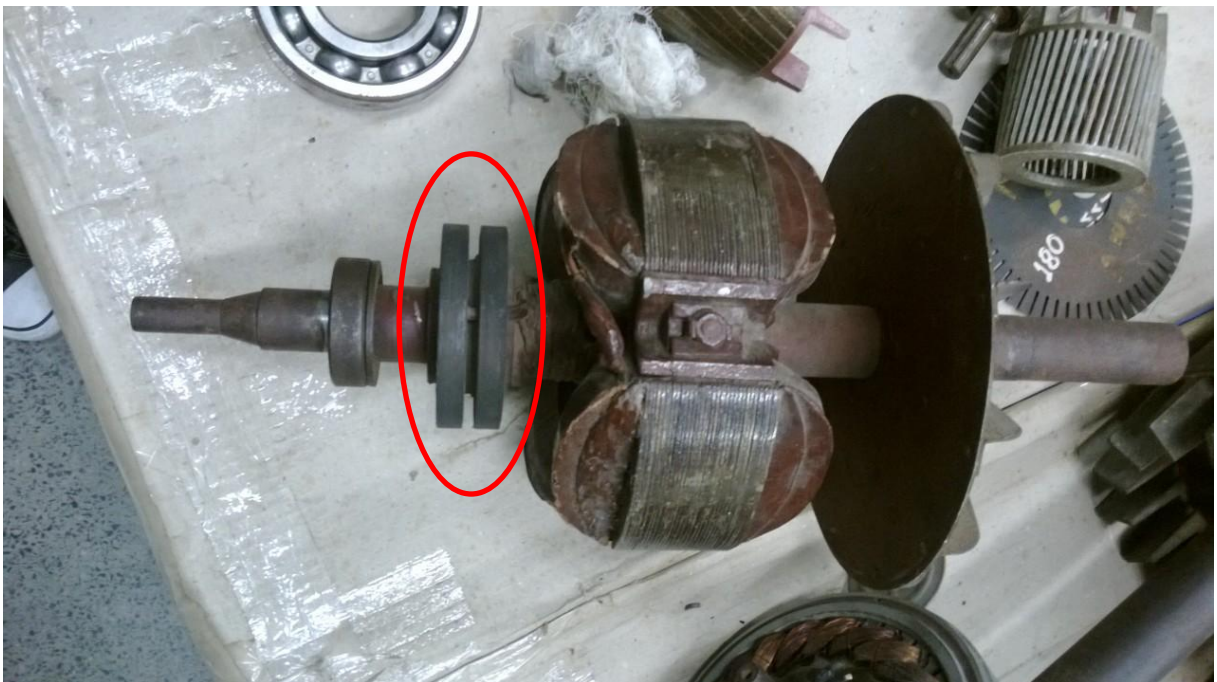


Figura 2.3 - Anéis coletores de uma excitatriz com escovas.

2.1.1. Máquina Síncrona de Rotor Liso

Numa máquina síncrona de rotor liso o rotor é constituído de um núcleo cilíndrico podendo ser maciço ou laminado, construído de forma a conter ranhuras ou cavas cuja função é abrigar o enrolamento de campo, podendo ainda recobrir as cavas com talas metálicas geralmente de material não-magnético. O enrolamento é arranjado ao longo do perímetro do núcleo de forma a produzir um campo o mais próximo possível de um senoidal.

Devido à sua robustez, o rotor, e conseqüentemente o enrolamento de campo, resiste muito bem aos esforços centrífugos, possibilitando que a máquina trabalhe em velocidades elevadas. Essa característica faz com que o gerador síncrono de rotor liso esteja apto a ser acionado por turbinas a vapor ou a gás, que são turbinas que trabalham a velocidades relativamente elevadas. Por conta disso esse tipo de gerador é comumente chamado de turbogerador ou turboalternador.

2.1.2. Máquina Síncrona de Pólos Salientes

Numa máquina síncrona de pólos salientes o enrolamento de campo é fixado no eixo de forma a compor um espaçamento igual entre os terminais polares. Por exemplo, numa máquina de 4 pólos os eixos polares estarão igualmente separados de 90° entre si e no caso de 6 polos estarão separados de 60° entre si.

Devido à sua construção não é recomendado que uma máquina síncrona de pólos salientes opere em velocidades muito elevadas, pois a força centrífuga proveniente do movimento de rotação é muito elevada, podendo comprometer a fixação dos terminais polares. Por conta disso seu uso se restringe a aplicações de menor velocidade, como no caso das turbinas hidráulicas onde é necessária uma quantidade maior de pólos para gerar f.e.m. a 60 Hz em velocidades de rotação baixas.

2.2. Princípio de Funcionamento

2.2.1. Máquina de Rotor Liso

De forma a mostrar o princípio básico de funcionamento da máquina será inicialmente considerada uma máquina de rotor liso devido à simplicidade por possuir um entreferro constante. Por conta disso a distribuição de fluxo magnético espacial ao longo do perímetro do rotor e entreferro tende a ser uma senóide com seu valor máximo localizado no centro do pólo, já que não há caminhos preferenciais de fluxo magnético. Essa distribuição tende a ser senoidal devido aos esforços dos projetistas de máquinas de conseguir esse tipo de distribuição.

Os enrolamentos do estator quando alimentados por tensões trifásicas equilibradas produzem uma fmm resultante girante ao longo do eixo da máquina em velocidade síncrona. Ao se ligar o campo magnético de excitação do rotor este tende a se alinhar com o campo girante do estator, e dessa forma atingindo a velocidade síncrona.

De forma reversa, quando o rotor excitado for animado com movimento, observaremos uma variação senoidal de fluxo num ponto qualquer do estator, em outras palavras, o rotor quando excitado e animado produz o campo girante que induz f.e.m. nos

enrolamentos do estator. Com o rotor parado não há variação de fluxo mesmo se estiver excitado, pois seu campo magnético é estático, como o de um eletroímã.

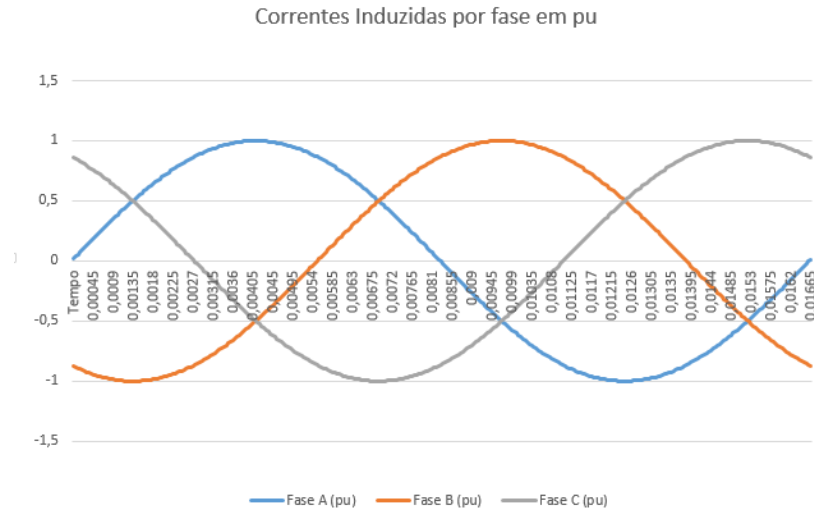


Figura 2.4 - Representação das tensões nos terminais de um gerador síncrono.

A velocidade síncrona é dada por:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

p é o número de polos da máquina

f é a frequência em [Hz]

n é a velocidade em [rpm]

2.2.2. Máquina de Pólos Salientes

Numa máquina de pólos salientes, diferentemente das máquinas de rotor liso, existe um caminho preferencial de fluxo determinado pela saliência dos pólos do rotor. A permeância magnética será maior ao longo do eixo polar e menor no eixo entre os pólos, também chamada de região interpolar.

Devido a essa diferença, é possível concluir que a indutância mútua de estator de uma máquina síncrona de pólos salientes varia em função da posição angular do rotor, e conseqüentemente, em função do tempo. Dessa forma há um problema na hora do desenvolvimento do modelo matemático pois a distribuição de fluxo não é mais uma distribuição senoidal ao longo do entreferro devido ao surgimento de componentes harmônicas provenientes da saliência dos pólos. Outro fator são os harmônicos espaciais existentes ao longo da máquina, em termos construtivos a máquina é feita de forma e reduzir a influência desses harmônicos nas ondas de fluxo concatenado pelos enrolamentos, porém eles não são totalmente eliminados podendo ser observados nas ondas de fluxo magnético.

3. Modelagem Matemática da Máquina Síncrona de Polos Salientes (MSPS)

3.1. O Problema Transitório

Sob condições de regime permanente o campo magnético resultante do estator gira na mesma velocidade que o campo induzido pelo rotor. Dessa forma, não há variação temporal dos enlaces de fluxo nos circuitos do rotor conseqüentemente nenhuma tensão é induzida ali.

No caso da ocorrência de um distúrbio no sistema, ou ainda uma mudança brusca nas condições de operação, os fluxos concatenados nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Portanto, para qualquer perturbação, nesse caso um curto circuito, correntes são induzidas no enrolamento de campo e no enrolamento amortecedor de forma a compensar os fluxos concatenados, mantendo-os constantes.

A quantidade de variáveis a se observar numa máquina síncrona é muito grande, pois uma representação exata depende da análise de um sistema de equações diferenciais simultâneas complexas para circuitos acoplados igualmente complexos. Por conta disso para se fazer uma análise básica dos transitórios em uma MSPS serão desprezados diversos efeitos conhecidos, como histerese, saturação do ferro e correntes parasitas. Mesmo assim, é necessária a criação de um modelo que ao menos represente os efeitos mais importantes a serem representados num estudo de transitórios numa MSPS e é isso que será desenvolvido nesse capítulo.

Inicialmente serão apresentadas de forma bem reduzida as principais relações da máquina síncrona, e em seguida será apresentada a transformação dq0 sob a qual se desenvolverá a teoria de máquina síncrona de pólos salientes.

3.2. Equações Gerais

Para a análise da máquina síncrona serão considerados os seguintes esquemas de ligação para os enrolamentos de rotor e estator.

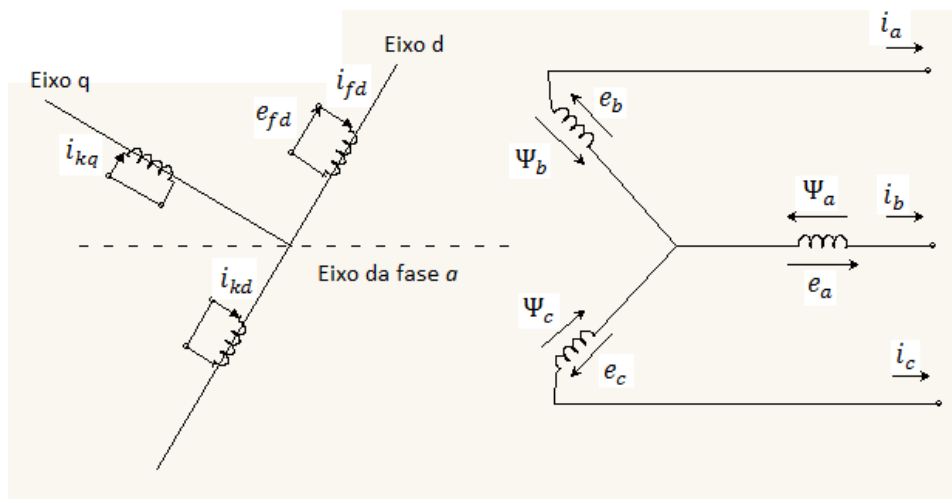


Figura 3.1 - Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.

Relações elétricas do estator

Os enrolamentos do estator de um gerador síncrono podem ser caracterizados pelas seguintes equações representando as tensões terminais para as 3 fases[1]:

$$e_a = \frac{d\Psi_a}{dt} - R_a i_a \quad (3.1)$$

$$e_b = \frac{d\Psi_b}{dt} - R_b i_b \quad (3.2)$$

$$e_c = \frac{d\Psi_c}{dt} - R_c i_c \quad (3.3)$$

Por sua vez o enlace de fluxo magnético por fase é definido por:

$$\Psi_a = -l_{aa}(\theta)i_a - l_{ab}(\theta)i_b - l_{ac}(\theta)i_c + l_{afd}(\theta)i_{fd} + l_{akd}(\theta)i_{kd} + l_{akq}(\theta)i_{kq} \quad (3.4)$$

$$\Psi_b = -l_{ba}(\theta)i_a - l_{bb}(\theta)i_b - l_{bc}(\theta)i_c + l_{bfd}(\theta)i_{fd} + l_{bkd}(\theta)i_{kd} + l_{bkq}(\theta)i_{kq} \quad (3.5)$$

$$\Psi_c = -l_{ca}(\theta)i_a - l_{cb}(\theta)i_b - l_{cc}(\theta)i_c + l_{cfd}(\theta)i_{fd} + l_{ckd}(\theta)i_{kd} + l_{ckq}(\theta)i_{kq} \quad (3.6)$$

Onde:

e_a, e_b, e_c

→ Valores instantâneos das tensões terminais fase neutro para as fases a, b e c respectivamente.

i_a, i_b, i_c

→ Valores instantâneos de corrente de linha nas fases a, b e c respectivamente.

R_a, R_b, R_c → Resistências de armadura para as fases a, b e c respectivamente.

l_{aa}, l_{bb}, l_{cc} → Indutâncias próprias dos enrolamentos de armadura.

l_{ab}, l_{bc}, l_{ac} → Indutâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura.

$l_{afd}, l_{akd}, l_{akq}, l_{bfd}, l_{bkd}, l_{bkq}, l_{cfd}, l_{ckd}, l_{ckq}$

→ Indutâncias mútuas entre os enrolamentos de estator e rotor.

Relações elétricas do rotor

O rotor é representado pelo enrolamento de campo e pelos enrolamentos amortecedores, um no eixo d e outro no eixo q . Os eixos d e q são os eixos direto e em quadratura. Quando um enrolamento tem uma componente no eixo direto significa que há uma componente na direção do eixo polar, o eixo em quadratura significa uma componente no eixo interpolar, ou seja com uma defasagem de 90° em relação ao pólo.

Como o enrolamento de campo fica localizado no pólo do rotor, ele será representado apenas como uma componente de eixo direto, não havendo componentes em quadratura.

As equações que relacionam os circuitos do rotor estão abaixo[1].

$$e_{fd} = \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + R_{fd}i_{fd} \quad (3.7)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + R_{kd}i_{kd} \quad (3.8)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + R_{kq}i_{kq} \quad (3.9)$$

O fluxo magnético enlaçado é definido por:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} - L_{akq} \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.12)$$

Onde:

e_{fd} → Tensão no enrolamento de campo.

i_{fd}, i_{kd}, i_{kq}

→ Correntes nos circuitos de campo e armadura para os eixos d e q .

R_{fd}, R_{kd}, R_{kq}

→ Resistências dos circuitos de campo e amortecedores para os eixos d e q .

$L_{ffd}, L_{kkd}, L_{kkq}$ → Indutâncias próprias dos circuitos do rotor.

L_{fkd} → Indutância mútua entre os circuitos do rotor.

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}$ → Indutância mútua entre rotor e estator.

θ → é o ângulo entre o eixo direto e o eixo da fase a ..

Nos enrolamentos amortecedores as tensões instantâneas são levadas a zero devido ao fato desse enrolamento ser curto circuitado em suas extremidades.

Para o rotor as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas entre seus enrolamentos são constantes, já as indutâncias mútuas entre rotor e estator são variáveis com o ângulo do rotor.

3.3. Transformação dq0

A transformação dq0, também chamada de transformação de Park, que foi desenvolvida em 1929 por R. H. Park, é uma transformação de coordenadas onde consideramos que os enrolamentos a , b e c , defasados de 120° , giram em sincronismo numa velocidade ω em relação ao referencial d e q , que é composto de 2 enrolamentos teóricamente estacionários e defasados de 90° entre si.

Essa transformação foi desenvolvida baseado no conceito de que como a MSPS possui relutância variável devido aos polos salientes, então as reatâncias vistas pelos enrolamentos do estator são variáveis em função do tempo porém, após serem transformadas as grandezas passam a “girar” junto com o rotor, enxergando os caminhos de fluxo magnético constantes que acompanham os polos do rotor, facilitando a análise[1] [2].

A solução do problema da relutância variável surgiu a partir da observação de dois casos limítrofes para a máquina. Inicialmente observou-se o comportamento do fluxo quando a corrente de armadura está defasada de 90° da tensão gerada. Nesse caso a componente fundamental do fluxo magnético proveniente da reação de armadura está na posição inversa em relação ao fluxo de campo.

Quando a corrente de armadura está em fase com a tensão de excitação, a componente fundamental do fluxo resultante da reação de armadura é exatamente oposta a região interpolar do rotor, ficando no mesmo sentido que o fluxo de campo. Outro ponto a se considerar é que a relutância do entreferro é maior no eixo interpolar reduzindo a amplitude da componente fundamental da onda.

Assim podemos decompor as correntes de armadura em 2 componentes, uma em fase com a tensão gerada que chamamos de componente no eixo em quadratura \hat{I}_q da corrente de armadura e outra defasada de 90° em relação à tensão gerada que chamamos de componente de eixo direto \hat{I}_d da corrente de armadura[2].

A partir dessa decomposição é feita toda a modelagem da MSPS(Máquina Síncrona de Pólos Salientes).

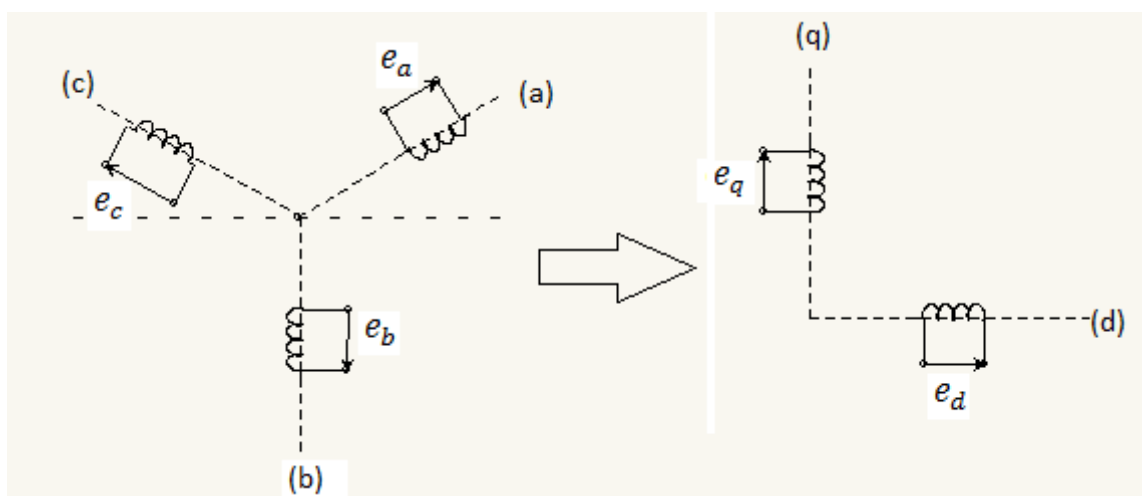


Figura 3.2 - Decomposição em eixos direto e em quadratura para a MSPS

A transformação na forma matricial pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\text{sen } \theta & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Após realizar o procedimento algébrico para a inversão da matriz da equação (3.13), chegamos à transformada dq0 inversa:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\text{sen}(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\text{sen}(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde:

$\theta \rightarrow$ é a diferença de fase entre o eixo direto e a fase a .

Da mesma forma que essa equação foi feita com corrente, também pode ser feita com outras grandezas que necessitem ser transformadas tais como tensão ou enlace de fluxo nas fases. Os índices d , q e 0 se referem às componentes de eixo direto, quadratura e sequência zero respectivamente.

Com a máquina devidamente balanceada, as componentes de sequência zero produzem fluxo líquido nulo de entreferro, portanto sob condições equilibradas não há grandezas de sequência zero.

3.4. Modelo da MSPS pela transformação dq0

Com base na transformação dq0 serão demonstradas as equações da MSPS para o regime transitório.

Aplicando-se as equações (3.1) a (3.3) na matriz (3.13) será feita a decomposição das equações de circuito da máquina em suas componentes de eixo direto e quadratura.

$$e_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\theta}{dt} - R_a i_d \quad (3.15)$$

$$e_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\theta}{dt} - R_a i_q \quad (3.16)$$

$$e_0 = \frac{d\Psi_0}{dt} - R_a i_0 \quad (3.17)$$

Como o ângulo θ é o ângulo entre a fase “a” e o eixo direto da máquina, podemos concluir que $d\theta/dt$ é a velocidade angular da máquina em radianos por segundo.

O fluxo magnético enlaçado pelo estator também pode ser transformado utilizando a transformação dq0.

$$\Psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (3.18)$$

$$\Psi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (3.19)$$

$$\Psi_0 = -L_0 i_0 \quad (3.20)$$

Como dito no ítem 3.2, em condições balanceadas, $i_0 = 0$, então pela equação (3.20) o fluxo enlaçado de sequência zero Ψ_0 também se iguala a zero. Analisando-se agora a equação (3.17), o ramo $\frac{d\Psi_0}{dt}$ é igual a zero, uma vez que a derivada de uma constante é nula, portanto $e_0 = 0$.

O fluxo magnético enlaçado pelo rotor após ser efetuada a transformação é representado por:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d \quad (3.21)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fkd} i_{fd} + L_{kkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{akd} i_d \quad (3.22)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kkq} i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} i_q \quad (3.23)$$

A principal vantagem desse método é que agora as indutâncias observadas nas equações (3.18) a (3.21) são independentes da posição do rotor.

Antes que o circuito equivalente seja montado será feita a transformação para p.u. dessas equações, a partir das equações (3.7), (3.8), (3.9), (3.15) e (3.16), tomando-se como premissa que o t_{base} é o tempo que o rotor leva para percorrer 1 radiano em velocidade síncrona então $t_{base} = 1/\omega_{base}$, e que $e_{s base} = Z_{s base} I_{s base} = \omega_{base} \Psi_{s base}$ temos:

$$\frac{e_d}{e_{s base}} = \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{\Psi_q \omega_r}{e_{s base}} - \frac{R_a i_d}{e_{s base}}$$

$$\frac{e_d}{e_{s base}} = \frac{d}{dt} \frac{\omega_r \Psi_d}{\omega_{base} \Psi_{s base}} - \frac{\omega_r \Psi_q}{\omega_{base} \Psi_{s base}} - \frac{R_a i_d}{Z_{base} I_{s base}}$$

$$e_d^{pu} = \frac{d\Psi_d^{pu}}{dt} - \Psi_q^{pu} \omega_r^{pu} - R_a^{pu} i_d^{pu} \quad (3.24)$$

Da mesma forma:

$$e_q^{pu} = \frac{d\Psi_q^{pu}}{dt} + \Psi_d^{pu} \omega_r^{pu} - R_a^{pu} i_q^{pu} \quad (3.25)$$

Tomando-se como premissa que $e_{fd\ base} = Z_{fd\ base} I_{fd\ base} = \omega_{base} \Psi_{fd\ base}$:

$$e_{fd}^{pu} = \frac{d\Psi_{fd}^{pu}}{dt} + R_{fd}^{pu} i_{fd}^{pu} \quad (3.26)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kd}^{pu}}{dt} + R_{kd}^{pu} i_{kd}^{pu} \quad (3.27)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kq}^{pu}}{dt} + R_{kq}^{pu} i_{kq}^{pu} \quad (3.28)$$

Agora os enlaces de fluxo das equações (3.18) a (3.21) serão passados para p.u., a relação básica é $\Psi_{s\ base} = L_{s\ base} I_{s\ base}$:

$$\Psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (3.18)$$

$$\frac{\Psi_d}{\Psi_{s\ base}} = \frac{-L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd}}{L_{s\ base} I_{s\ base}} \quad (3.29)$$

Para uma melhor representação no sistema p.u. as indutâncias mútuas devem ser definidas por[1]:

$$L_{afd}^{pu} = \frac{L_{afd} I_{fd\ base}}{L_{s\ base} I_{s\ base}} \quad (3.30)$$

$$L_{akd}^{pu} = \frac{L_{akd} I_{kd\ base}}{L_{s\ base} I_{s\ base}} \quad (3.31)$$

$$L_{akq}^{pu} = \frac{L_{akq} I_{kq\ base}}{L_{s\ base} I_{s\ base}} \quad (3.32)$$

Aplicando-se as equações (3.30) a (3.32) em (3.29) temos:

$$\Psi_d^{pu} = -L_d^{pu} i_d^{pu} + L_{afd}^{pu} i_{fd}^{pu} + L_{akd}^{pu} i_{kd}^{pu} \quad (3.33)$$

Da mesma forma para o eixo em quadratura:

$$\Psi_q^{pu} = -L_q^{pu} i_q^{pu} + L_{akq}^{pu} i_{kq}^{pu} \quad (3.34)$$

O mesmo processo será feito para os enrolamentos de rotor. Tendo como ponto de partida as equações (3.21) a (3.23):

$$\frac{\Psi_{fd}}{\Psi_{fd\ base}} = \frac{L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d}{L_{fd\ base} I_{fd\ base}} \quad (3.35)$$

$$\frac{\Psi_{kd}}{\Psi_{kd \text{ base}}} = \frac{L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - \frac{3}{2}L_{akd}i_d}{L_{kd \text{ base}}I_{kd \text{ base}}} \quad (3.36)$$

$$\frac{\Psi_{kq}}{\Psi_{kq \text{ base}}} = \frac{L_{kkq}i_{kq} - \frac{3}{2}L_{akq}i_q}{L_{kq \text{ base}}I_{kq \text{ base}}} \quad (3.37)$$

Para uma melhor representação no sistema p.u. as indutâncias mútuas devem ser definidas por[1]:

$$L_{fda}^{pu} = \frac{3}{2} \frac{L_{afd}I_{s \text{ base}}}{L_{fd \text{ base}}I_{fd \text{ base}}} \quad (3.38)$$

$$L_{fkd}^{pu} = \frac{L_{fkd}I_{kd \text{ base}}}{L_{fd \text{ base}}I_{fd \text{ base}}} \quad (3.39)$$

$$L_{kda}^{pu} = \frac{3}{2} \frac{L_{akd}I_{s \text{ base}}}{L_{kd \text{ base}}I_{kd \text{ base}}} \quad (3.40)$$

$$L_{kdf}^{pu} = \frac{L_{fkd}I_{fd \text{ base}}}{L_{kd \text{ base}}I_{kd \text{ base}}} \quad (3.41)$$

$$L_{kqa}^{pu} = \frac{3}{2} \frac{L_{akq}I_{s \text{ base}}}{L_{kq \text{ base}}I_{kq \text{ base}}} \quad (3.42)$$

Sendo assim, aplicando-se as equações (3.38) a (3.42) em (3.35) a (3.37) teremos:

$$\Psi_{fd}^{pu} = L_{ffd}^{pu}i_{fd}^{pu} + L_{fkd}^{pu}i_{kd}^{pu} - L_{fda}^{pu}i_d^{pu} \quad (3.43)$$

$$\Psi_{kd}^{pu} = L_{kdf}^{pu}i_{fd}^{pu} + L_{kkd}^{pu}i_{kd}^{pu} - L_{kda}^{pu}i_d^{pu} \quad (3.44)$$

$$\Psi_{kq}^{pu} = L_{kkq}^{pu}i_{kq}^{pu} - L_{kqa}^{pu}i_q^{pu} \quad (3.45)$$

A partir das equações (3.33), (3.34), (3.43), (3.44) e (3.45) é possível montar os circuitos equivalentes de eixo direto e em quadratura para o gerador, mas primeiro serão definidas algumas equivalências.

As indutâncias de estator L_d e L_q podem ser decompostas numa indutância de dispersão L_a idêntica nos eixos d e q, e em indutâncias mútuas L_{md} e L_{mq} para cada eixo, da

mesma forma as indutâncias de rotor L_{ffd} , L_{kkd} e L_{kkq} também podem ser decompostas em indutâncias de dispersão mais as indutâncias mútuas. Dessa forma:

$$L_d = L_a + L_{md} \quad (3.46)$$

$$L_q = L_a + L_{mq} \quad (3.47)$$

$$L_{ffd} = L_{fd} + L_{md} \quad (3.48)$$

$$L_{kkd} = L_{kd} + L_{md} \quad (3.49)$$

$$L_{kkq} = L_{kq} + L_{mq} \quad (3.50)$$

Com essas relações já é possível montar os circuitos equivalentes para o eixo direto e quadratura através da Figura 3.3[1].

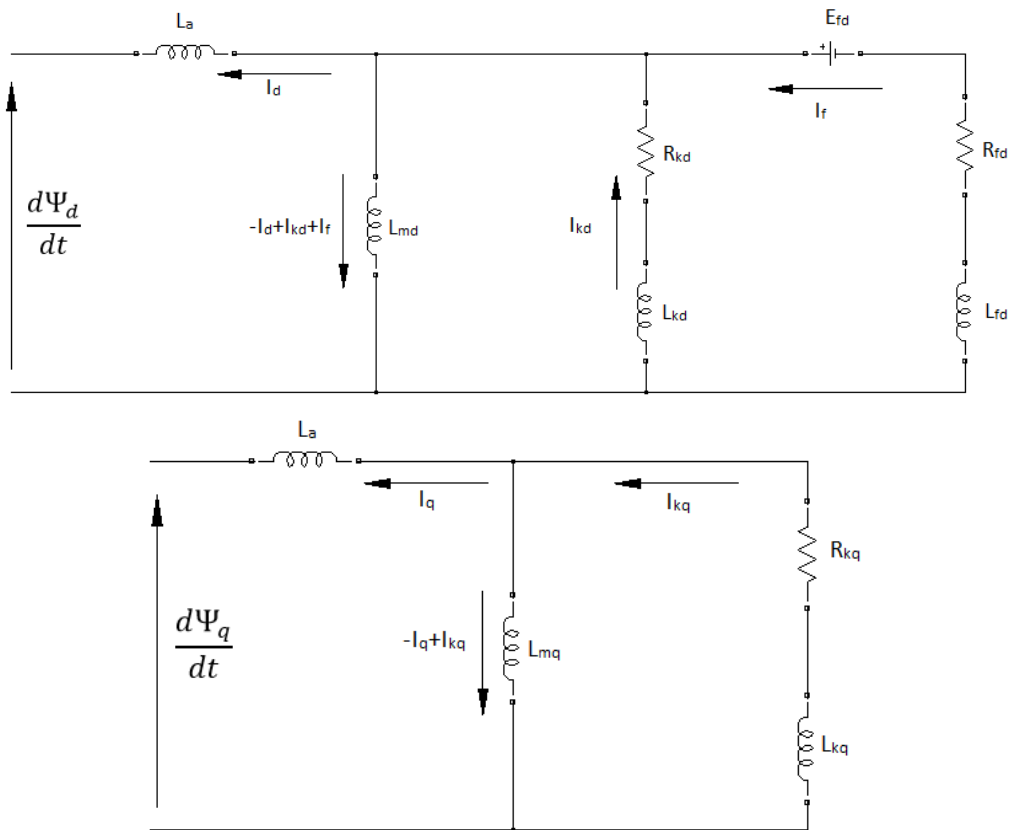


Figura 3.3 - Circuitos equivalentes para o eixo direto e em quadratura da MSFS.

Onde:

$L_a \rightarrow$ Indutância de dispersão do estator

$L_{md}, L_{mq} \rightarrow$ Indutâncias mútuas de eixo direto e quadratura respectivamente.

$L_{fd} \rightarrow$ Indutância de dispersão no enrolamento de campo.

R_{fd} → Resistência do enrolamento de campo.

L_{kd}, L_{kq}

→ Indutâncias de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto e quadratura.

R_{kd}, R_{kq} → Resistências do enrolamento amortecedor de eixo direto e quadratura.

O modelo acima é válido para análises de transitórios e regime permanente, embora em regime permanente possa ser simplificado para impedâncias em série, não sendo objeto de estudo desse trabalho[1].

4. Curto Circuito Trifásico nos terminais de um gerador síncrono

Sabe-se que numa máquina síncrona, mais especificamente durante distúrbios em sua operação, correntes são induzidas em seus circuitos internos afetando o funcionamento da máquina de uma forma geral. No caso do curto circuito, um enrolamento em especial é visualizado, o enrolamento de armadura, pois uma corrente de armadura excessivamente alta pode acarretar em sérios danos a equipamentos e a vida das pessoas.

No presente capítulo serão apresentados os principais parâmetros pertinentes à análise de desempenho de uma máquina síncrona após o curto circuito através da dedução de parâmetros tais como, reatâncias ou indutâncias transitórias e subtransitórias e as constantes de tempo transitórias e subtransitórias. Em seguida esses parâmetros serão inseridos no modelo matemático dado pelas referências [1], [2] e [5].

4.1. *Período Subtransitório*

Quando falamos em período subtransitório estamos nos referindo especificamente aos primeiros ciclos do curto circuito. Nesse tempo as correntes de armadura são muito elevadas e se amortecem rapidamente. Essas variações estão diretamente ligadas às altas variações de corrente nos enrolamentos amortecedores. Essas altas variações de corrente nos amortecedores estão relacionadas ao conceito discutido no item 3.1 no qual as variações nos enlaces de fluxo nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Uma vez que a intensidade da corrente na armadura aumenta, são induzidas correntes nos amortecedores de forma a equilibrar os fluxos concatenados ali. Como há correntes elevadas nos amortecedores eles também funcionam como uma excitação no rotor. Correntes também são induzidas no enrolamento de campo com o mesmo objetivo. Toda essa variação se reflete no enrolamento de armadura durante esse intervalo de tempo que decresce numa taxa que depende dos valores de resistência e indutância vista pelo amortecedor, essa taxa é chamada de constante de tempo subtransitória. Como as correntes de armadura nesse período são muito elevadas podemos concluir que as indutâncias vistas pelo enrolamento de armadura no período subtransitório são reduzidas se comparado com outros períodos.

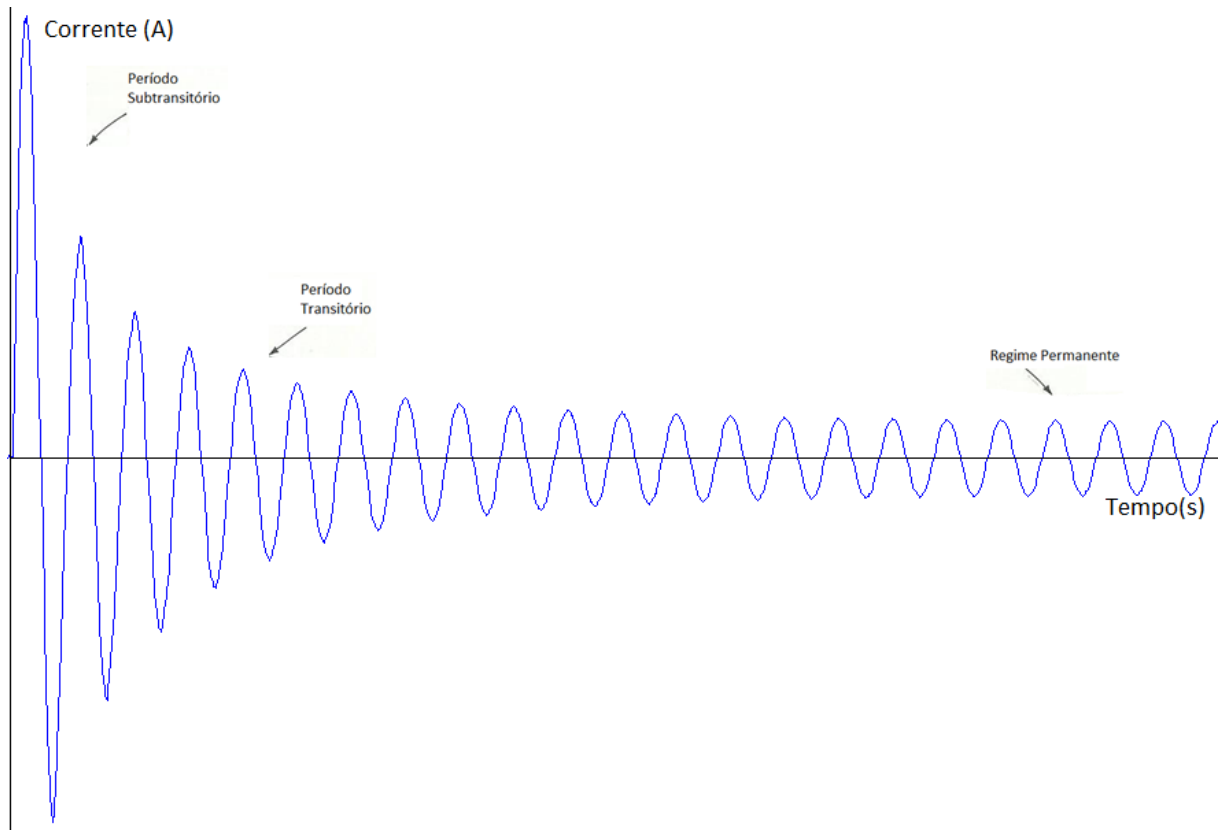


Figura 4.1 - Corrente de curto circuito trifásico em uma fase com componente de corrente contínua nula.

As constantes de tempo subtransitórias são, por definição, o tempo necessário para que as envoltórias subtransitórias decaiam ao ponto onde a diferença entre elas e as envoltórias transitórias sejam de 0,368 [2]. Esse conceito parte do princípio de que o enlace de fluxo em qualquer circuito fechado não pode variar instantaneamente, sendo necessária a utilização de constantes de tempo adequadas ao cálculo. No caso de uma máquina síncrona, que é modelada por um circuito RL, a constante de tempo se baseia na forma L/R vista pelo enrolamento amortecedor durante o período subtransitório.

As constantes de tempo subtransitórias e reatâncias subtransitórias podem ser demonstradas a partir dos circuitos equivalente mostrados no capítulo anterior.

Para o eixo direto:

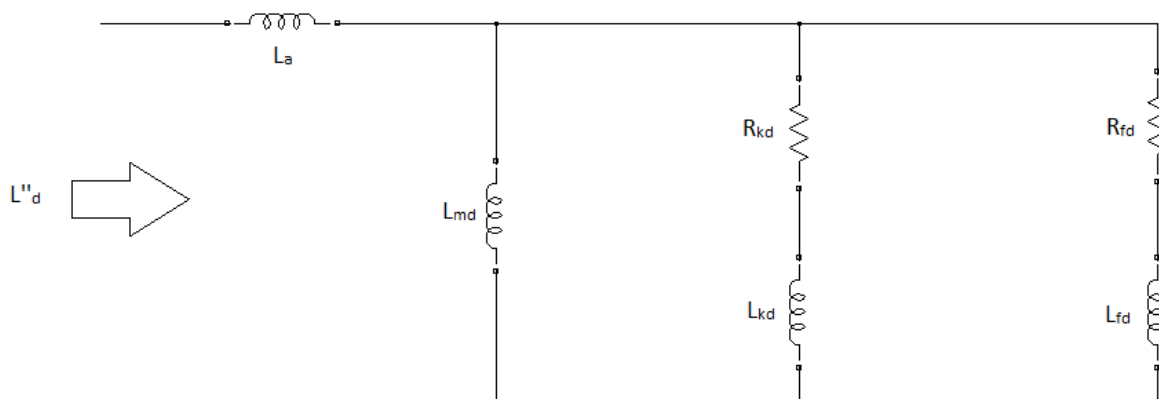


Figura 4.2 - Esquema elétrico para a máquina em regime subtransitório.

Nessa condição de regime subtransitório todas as correntes são diferentes de zero, e por conta disso todo o circuito deve ser considerado. A reatância subtransitória de eixo direto surge a partir da reatância equivalente vista pelos terminais do estator.

$$L''_d = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{kd}} + \frac{1}{L_{fd}}}$$

$$L''_d = L_a + \frac{L_{md}L_{kd}L_{fd}}{L_{md}L_{fd} + L_{kd}L_{fd} + L_{md}L_{kd}} \quad (4.1)$$

Para encontrar a constante de tempo de eixo direto no curto circuito é necessário olhar para o circuito equivalente de eixo direto conforme a figura 4.3 a seguir:

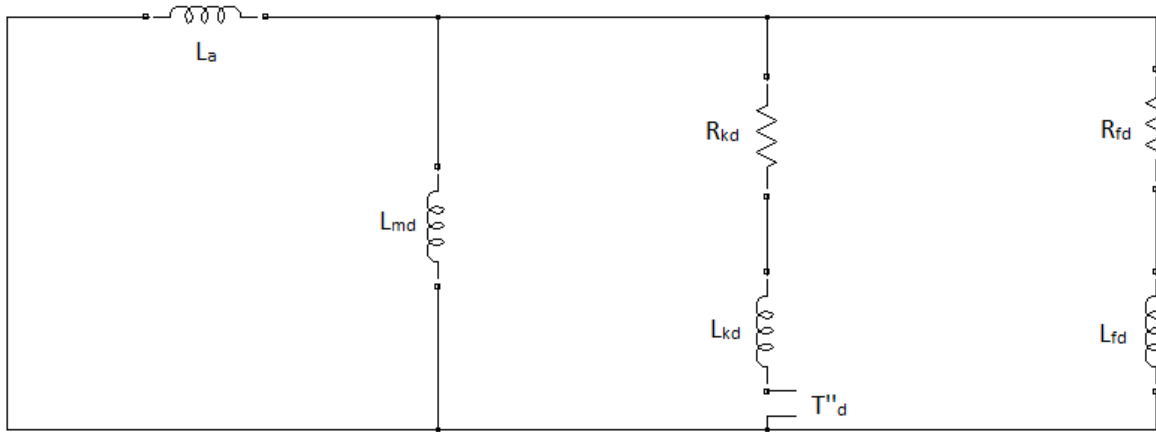


Figura 4.3 - Circuito equivalente para o eixo direto em curto circuito.

Com base nesse circuito:

$$T''_d = \frac{L_{keq}}{R_{kd}} \quad (4.2)$$

Onde L_{keq} é a indutância equivalente vista pelo ramo do enrolamento amortecedor de eixo direto:

$$T''_d = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_a}} \right)$$

$$T''_d = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{kd} + \frac{L_f L_{md} L_a}{L_f L_{md} + L_{md} L_a + L_f L_a} \right) \quad (4.3)$$

Para se encontrar a constante de tempo de eixo direto em circuito aberto:

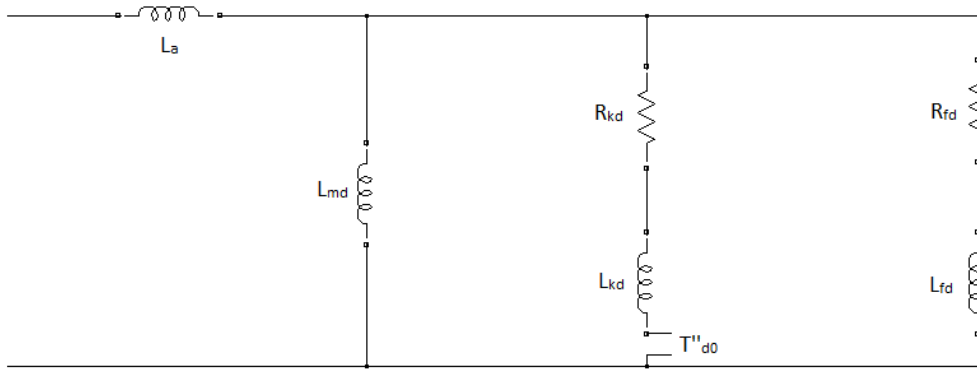


Figura 4.4 - Circuito equivalente para o eixo direto com os terminais em aberto.

$$T''_{d0} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_{md}}} \right)$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{kd} + \frac{L_f L_{md}}{L_f + L_{md}} \right) \quad (4.4)$$

Para o eixo em quadratura:

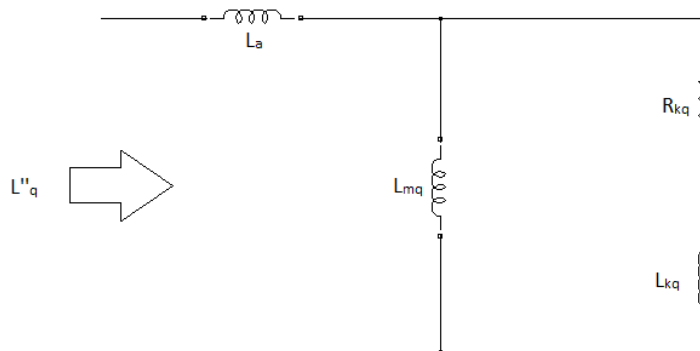


Figura 4.5 - Circuito equivalente para o eixo em quadratura em regime subtransitório.

A partir desse esquema elétrico podemos deduzir a reatância subtransitória do eixo em quadratura vista nos terminais do estator:

$$L''_q = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_{kq}}}$$

$$L''_q = L_a + \frac{L_{mq} L_{kq}}{L_{mq} + L_{kq}} \quad (4.5)$$

Ao se observar o circuito equivalente de eixo em quadratura podemos deduzir a constante de tempo subtransitória em quadratura:

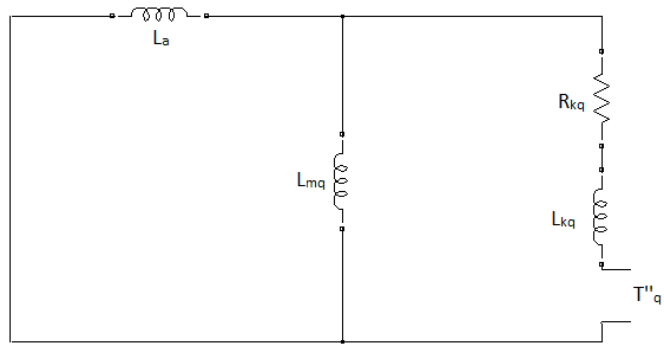


Figura 4.6-Circuito equivalente para o eixo em quadratura em curto circuito

$$T''_q = \frac{L_{kqeq}}{R_{kq}}$$

Onde L_{kqeq} é a indutância vista pelo ramo do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura:

$$T''_q = \frac{1}{R_{kq}} \left(L_{kq} + \frac{1}{\frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_a}} \right)$$

$$T''_q = \frac{1}{R_{kq}} \left(L_{kq} + \frac{L_a L_{mq}}{L_a + L_{mq}} \right) \quad (4.6)$$

A constante de tempo subtransitória para o eixo em quadratura em circuito aberto é deduzida por:

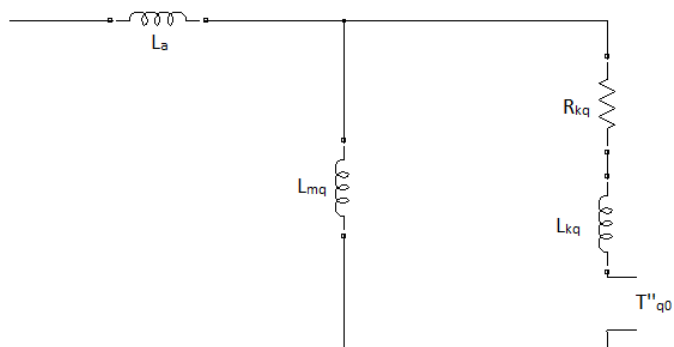


Figura 4.7 - Circuito equivalente para o eixo em quadratura em circuito aberto.

$$T''_{q0} = \frac{1}{R_{kq}} (L_{kq} + L_{mq}) \quad (4.7)$$

4.2. Período Transitório

O período transitório é o período onde já ocorreu uma dissipação das correntes nos amortecedores. A seguir serão definidas as relações para as reatâncias transitórias e constantes de tempo transitórias para curto circuito e circuito aberto.

Para o eixo direto:

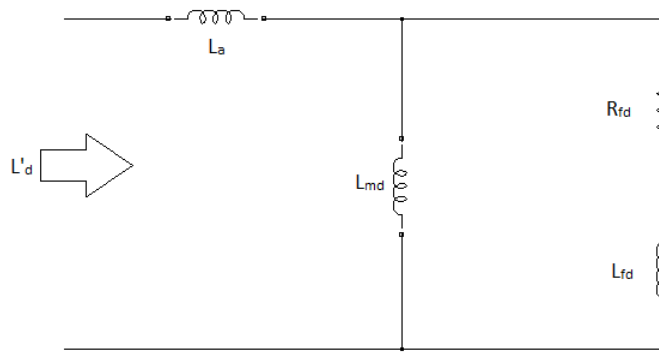


Figura 4.8-Circuito equivalente de eixo direto para o período transitório.

Nesse período de tempo já houve uma atenuação nas correntes nos amortecedores, portanto o ramo do enrolamento amortecedor será desconsiderado no modelo.

$$L'_d = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_{fd}}} \quad (4.8)$$

$$L'_d = L_a + \frac{L_{mq}L_{fd}}{L_{mq} + L_{fd}} \quad (4.9)$$

A constante de tempo transitória em curto circuito pode ser deduzida a partir da análise do circuito equivalente de eixo direto no período transitório ao curto circuitarmos os terminais.

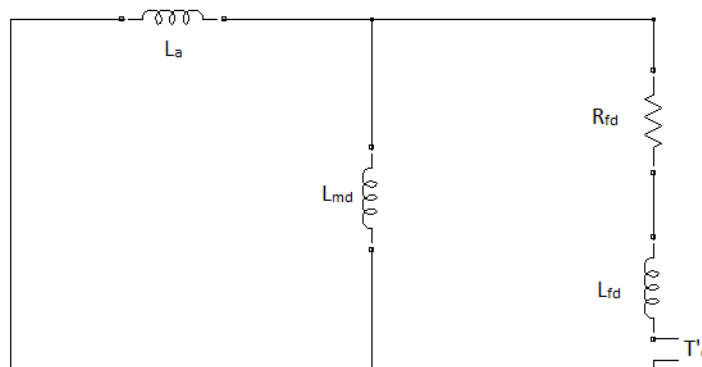


Figura 4.9 - Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito.

$$T'_d = \frac{L_{fd} \text{ deq}}{R_{fd}}$$

Onde L_{fdeq} é a indutância equivalente vista pelo ramo do circuito de campo:

$$T'_d = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_a}} \right)$$

$$T'_d = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{md}L_a}{L_{md} + L_a} \right) \quad (4.10)$$

A constante de tempo transitória em circuito aberto pode ser deduzida a partir da análise do circuito equivalente de eixo direto no período transitório ao mantermos os terminais em circuito aberto.

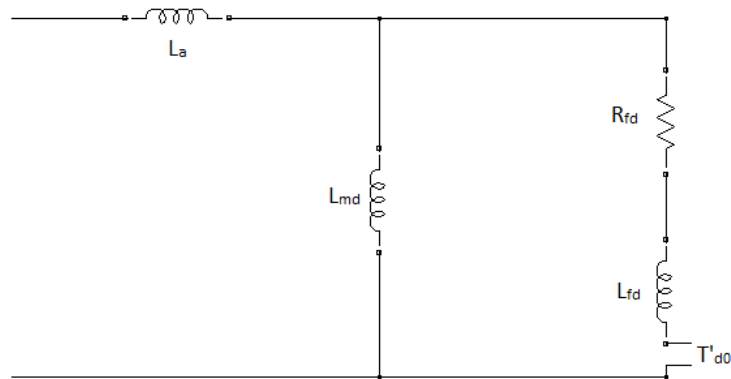


Figura 4.10 - Circuito equivalente para o eixo direto em circuito aberto.

$$T'_{d0} = \frac{L_{fdeq}}{R_{fd}}$$

Onde L_{fdeq} é a indutância equivalente vista pelo ramo do circuito de campo:

$$T'_{d0} = \frac{1}{R_{fd}} (L_{fd} + L_{md}) \quad (4.11)$$

4.3. Regime Permanente

O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo.

Para o eixo direto:

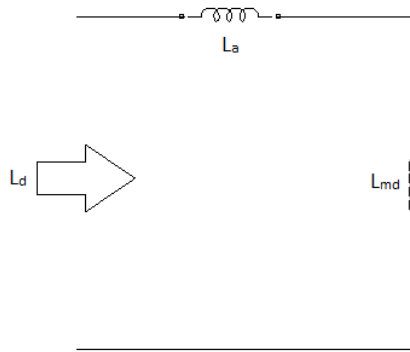


Figura 4.11 - Circuito equivalente de eixo direto em regime permanente.

$$L_d = L_a + L_{md} \quad (4.12)$$

Para o eixo em quadratura:

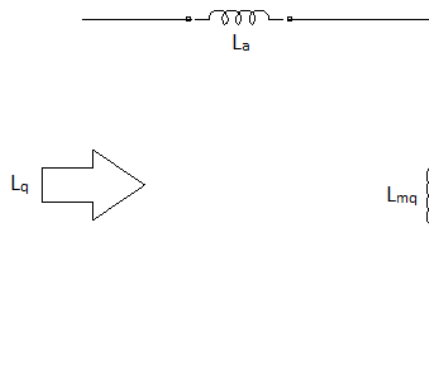


Figura 4.12 - Circuito equivalente de eixo em quadratura em regime permanente.

$$L_q = L_a + L_{mq} \quad (4.13)$$

Esses valores de reatâncias são importantes para a determinação de diversos componentes do sistema, para a determinação da capacidade de interrupção de disjuntores. Exceto quando tem abertura instantânea utiliza-se a reatância subtransitória no estudo, e em estudos de estabilidade aplicam-se as reatâncias transitórias pois seu objetivo é determinar se um defeito acarretará perda de sincronismo do sistema.

Um parâmetro que também é importante em determinados tipos de análise é a componente de corrente contínua (cc) da onda. Ela é uma componente na corrente de estator cujo resultado é uma onda deslocada no eixo principal. Ela também é responsável pelas

oscilações nas correntes de campo, uma vez que a componente cc estabelece um campo no entreferro invariante no espaço e uma vez que o rotor gira em velocidade síncrona, haverá uma indução de corrente de frequência fundamental nos enrolamentos do rotor. Essa componente cc também decai no tempo, sendo essa queda definida pela constante de tempo de armadura T_a que é o tempo necessário para que a componente cc decaia 0,368 de seu valor inicial [2]. Essa constante de tempo é definida a partir da constante de tempo vista pela armadura:

$$T_a = \frac{L''_a}{R_a}$$

Usualmente L''_a é definido como a média aritmética entre as indutâncias subtransitórias, portanto:

$$L''_a = \frac{L''_d + L''_q}{2}$$

Assim:

$$T_a = \frac{1}{R_a} \cdot \frac{L''_d + L''_q}{2} \quad (4.14)$$

Dessa forma estão deduzidos os parâmetros de operação mais importantes na análise de uma máquina síncrona de pólos salientes durante a ocorrência de um curto circuito. Alguns dos parâmetros deduzidos acima também podem ser definidos em ensaios de laboratório, onde a máquina é posta a operar em vazio com tensão de excitação constante e um curto circuito trifásico simétrico é aplicado em seus terminais. Nesse ensaio são observadas as correntes de armadura durante o curto através de oscilogramas. É importante ressaltar que as constantes de tempo deduzidas nesse capítulo somente poderão ser usadas em estudos de curto circuito trifásicos nos terminais da máquina.

4.4. *Equações do curto circuito trifásico simétrico*

O curto circuito simétrico entre fases, também chamado de curto circuito franco, é a modalidade de curto circuito mais rara que pode ocorrer num sistema de potência. Apesar disso sua análise é de extrema importância devido ao fato de ser o defeito mais grave, uma vez que desencadeia os valores mais elevados de correntes de armadura e causa instabilidade no funcionamento da máquina, dessa forma podemos ver que seu estudo é fundamental especialmente no dimensionamento do sistema de proteção, dos equipamentos e materiais, pois se um dispositivo for dimensionado para suportar as correntes provocadas por essa falta então ele certamente suportará qualquer tipo de falta sem maiores danos.

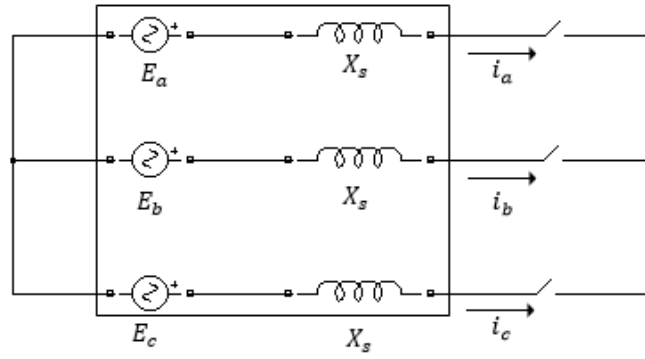


Figura 4.13-Diagrama esquemático do curto circuito trifásico simétrico.

No instante em que o curto circuito é aplicado, as correntes de armadura aumentam drasticamente, e esse aumento vem acompanhado de uma desmagnetização do estator. Porém a partir do princípio descrito no ítem 3.1.1 vemos que o enlace de fluxo não pode variar instantaneamente. Com base nesse princípio e a partir da observação das equações (3.18) e (3.19) vemos que as correntes nos enrolamentos amortecedores e de campo devem aumentar de forma a manter o enlace de fluxo constante naquele momento:

$$\Psi_d^{pu} = -L_d^{pu} i_d^{pu} + L_{afd}^{pu} i_{fd}^{pu} + L_{akd}^{pu} i_{kd}^{pu} \quad (3.33)$$

$$\Psi_q^{pu} = -L_q^{pu} i_q^{pu} + L_{akq}^{pu} i_{kq}^{pu} \quad (3.34)$$

Observamos o mesmo efeito ocorrendo no rotor a partir da observação das equações (3.21) a (3.23). Os enrolamentos precisam “responder” a corrente variante de estator representadas por i_d e i_q com correntes i_{fd} , i_{kd} e i_{kq} para contrabalançar o efeito de desmagnetização.

$$\Psi_{fd}^{pu} = L_{ffd}^{pu} i_{fd}^{pu} + L_{fkd}^{pu} i_{kd}^{pu} - L_{fda}^{pu} i_d^{pu} \quad (3.43)$$

$$\Psi_{kd}^{pu} = L_{kdf}^{pu} i_{fd}^{pu} + L_{kkd}^{pu} i_{kd}^{pu} - L_{kda}^{pu} i_d^{pu} \quad (3.44)$$

$$\Psi_{kq}^{pu} = L_{kkq}^{pu} i_{kq}^{pu} - L_{kqa}^{pu} i_q^{pu} \quad (3.45)$$

Além das suas componentes de corrente alternada (ac), o curto circuito também possui uma componente cc que depende do valor do fluxo enlaçado em cada fase no instante da ocorrência do curto circuito, ou seja depende da posição do rotor no instante da ocorrência do curto já que o fluxo enlaçado por cada fase depende da posição. Por exemplo se o curto circuito ocorrer num instante em que o fluxo enlaçado pela fase a for nulo, então ela não terá nenhuma componente cc, restando apenas a componente ca. Pela figura 4.1 podemos ver perfeitamente a representação desse efeito.

Tendo como ponto de partida as equações (3.15) a (3.19), considerando-se a máquina em vazio e que possui velocidade ω constante depois do curto, podemos definir a componente

ca das correntes de armadura de eixo direto e quadratura na ocorrência de um curto circuito trifásico nos terminais de um gerador por [2]:

$$i_a = \left(\frac{\sqrt{2}E_{af0}}{X_d} + \sqrt{2}E_{af0} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \sqrt{2}E_{af0} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \cos(\omega t + \theta_0) \quad (4.15)$$

Onde

E_{af0} é a tensão eficaz de armadura pré-falta.

θ_0 é a posição do rotor no instante da falta.

A componente cc do defeito, superposta à componente ca decai em função de seu valor inicial e da constante de tempo de armadura.

$$I_{cc} = I_{cc0} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (4.16)$$

Onde:

I_{cc} é a componente cc da corrente de defeito.

I_{cc0} é o valor inicial da componente cc da corrente de defeito.

Dessa forma está concluída a teoria geral da máquina síncrona e seu comportamento na ocorrência de uma falta trifásica simétrica.

5. Programa utilizado

Neste capítulo são apresentados os principais parâmetros e configurações do programa utilizado. Para este projeto foi utilizado o software Maxwell equipado com o pacote RMxprt [8] e [11].

O RMxprt é um pacote de expansão da Ansoft para o software Maxwell cujo principal objetivo é o auxílio na criação de modelos de máquinas rotativas. A partir dele é possível definir parâmetros como formato das ranhuras de rotor e estator, quantidade de voltas do enrolamento de campo, número de polos da máquina, tipo de enrolamento de armadura, quantidade de barras amortecedoras por polo, espessuras do entreferro do rotor e do estator e todos os demais parâmetros pertinentes na criação de um modelo de máquina.

Uma vez definido o modelo utilizado, o RMxprt calcula os parâmetros da máquina, parâmetros como reatâncias transitórias e subtransitórias, reatâncias de sequência, constantes de tempo transitórias e subtransitórias, curvas de magnetização em vazio e em plena carga com fator de potência nulo, curva de potência vs ângulo e etc. Além disso a partir dele é possível criar o modelo da máquina para o Maxwell 2D ou 3D que é o software que executará as simulações de fato e criará os gráficos dos campos através do método dos elementos finitos.

O objetivo desse capítulo é apresentar os principais procedimentos de escolha do modelo. As configurações do programa e os principais parâmetros do modelo utilizado serão descritos de forma breve. A seguir serão demonstrados os parâmetros de simulação da máquina bem como suas devidas justificativas.

5.1. Visão geral do RMxprt:

O RMxprt possui diversos modelos pré montados de máquinas a serem escolhidos, máquina síncrona de rotor liso, máquina síncrona de polos salientes, máquina de indução trifásica, máquina de corrente contínua, máquina síncrona de ímã permanente e etc.

Como a idéia deste trabalho não é fazer um projeto de MSPS foi selecionado um exemplo pré existente no RMxprt a partir do seguinte caminho "File" → "Open examples" → "RMxprt" → "syng3" → "bjs7 – 6 – 1" .

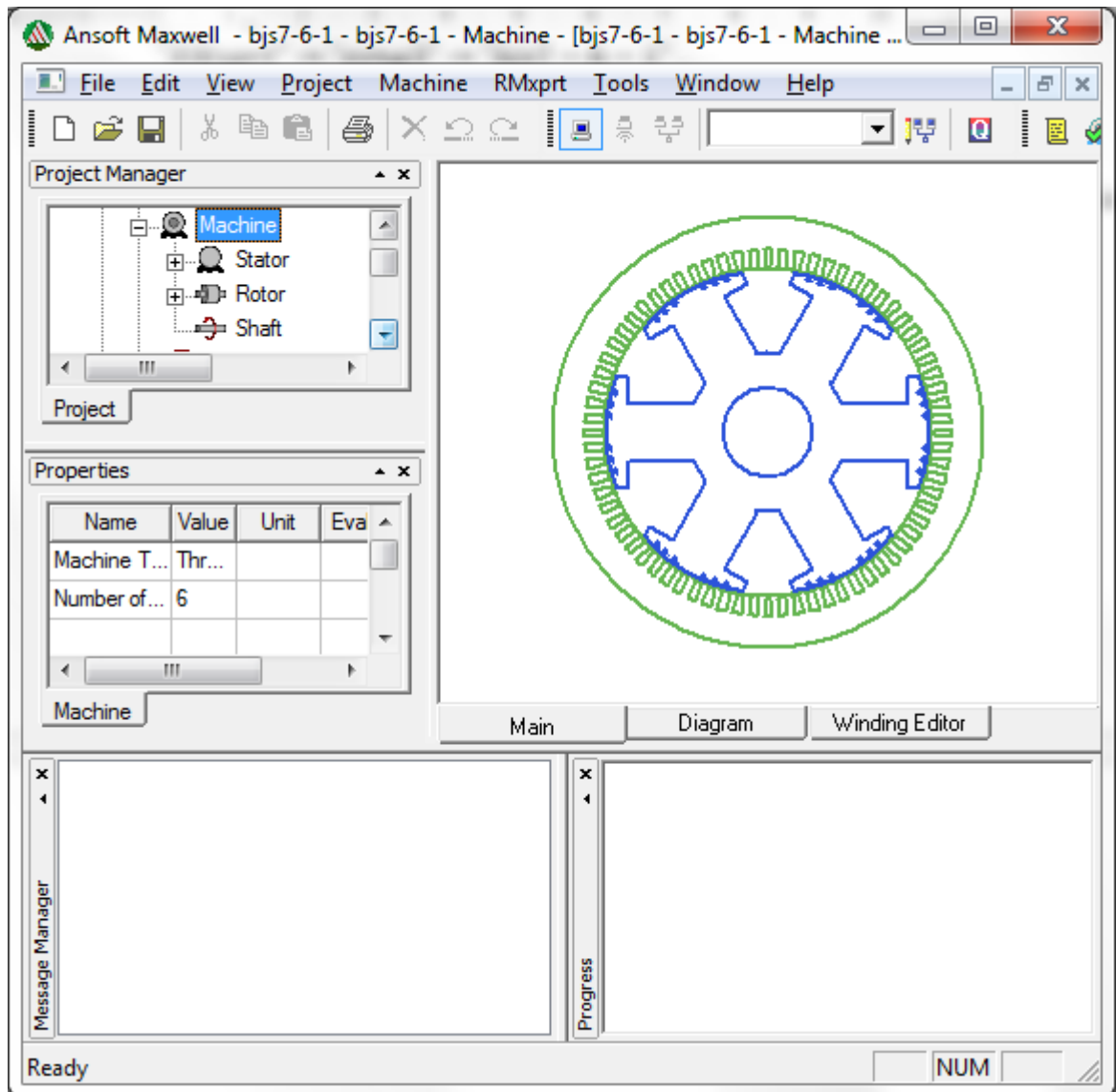


Figura 5.1 - Escolha do exemplo adequado

Uma vez selecionado o exemplo temos um modelo de máquina síncrona de polos salientes com 6 polos.

A partir da aba “Machine” é possível determinar os parâmetros do estator, rotor e eixo. Começando pelo estator é possível definir parâmetros como diâmetro interno e externo, comprimento, fator de empilhamento, quantidade de ranhuras bem como seus formatos e o tipo de ferro.

5.1.1. Parâmetros do estator

Dentro da aba “Stator” ainda é possível abrir o estator em 3 abas: “Slots” que define o formato e as dimensões das ranhuras do estator como largura e profundidade. A aba “Windings” onde é possível definir os principais parâmetros do enrolamento de armadura como quantidade de camadas de condutores, tipo de enrolamento, quantidade de ramos, diâmetro do condutor e etc. A aba “Vents” define as dimensões da ventilação da máquina.

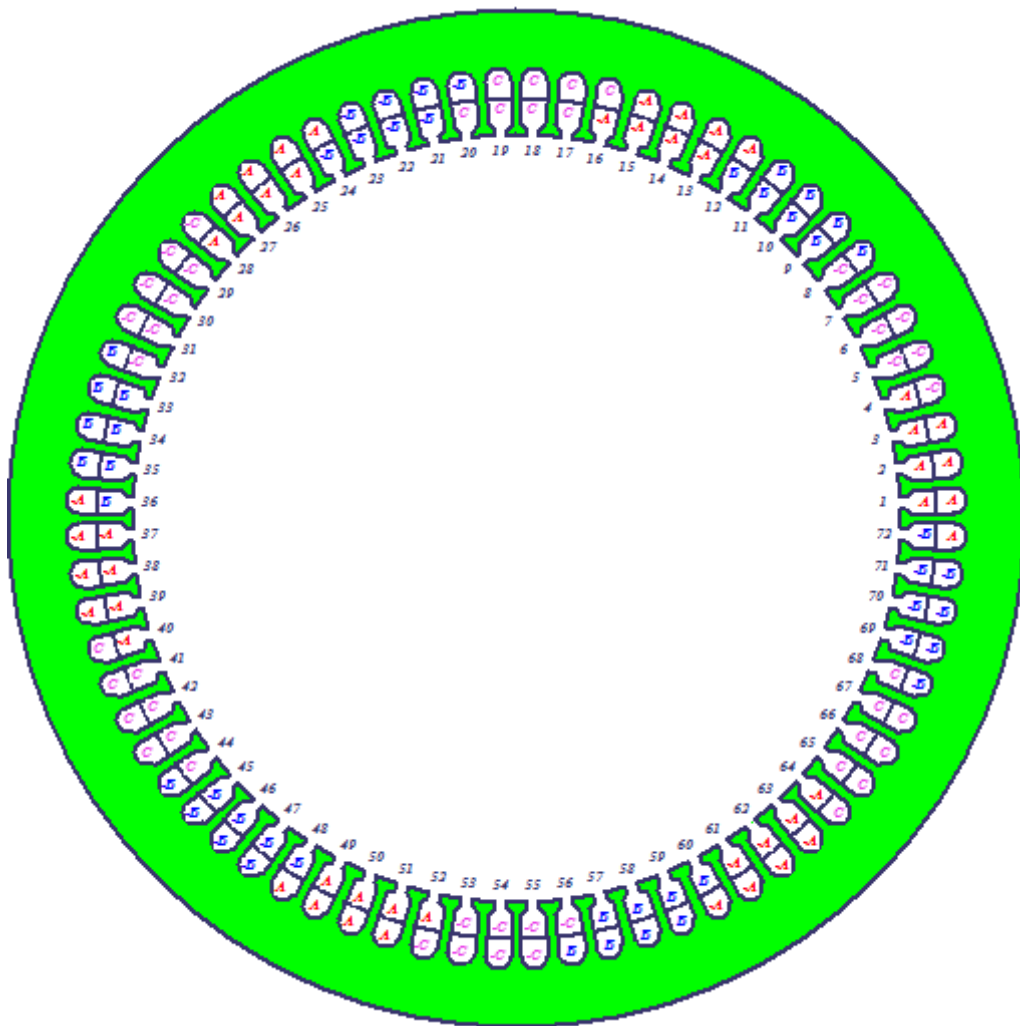


Figura 5.2 - Configuração dos enrolamentos de armadura do modelo escolhido.

5.1.2. Parâmetros do rotor

Dentro da aba “Rotor” são definidos os parâmetros pertinentes ao rotor da máquina, como dimensões, tipo de ferro e etc. Ao abrirmos a aba “Rotor” temos mais duas opções que são as abas “Winding” e “Damper”, respectivamente as configurações do enrolamento de campo e as configurações do enrolamento amortecedor. Para o enrolamento de campo é possível definir o tipo de enrolamento, dimensões dos condutores, quantidade de condutores por polo e etc. No enrolamento amortecedor é possível definir o tipo de ranhura bem como suas dimensões, o tipo de ferro, e a forma com que as barras são curto circuitadas nas extremidades. Através do anel condutor, também é possível definir o tipo de material dos anéis condutores. Existe ainda a aba “Shaft” onde é possível determinar se o material do eixo é um material magnético ou não.

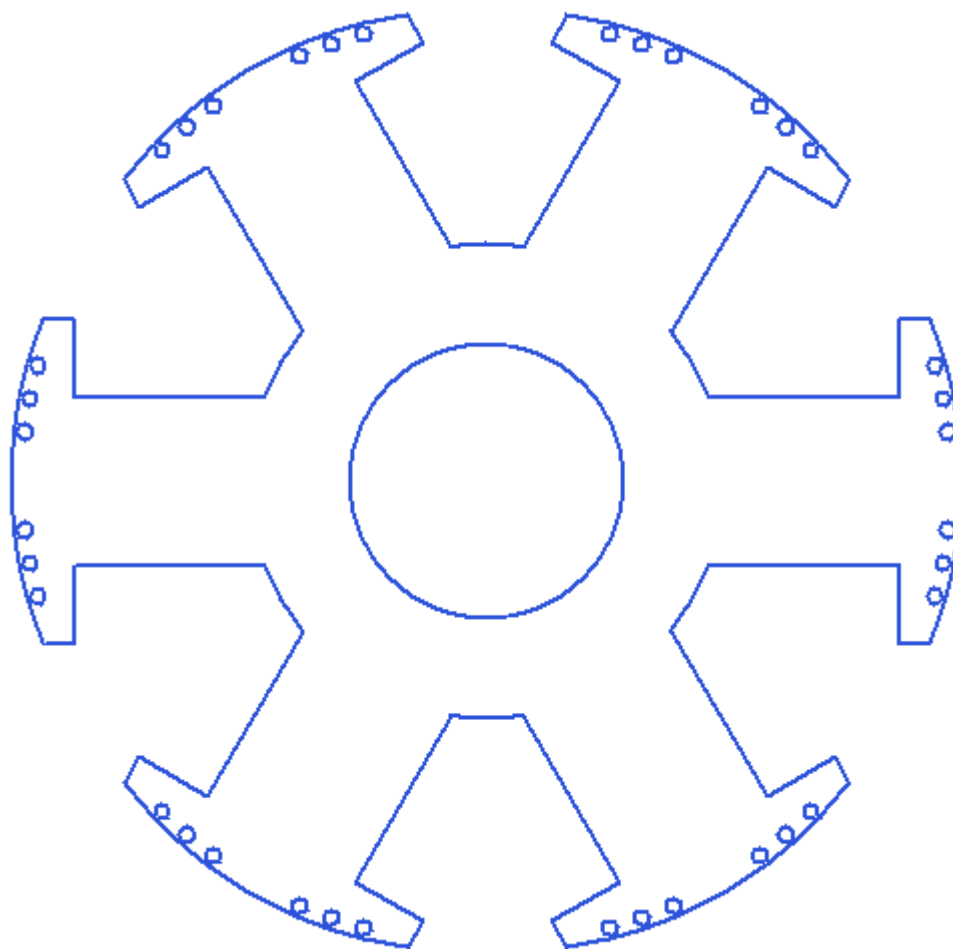


Figura 5.3-Configuração do rotor escolhido.

Todos esses parâmetros descritos acima são parâmetros construtivos da máquina e dessa forma não faz sentido alterá-los uma vez que a idéia deste trabalho é a verificação de um modelo sob diferentes condições de operação. No caso de um projeto de máquina, onde a idéia seria, por exemplo, melhorar a resposta da máquina na ocorrência de um defeito, faria sentido editar os parâmetros construtivos após um estudo específico.

5.1.3. Parâmetros de operação

Uma vez definidos os parâmetros construtivos, é necessário definir os parâmetros de operação da máquina. Para isso é necessário utilizar a aba “Analysis” que é paralela à aba “Machine”. Ao abrirmos essa aba iremos visualizar os setups de análise para a máquina. Nesse caso foi utilizado apenas o “Setup1” e foram escolhidas as seguintes condições de operação mostrada na figura 5.4:

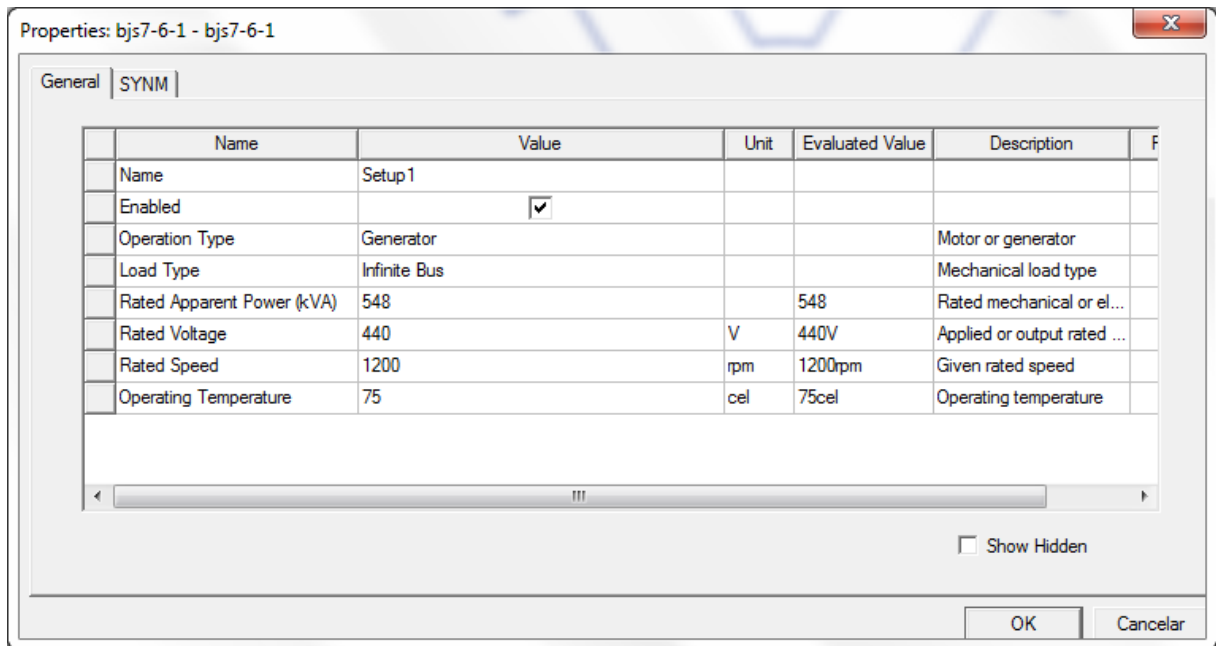


Figura 5.4-Condições de operação, aba “General”.

A maioria dos parâmetros foi mantida no default do programa na aba “General”, como “Load Type” pois a idéia do estudo é que haja imposição de tensão nos terminais do gerador, condição típica de uma barra infinita, “Operating Temperature” e “Rated Apparent Power”. O parâmetro “Rated Voltage” foi alterado de 400V para 440V afim de ficar o mais parecido com a faixa de tensão desse tipo de gerador encontrado aqui no Brasil. Nessa faixa de potência os geradores costumam trabalhar nas faixas de tensão entre 480V e 440V na tensão de linha. O parâmetro “Rated Speed” também foi alterado de 1000 rpm para 1200 rpm, a justificativa está na análise da equação (2.1):

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

$$f = \frac{n \cdot p}{120} = \frac{1000 \cdot 6}{120} = 50 \text{ Hz}$$

Com isso concluímos que a velocidade de 1000 rpm é para uma máquina operando numa rede cuja frequência é de 50 Hz. Como a frequência da rede do Brasil é de 60 Hz a velocidade foi definida a partir da análise da mesma equação:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

Dessa forma está justificada a alteração do valor de velocidade nominal do gerador.

Na aba “SYNM” são definidos parâmetros como fator de potência, rendimento, tipo de operação, corrente nominal de operação e etc. Todos esses parâmetros foram mantidos no default do programa.

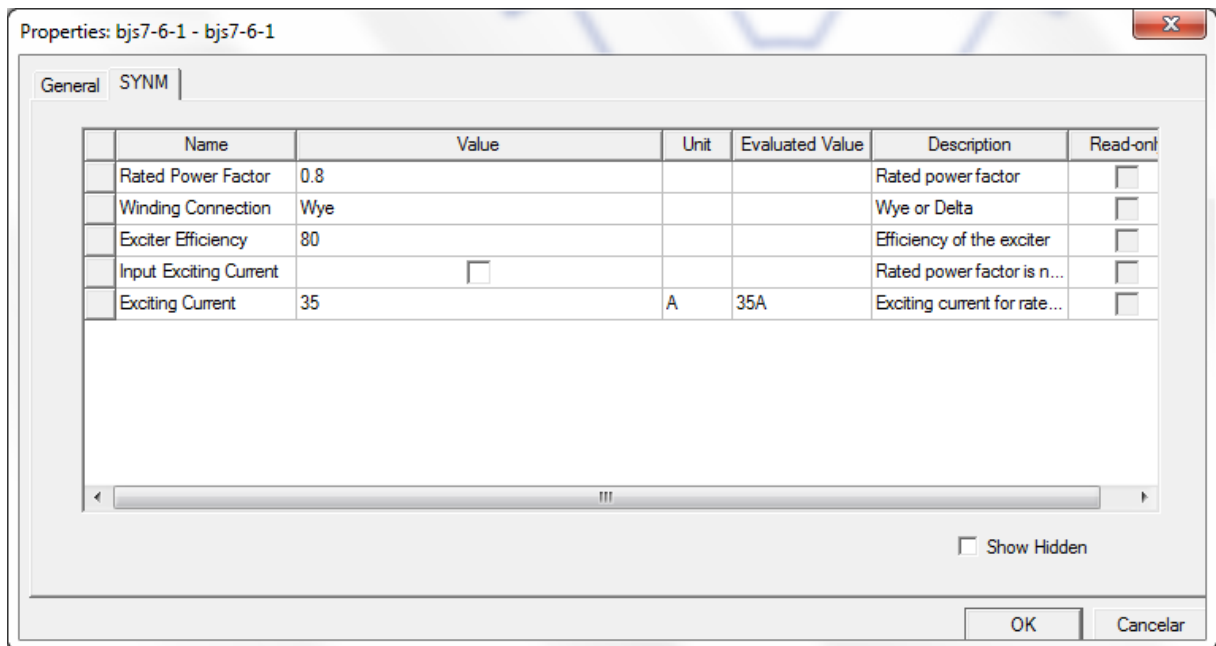


Figura 5.5 - Condições de operação, aba “SYNM”.

Uma vez que o modelo está definido, antes de criar o modelo da máquina no Maxwell 2D é necessário que seja executada a análise pelo RMXprt. Nessa análise o programa faz o cálculo dos parâmetros dessa máquina. Os parâmetros podem ser vistos na barra de ferramentas nas opções “Solution Data” e “Curves”.

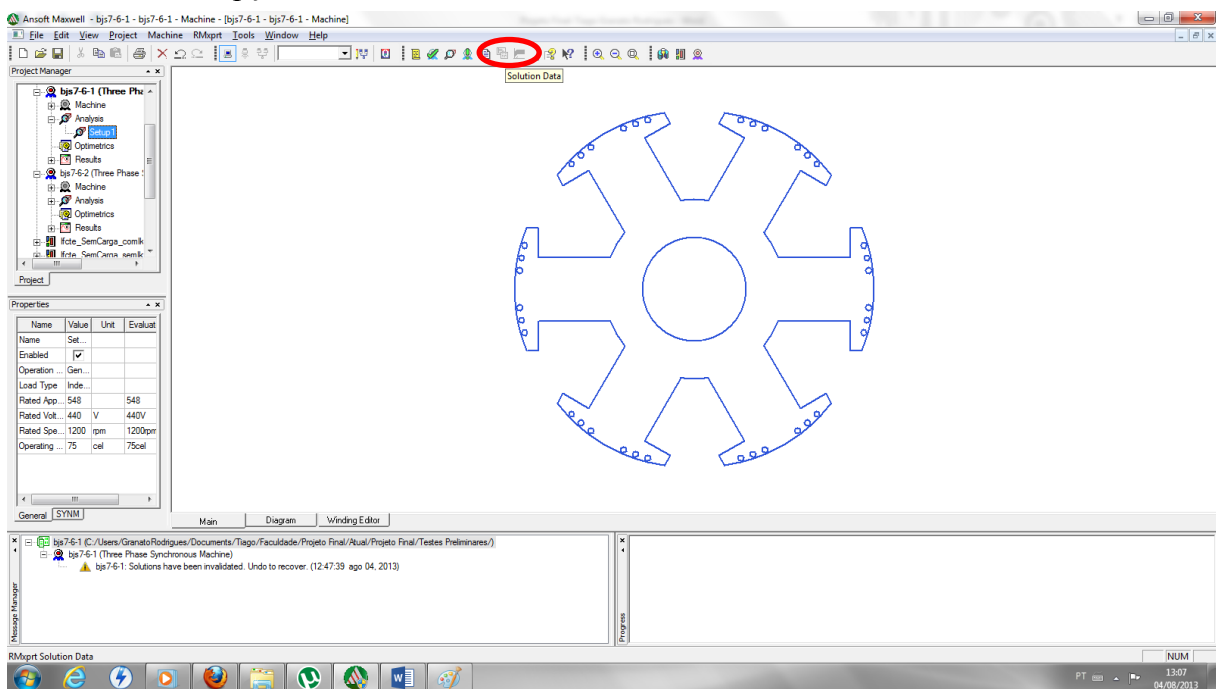


Figura 5.6 - Dados do modelo definido.

O ítem “Solution Data” fornece os principais parâmetros da máquina como as reatâncias síncronas, transitórias, subtransitórias e de sequência, e o ítem “Curves” fornece as principais curvas, como a curva de magnetização e a curva de potência vs ângulo, entre outras.

Uma vez que a análise de RMxprt é feita, também passa a ser possível exportar o modelo para um modelo de Maxwell 2D.

5.2. Visão geral do Maxwell 2D

O Maxwell 2D é o programa que efetivamente realiza as simulações e os mapeamentos dos campos magnéticos e elétricos baseado no método dos elementos finitos. Esse programa é utilizado não apenas para análise de motores, como também para transformadores ou qualquer outro dispositivo eletromagnético ou eletromecânico.

Uma vez que o modelo é exportado através do RMxprt, foi optado por manter a maioria das configurações padrão, tais como quadrantes demonstrados, áreas definidas para as malhas do método dos elementos finitos e etc. Foram alterados apenas os parâmetros de operação, como excitação, resistências dos enrolamentos e etc.

5.2.1. Configuração mecânica

As configurações mecânicas do modelo podem ser definidas na aba “Model”. Este possui um subitem chamado “MotionSetup” que por sua vez determina parâmetros como tipo de movimento e eixo de rotação na aba “Type”, posição inicial do rotor na aba “Data”, e na aba “Mechanical” são definidas a velocidade inicial do rotor, momento de inércia, amortecimento mecânico e torque de carga. Também é possível que seja escolhida a opção de desprezar os transitórios mecânicos, colocando a máquina a girar em velocidade constante pré definida pelo usuário.

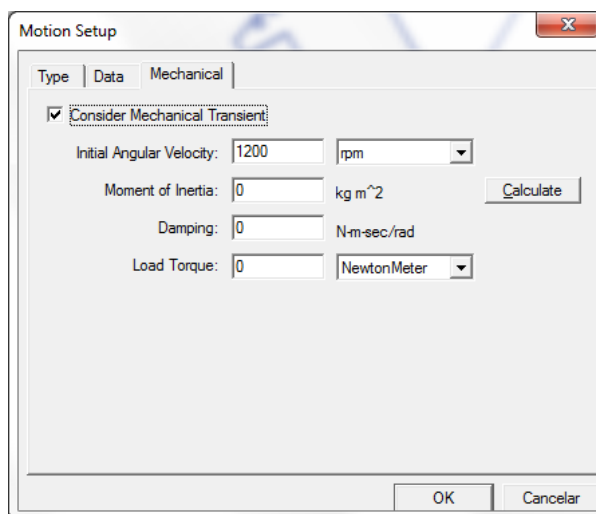


Figura 5.7-Aba “Motion Setup”

5.2.2. Configuração de excitação:

Nessa aba são definidas as configurações dos enrolamentos do motor, quais condutores fazem parte de cada uma das fases no enrolamento de armadura bem como seu tipo de excitação. Os mesmos parâmetros podem ser definidos para os enrolamentos de campo e para as barras amortecedoras.

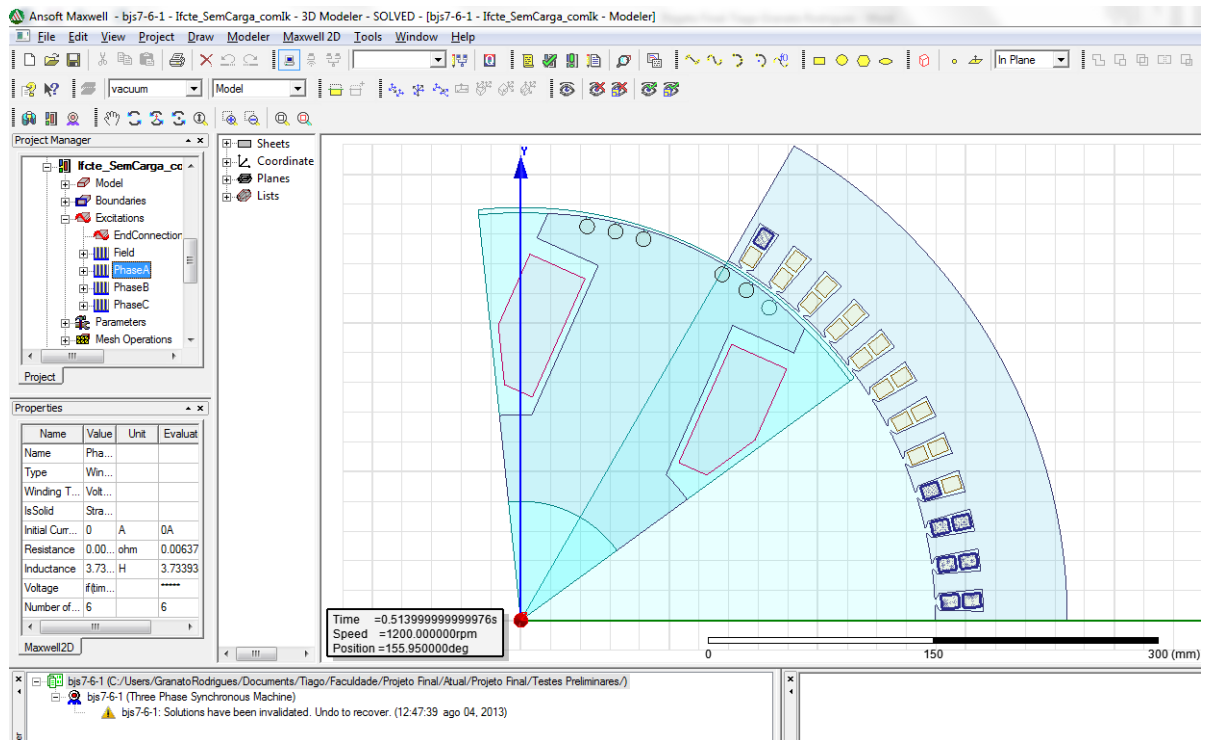


Figura 5.8 - Ramo de excitação.

Na figura 5.8 está selecionada a fase A mas da mesma forma podemos selecionar qualquer um dos condutores e o Maxwell irá frisá-lo no desenho. Nos subitens do ramo “Excitations” temos “Phase A”, “Phase B”, e “Phase C” representando as 3 fases do enrolamento de armadura, o subitem “Field” é o enrolamento de campo do rotor e o “EndConnection1” representa o anel condutor nas extremidades das barras amortecedoras.

Ao dar um duplo click em qualquer um dos enrolamentos, abrirá a seguinte janela:

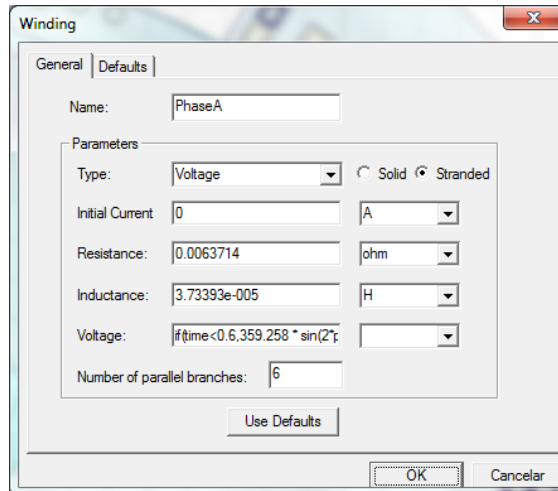


Figura 5.9-Opções do ramo "Excitations".

O parâmetro "Type" é o tipo de excitação desse enrolamento. Ele possui três opções: "Voltage", "Current" e "External". Com a opção "Current" selecionada teremos imposição de corrente nesse enrolamento. Com a opção "Voltage" selecionada temos imposição de tensão. Nesse caso em particular é necessário que sejam definidos os valores de resistência e de indutância no enrolamento. E quando selecionamos a opção "External" o Maxwell buscará a solução em um circuito externo que pode ser montado no próprio editor de circuitos do Maxwell ou importado do Simplorer, que é um outro software que faz interface com o Maxwell.

Ao dar um duplo click no ramo "EndConnections1" não há opção de excitação, devido ao fato de ser o condutor curto circuitado. Por conta disso não há excitação no mesmo. É possível apenas setar os valores de resistência e indutância no anel, porém ao criar o modelo o Maxwell já define valores para ele em função do material escolhido no RMXprt.

Ao dar um click com o botão direito em "Excitations" devemos selecionar a opção "Set Eddy Effects". Quando essa opção está selecionada para todos os enrolamentos o Maxwell considerará o efeito das correntes parasitas durante o cálculo, deixando a análise mais real.

5.2.3. Configuração de análise:

O Maxwell 2D possui uma aba "Analysis" que determina os parâmetros de análise do modelo.

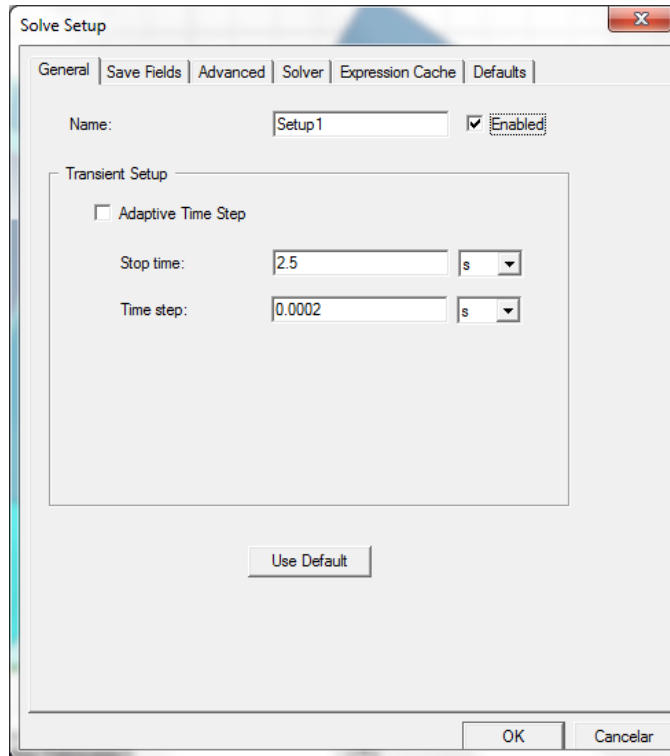


Figura 5.10 - Configurações de análise, aba "General".

Nessa janela são definidos o tempo de simulação e o passo de simulação. Existe a possibilidade de se selecionar a opção de passo de tempo adaptativo para reduzir o tempo de simulação, porém nessa opção se perde na qualidade da onda. Para todas as simulações executadas nesse trabalho foi escolhido um passo de tempo de 200 micro segundos.

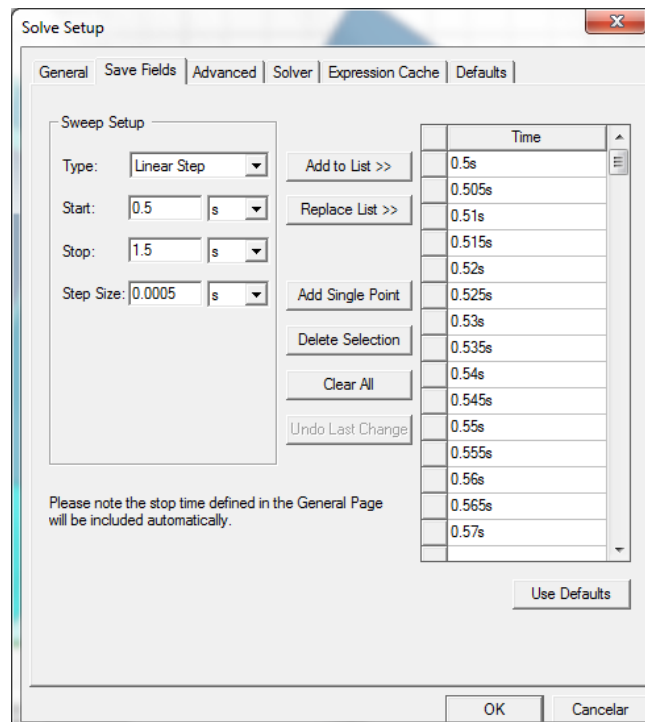


Figura 5.11 - Configuração de análise, aba "Save Fields".

Nessa aba é onde é definido o intervalo de tempo e o passo de tempo para o qual serão salvos os mapeamentos de campo e linhas de fluxo. Para todas as simulações executadas

nesse trabalho optou-se por salvar os campos a partir de 100 ms antes da ocorrência do curto até o regime permanente e para os passos de integração optou-se por um passo de 500 micro segundos.

5.2.4. Configuração de resultados

Para a plotagem dos resultados foram utilizadas duas modalidades de resultado, a primeira está localizada na aba “Results”. Ao dar um click com o botão direito na aba, selecionar a opção “Create transient Report”, e selecionar a opção “Rectangular Plot”, abrimos o seguinte menu:

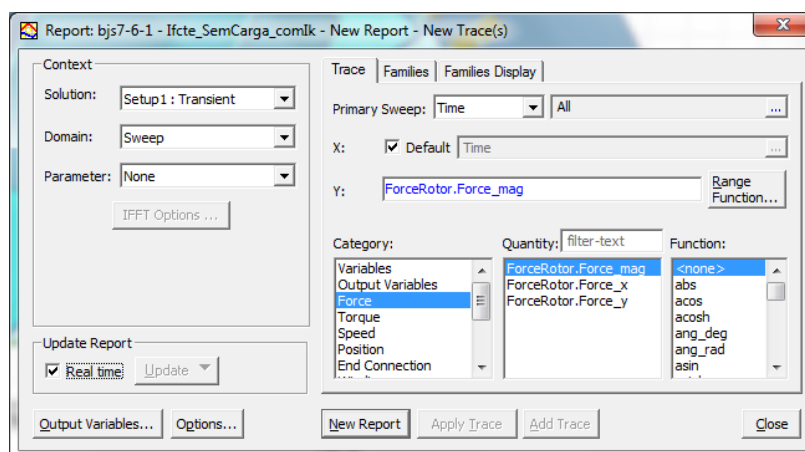


Figura 5.12 - Configuração de resultados.

O gráfico retangular trabalha com os eixos x e y. O que deve ser feito é selecionar as grandezas a serem observadas e colocá-las em “Y:” e a escolher a grandeza em “X:” o default do programa é deixar a grandeza no eixo x como o tempo, mas pode ser alterada para outra qualquer, por exemplo, velocidade. Para esse estudo os seguintes gráficos foram criados: “Corrente de Armadura vs Tempo”; “Corrente de Campo vs Tempo”; “Corrente nos Amortecedores vs Tempo”.

A outra modalidade de resultados se encontra na aba “fields overlays” e para utilizarmos essa aba primeiramente é necessário selecionar o componente onde se deseja visualizar o campo, em seguida dar um click com o botão direito do mouse sobre a aba, selecionar a opção “Fields”, em seguida escolher o tipo de gráfico que se deseja plotar. Existem 4 opções, o Maxwell faz a distribuição espacial das linhas de fluxo magnético, intensidade de campo magnético, densidade de campo magnético e densidade de corrente elétrica, representados respectivamente pelas letras “A”, “H”, “B” e “J”. Em todas as opções há a possibilidade de plotar gráficos de magnitude ou de vetor. Na plotagem de vetor a representação é por setas indicando a direção e o sentido da grandeza naquele ponto.

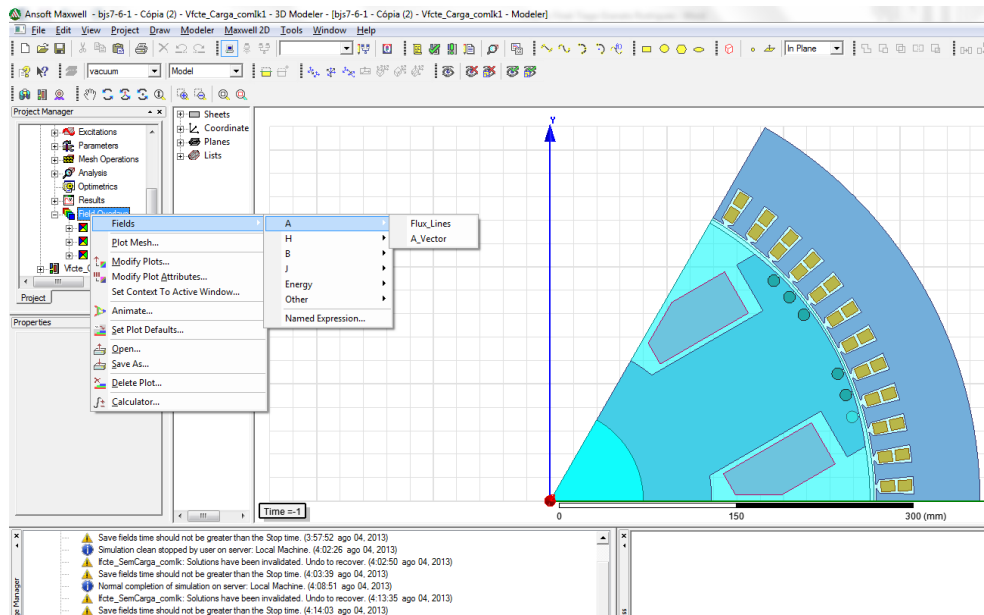


Figura 5.13 - Seleção dos campos a serem escolhidos.

Para esse estudo foram plotados os seguintes campos: magnitude das linhas de fluxo no rotor e estator; magnitude da densidade de campo magnético no rotor, estator e entreferro; correntes induzidas nas barras amortecedoras.

Todos os demais parâmetros foram mantidos no default do programa:

- O parâmetro “Boundaries” define as condições de fronteira da máquina a partir de 3 vetores, um “vector potential” que é a referência de potencial que fica localizado na borda externa do estator, e dois vetores chamados de “Master” e “Slave” que garantem a periodicidade da fração de máquina representada.
- O parâmetro “Mesh Operations” define as malhas de cálculo utilizadas pelo MEF.
- O parâmetro “Optimetrics” permite que sejam feitas variações na geometria do sistema afim de se fazer comparações.

Com isso estão descritos as principais parâmetros de configuração do programa utilizado.

6. Simulações e Resultados

O presente capítulo visa a apresentação das simulações selecionadas com os principais parâmetros selecionados bem como suas justificativas. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos e suas devidas análises baseadas na teoria proposta nos capítulos de 3 a 5.

Primeiramente será selecionado um gerador com condição de operação em vazio e um curto circuito trifásico simétrico será imposto em seus terminais de armadura. Após analisados todos os efeitos pertinentes para a mesma condição de operação serão removidas as barras amortecedoras e em seguida os resultados serão comparados a fim de se observar as diferenças entre os efeitos observados. O mesmo procedimento será adotado para o mesmo gerador sob o ponto de operação com carga nominal.

A seguir são listados os valores nominais e de base para o gerador escolhido:

$$S_{3\phi} = 548 \text{ kVA}$$

$$V_{ff-rms} = 440 \text{ V}$$

$$I_{a-rms} = \frac{548 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 440} = 719,06 \text{ A}$$

$$I_f = 35 \text{ A}$$

$$f_{base} = 60 \text{ Hz} \rightarrow \omega_{base} = 2\pi f_{base} = 376,99 \text{ rad/s}$$

$$n_s = \frac{120 \cdot f_{base}}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm} \rightarrow \omega_s = 125,66 \text{ rad/s}$$

$$V_{base} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254,03 \text{ V}$$

$$I_{base} = 719,06 \text{ A}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{254,03}{719,06} = 0,353286 \Omega$$

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{\omega_{base}} = \frac{Z_{base}}{2\pi \cdot f_{base}} = \frac{0,353286}{2\pi \cdot 60} = 0,93712 \text{ mH}$$

6.1. Gerador em Vazio com enrolamento amortecedor

6.1.1. Simulação:

A primeira condição a ser representada é a condição de gerador em vazio com as barras amortecedoras. Para alcançar o ponto de operação para a máquina em vazio primeiramente foi necessário obter a curva de magnetização em vazio. Essa curva pode ser obtida a partir do modo RMXprt na aba “Results”. Foi criado um gráfico retangular onde a corrente de excitação foi posta no eixo x e a tensão de armadura em vazio no eixo y, conforme figura abaixo:

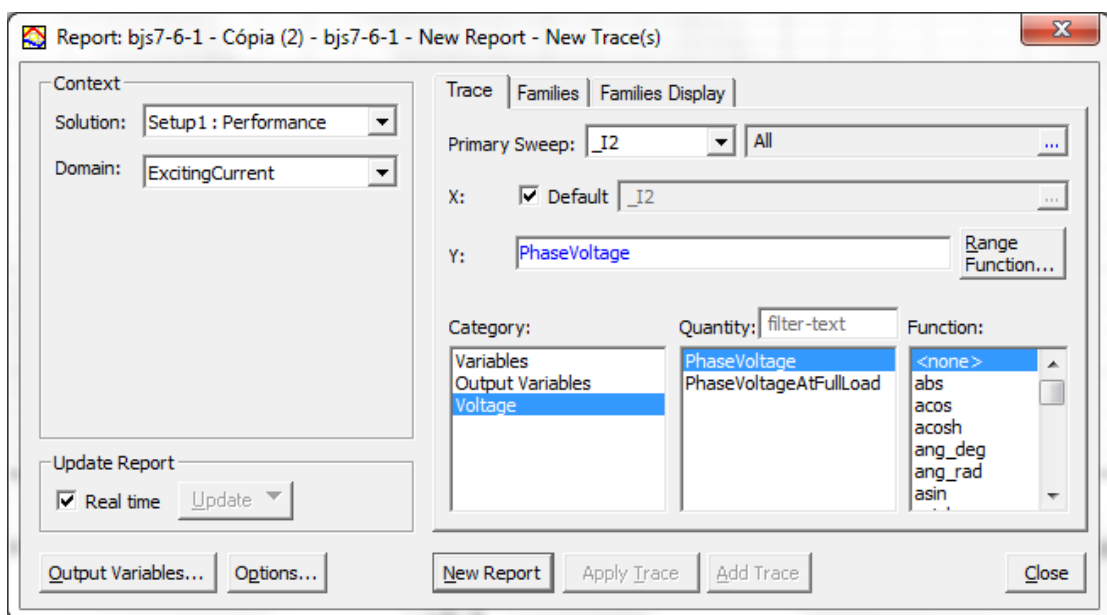


Figura 6.1-Configuração do gráfico para a curva de magnetização da máquina.

Após ser feita análise do modelo no RMXprt foi obtida a seguinte curva de magnetização da figura 6.2:

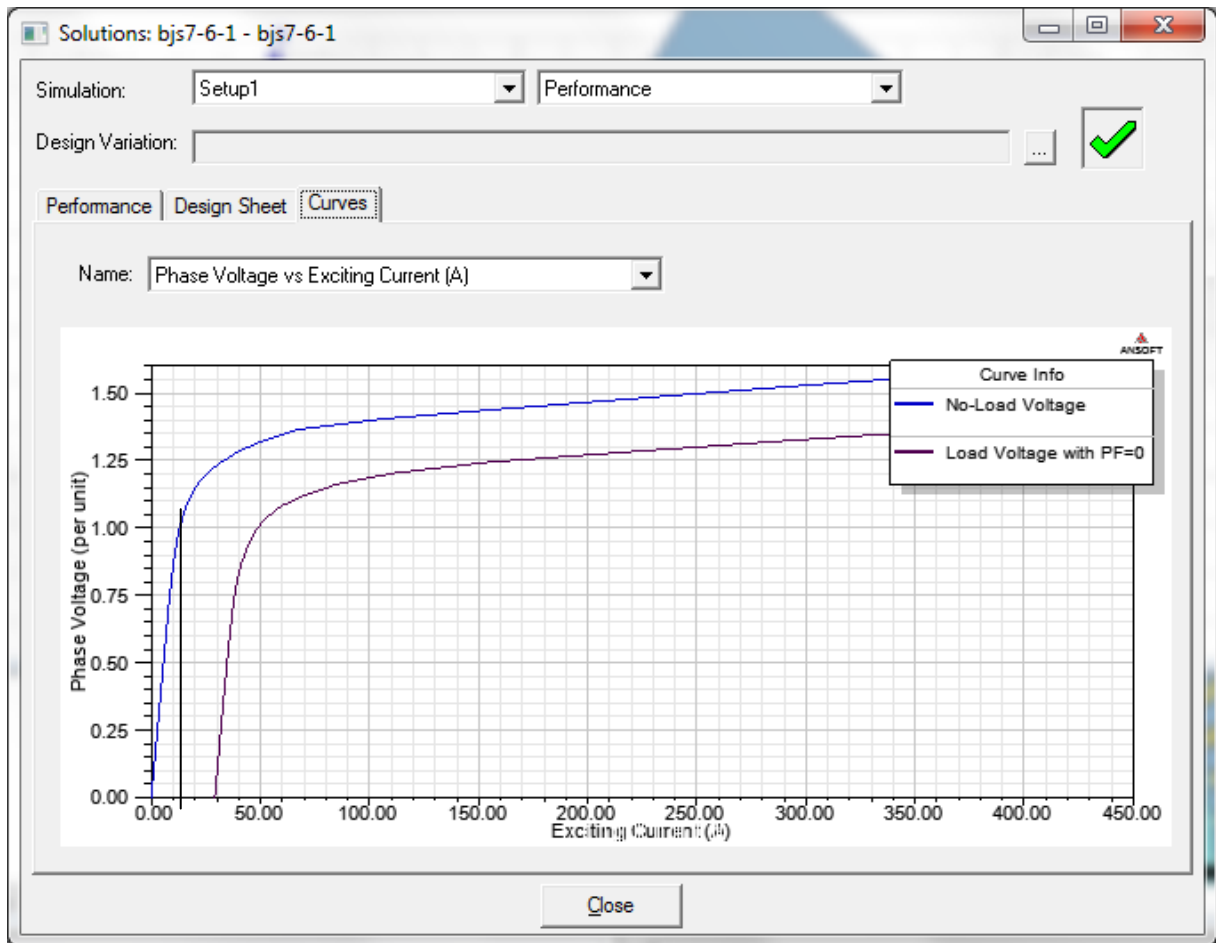


Figura 6.2 - Curva de magnetização em vazio da máquina.

Com uma visualização mais detalhada da curva de magnetização é possível observar que a corrente de excitação necessária para se obter a condição em vazio sob tensão de terminal de 1 pu é $I_{f0} = 13,174 \text{ A}$.

Obtido o valor de corrente de excitação em vazio, é necessário fazer a modelagem do enrolamento de campo do gerador. Pelo default do programa o enrolamento de campo é configurado para corrente constante. Como essa situação de corrente constante não é uma condição real de operação, então o enrolamento de excitação deve ser modelado como uma tensão constante em série com a impedância de campo. O valor da tensão de campo foi definido como $V_{fcc} = 125 \text{ V}$. Esse valor de tensão foi escolhido baseado numa consulta efetuada em 05/08/13 à referência [11]. Pela lei de Ohm foi calculado o valor da resistência do enrolamento de campo a fim de se obter a corrente de campo de 13,174 A.

$$R_f = \frac{V_{cc}}{I_{f0}} = \frac{125}{13,174} = 9,5 \Omega$$

O enrolamento de campo não é configurado com um valor de indutância de dispersão, pois como dito no parágrafo anterior, o enrolamento de campo é modelado como uma corrente constante e por conta disso não possui valores de indutância pré definidos. Por conta disso foi necessário buscar um valor para essa indutância, que foi encontrado num exemplo na

referência [1] capítulo 5, página 171 onde $L_{fpu} = 0,13 pu$, e dessa forma a indutância foi modelada por:

$$L_f = L_{fpu} \times L_{base} = 0,13 \times 0,93712 mH = 0,12 mH$$

Com isso obteve-se a modelagem do enrolamento de campo.

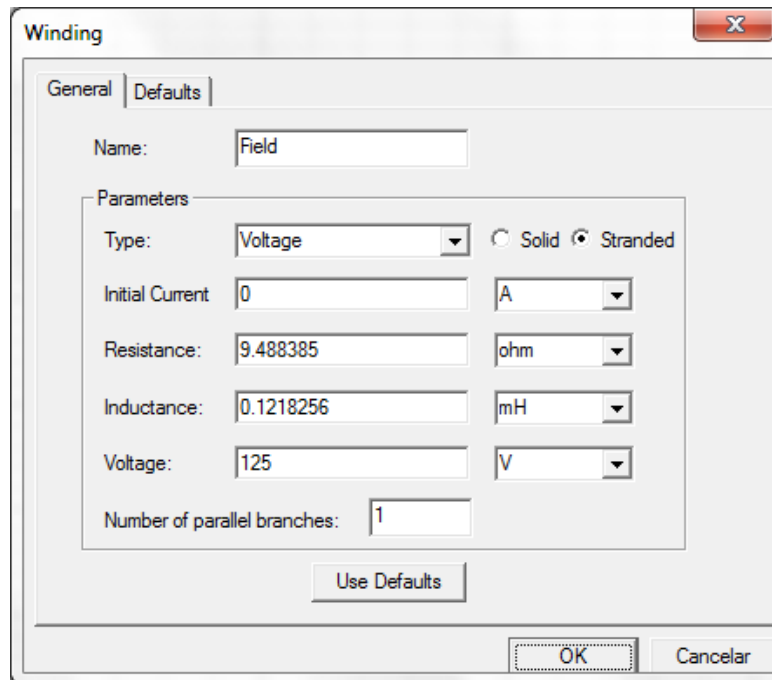


Figura 6.3 - Configuração do enrolamento de campo.

Para esse estudo foram desconsiderados os transitórios mecânicos da máquina, e dessa forma ela foi configurada com velocidade constante na velocidade síncrona. Por conta disso é preciso ajustar o ângulo de carga para obtermos a condição em vazio, e a corrente de armadura é determinada pela seguinte relação:

$$I_a = \frac{E \cos \delta^\circ - V \cos 0^\circ}{Z \cos \phi_z} \quad (6.1)$$

Quando os transtórios mecânicos são considerados, o ângulo de carga se ajusta em função do torque de carga (“load torque”). Para o caso de velocidade constante é necessário que o ângulo de carga da máquina seja ajustado manualmente através do ângulo inicial do rotor, e nesse caso o ângulo pode ser ajustado através da aba “Data” do menu “Motion Setup”. Por tentativa e erro, o ângulo inicial de 55° foi definido como ângulo de carga em vazio por apresentar uma corrente de armadura desprezível se comparada com a corrente nominal.

Os enrolamentos de armadura devem ser modelados com imposição de tensões de armadura senoidais defasadas de 120° entre as fases. É necessário que haja a imposição de tensão nos terminais para que o modelo da máquina opere como se estivesse conectado em uma barra de grande capacidade.

Nesse caso o curto circuito foi configurado para ocorrer em 0,5976 segundos ao se observar que esse é o tempo necessário para o gerador entrar em regime permanente. Outro fator que influenciou na escolha desse instante de tempo é que nesse momento o enlace de fluxo na fase *a* é nula com isso será possível observar o curto circuito com a componente cc da fase *a* nula. O curto circuito foi modelado através das tensões de armadura que foram impostas para zero a partir do instante escolhido, ficando configuradas da seguinte forma:

Fase A: $\text{if}(\text{time} < 0.5976, 359.258 * \sin(2 * \pi * 60 * \text{time} - 40 * \pi / 180), 0)$

Fase B: $\text{if}(\text{time} < 0.5976, 359.258 * \sin(2 * \pi * 60 * \text{time} - 40 * \pi / 180 - 2 * \pi / 3), 0)$

Fase C: $\text{if}(\text{time} < 0.5976, 359.258 * \sin(2 * \pi * 60 * \text{time} - 40 * \pi / 180 - 4 * \pi / 3), 0)$

Essa defasagem de -40° já estava presente na montagem do modelo do Maxwell 2D em todas as fases. Foi observado que ao removê-las o ângulo de carga muda, pois como demonstrado na equação (6.1) uma defasagem em V_t sem ajustar o ângulo inicial do rotor provoca essa alteração. Como os parâmetros da máquina já haviam sido ajustados para operar nessa condição, optou-se por mantê-la pois ao reajustá-la seriam obtidos os mesmos resultados. O gráfico da tensão terminal com o curto circuito é mostrado na figura 6.4.

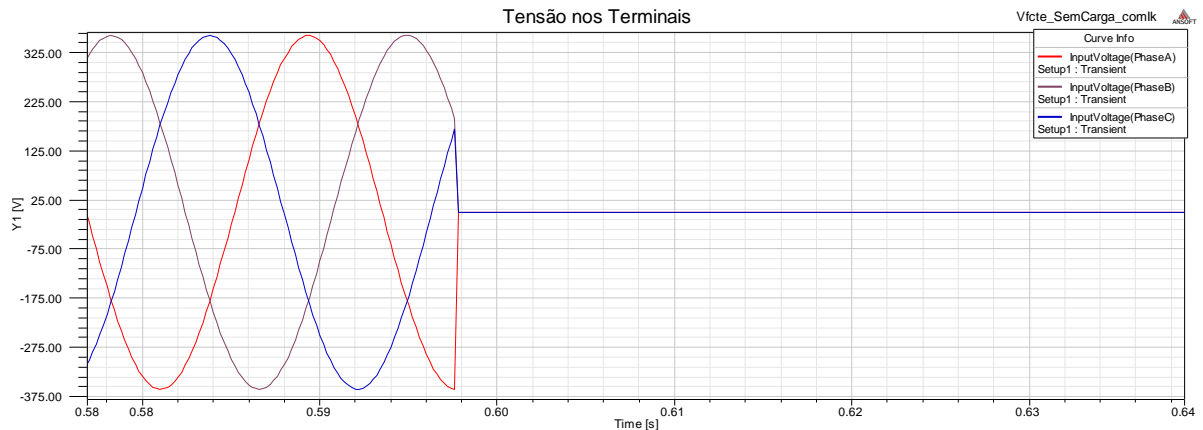


Figura 6.4 - Tensão Terminal do Gerador.

Os valores de resistência e indutâncias de dispersão nos enrolamentos de armadura foram mantidos na configuração do default pois elas foram calculadas pelo RMXprt em função do material previamente selecionado.

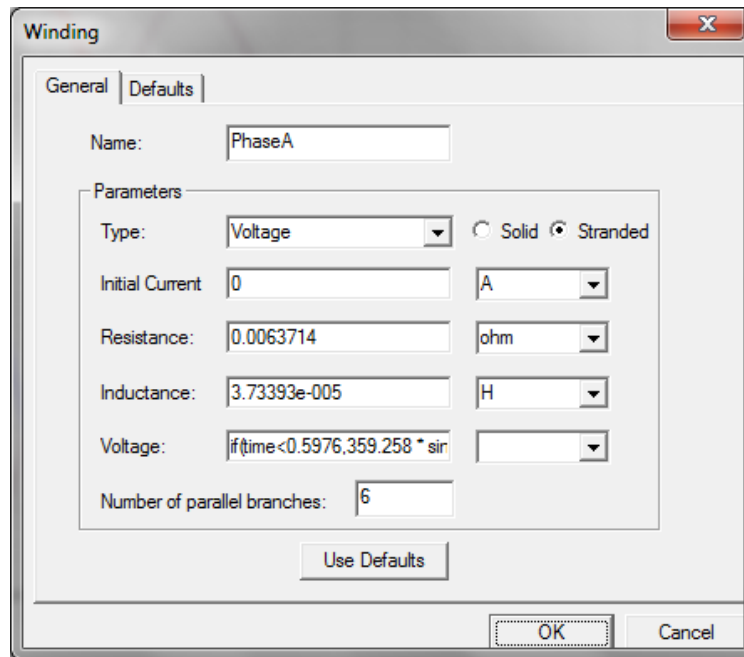


Figura 6.5 - Configuração do enrolamento de armadura - Fase A

Feitas as considerações a respeito da simulação pode-se começar a análise do Maxwell 2D.

Uma vez obtidos os resultados desejados, serão mostrados nos resultados desse estudo as distribuições de campo em 3 momentos distintos:

Antes da falta, que significa que nesse instante o gerador está em regime permanente e não há curto circuito nos terminais;

Durante a falta, significa que o instante amostrado ocorre momentos após a incidência do curto circuito. Pode ser que em alguns casos sejam amostrados mais de um instante de tempo.

Depois da falta, nesse momento o gerador entra em regime permanente com o curto circuito em seus terminais.

6.1.2. Resultados:

Foi encontrado o seguinte resultado para as correntes de armadura:

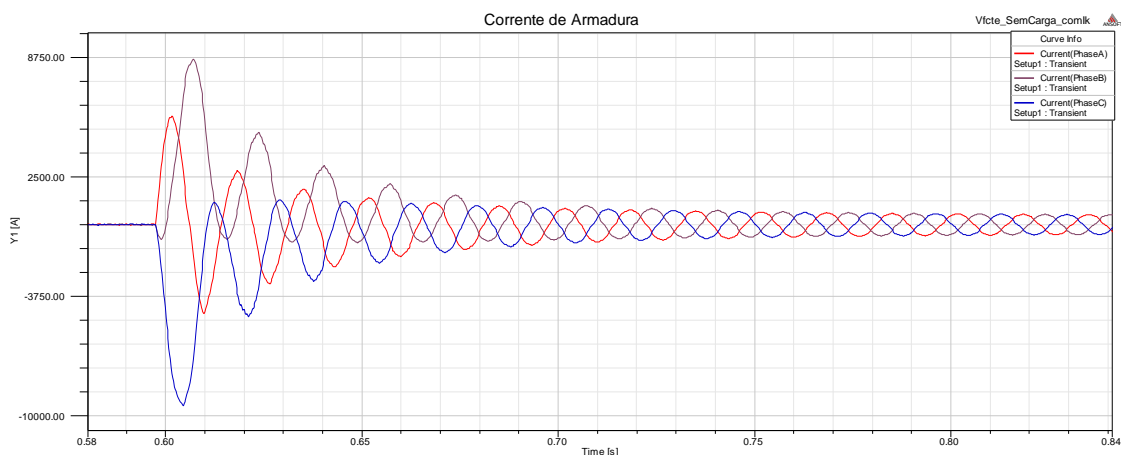


Figura 6.6 - Correntes de Armadura para o gerador em vazio e com os amortecedores..

$I_{a \text{ pico-antes do curto nas 3 fases}} = 30 \text{ A} \rightarrow 3 \% \text{ da corrente nominal}$

$I_{cc,a \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 5650 \text{ A}$

$I_{cc,b \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 8647 \text{ A}$

$I_{cc,c \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = -9457 \text{ A}$

$I_{cc \text{ pico} - \text{regime permanente nas 3 fases}} = 464,5 \text{ A}$

Onde:

$I_{a \text{ pico} - \text{antes do curto nas 3 fases}}$ é o valor de pico para as três fases equilibradas antes do defeito.

$I_{cc,a \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}}$, $I_{cc,b \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}}$, $I_{cc,c \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}}$ são os picos de corrente no primeiro ciclo do curto para as fase a, b e c.

$I_{cc \text{ pico} - \text{regime permanente nas 3 fases}}$ é o valor de pico em regime permanente para as três fases com curto aplicado.

Observando a figura 6.6 é possível observar os períodos subtransitório e transitório, o período subtransitório possui poucas oscilações durando aproximadamente até a terceira ou quarta oscilação, aproximadamente os primeiros 0,1s. O período transitório vem logo após o subtransitório e este dura um intervalo de tempo maior durando até a máquina entrar em regime permanente, o que ocorre aproximadamente 0,5s depois da ocorrência do defeito.

É possível observar também que a fase *a* possui sua componente cc nula, e nas demais fases há uma componente cc.

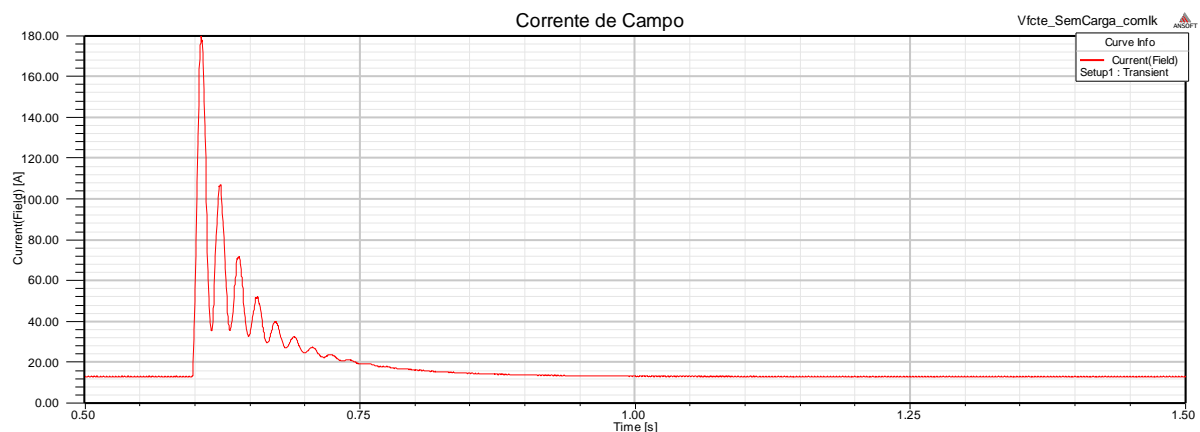


Figura 6.7-Corrente de campo para o gerador em vazio e com os amortecedores.

O gráfico da figura 6.7 permite observar a corrente no enrolamento de campo. Na ocorrência do defeito a corrente se eleva a um pico de 179,5 A no primeiro ciclo no intuito de contrabalançar a corrente desmagnetizante proveniente do estator. A corrente de campo varia até aproximadamente 0,5 s após a ocorrência do defeito, e em regime permanente a corrente de campo volta para o valor inicial de 13,174 A.

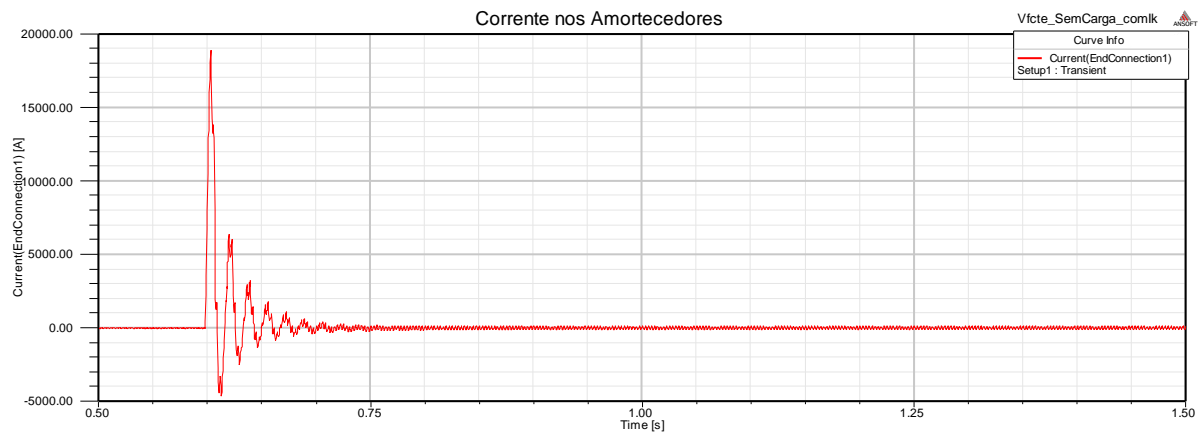


Figura 6.8-Corrente nos amortecedores no Gerador em Vazio.

Ao observarmos a figura 6.8 é importante observar que as oscilações duram um tempo bem curto pois de acordo com a teoria descrita nos capítulos 4 e 5 elas só existem durante o período subtransitório, e aproximadamente em 0,1 segundos após o defeito as oscilações passam a ser muito pequenas.

É possível observar na figura 6.9 a presença de harmônicos nas correntes de armadura. Uma vez que o curto circuito atinge o regime permanente, esses harmônicos são provenientes das pequenas correntes induzidas nos amortecedores devido aos harmônicos espaciais.

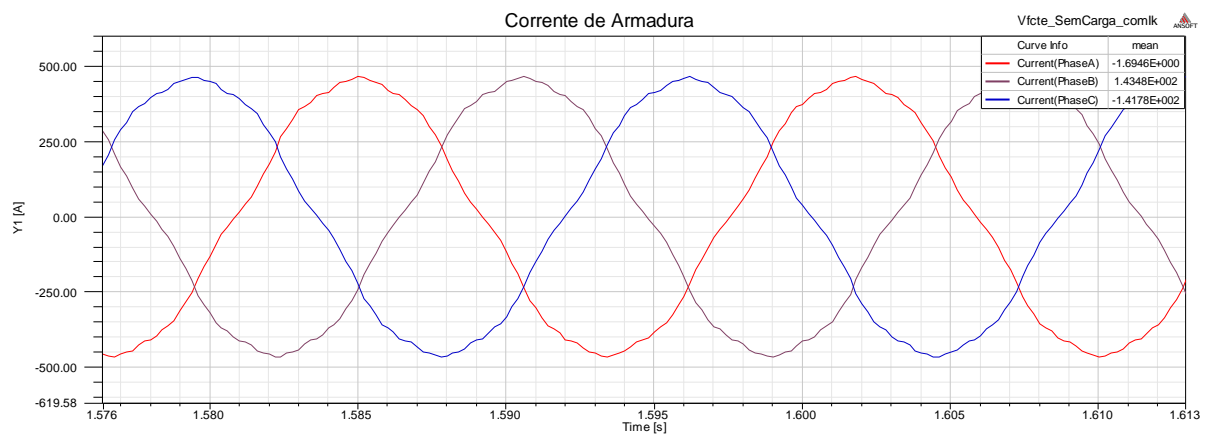


Figura 6.9 - Correntes de curto circuito em regime permanente

A distribuição dessas correntes nas barras será mostrada na figura 6.18.

- *Antes da Falta*

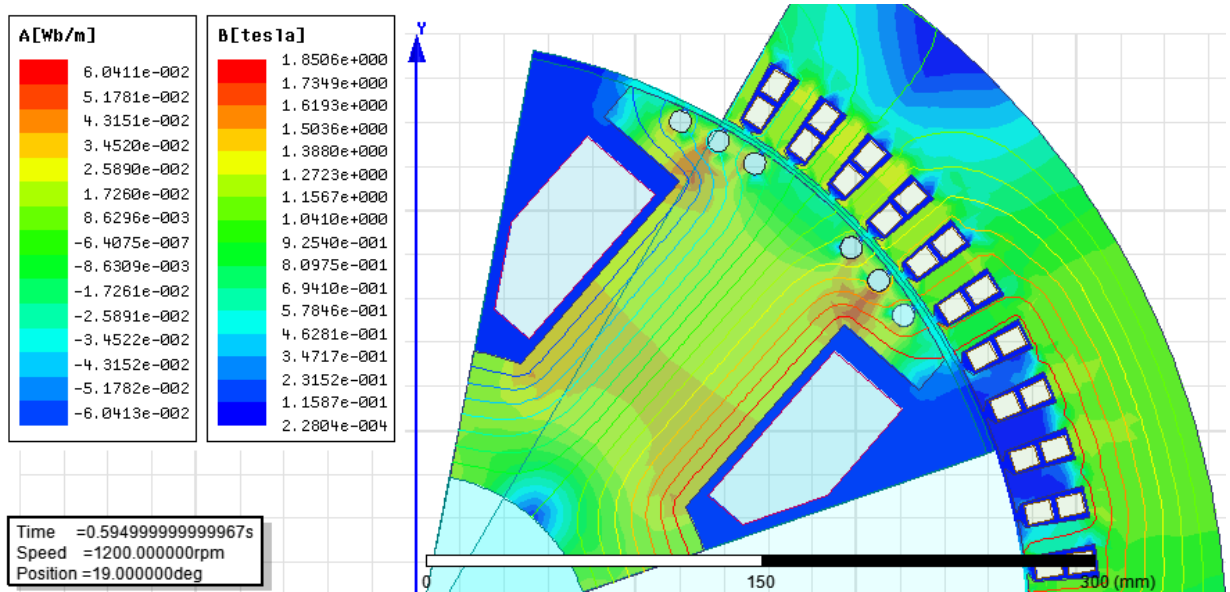


Figura 6.10 - Linhas de fluxo magnético e densidade de campo magnético no rotor, estator e entreferro antes do defeito.

Na figura 6.10 temos o rotor num instante exatamente antes da ocorrência da falta e é vista uma demonstração clara do caminho preferencial de fluxo magnético “saindo” de um polo do rotor passando pelo entreferro depois para o estator e por fim voltando pelo outro polo do rotor. É possível observar algumas pequenas regiões no rotor onde há uma densidade maior de campo magnético localizadas próximo às extremidade laterais superiores do rotor provavelmente ocasionadas pelo caminho de fluxo daquele polo.

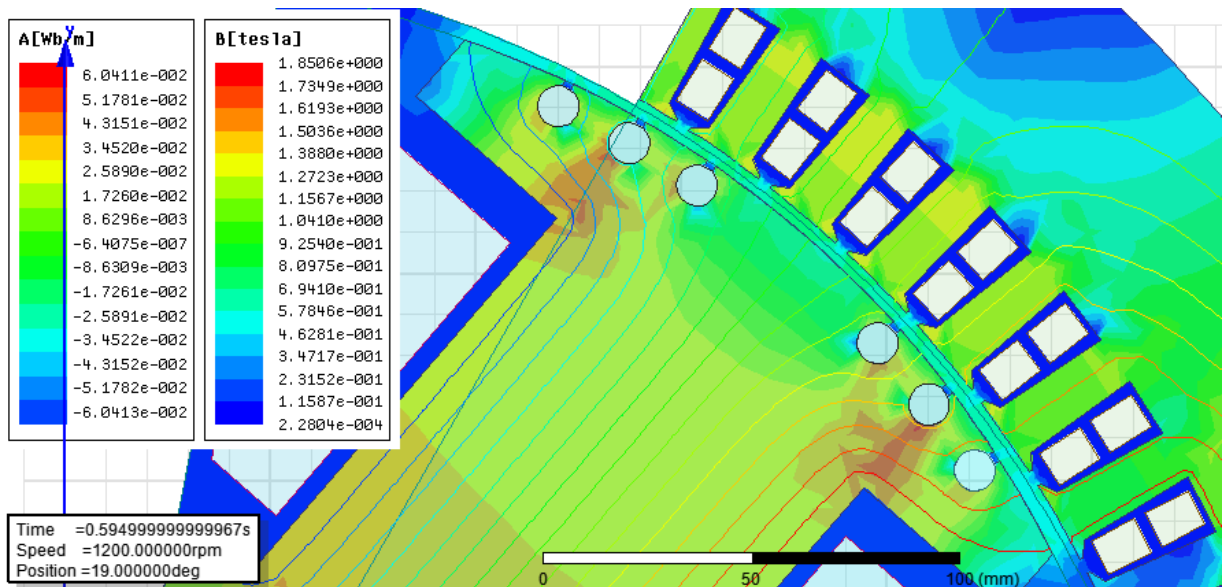


Figura 6.11 - Linhas de fluxo e densidade de campo no entreferro antes do defeito.

Na figura 6.11 podemos observar que o campo magnético é mais forte ao longo da região polar devido à sua menor relutância em comparação com o eixo interpolar, mas ainda assim é menor em intensidade do que no rotor e estator. É possível observar as pequenas variações de densidade de campo ao longo do entreferro devido às ranhuras no rotor e estator.

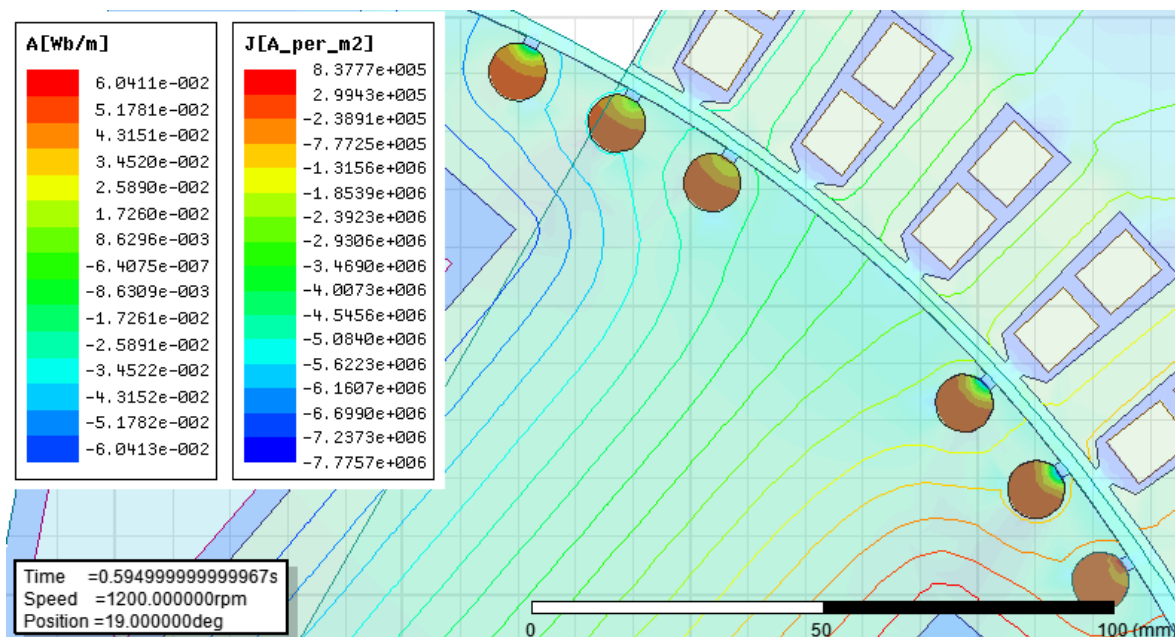


Figura 6.12 - Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.

Na figura 6.12 é possível visualizar que há pouca densidade de corrente na região central e inferior das barras, existe uma densidade maior de corrente na extremidade superior dos amortecedores, próximo às ranhuras do rotor e do estator. Essas correntes são induzidas devido à presença de harmônicos espaciais produzidos pelo estator acarretando em variações no fluxo magnético ao longo do entreferro da máquina.

- *Durante a falta*

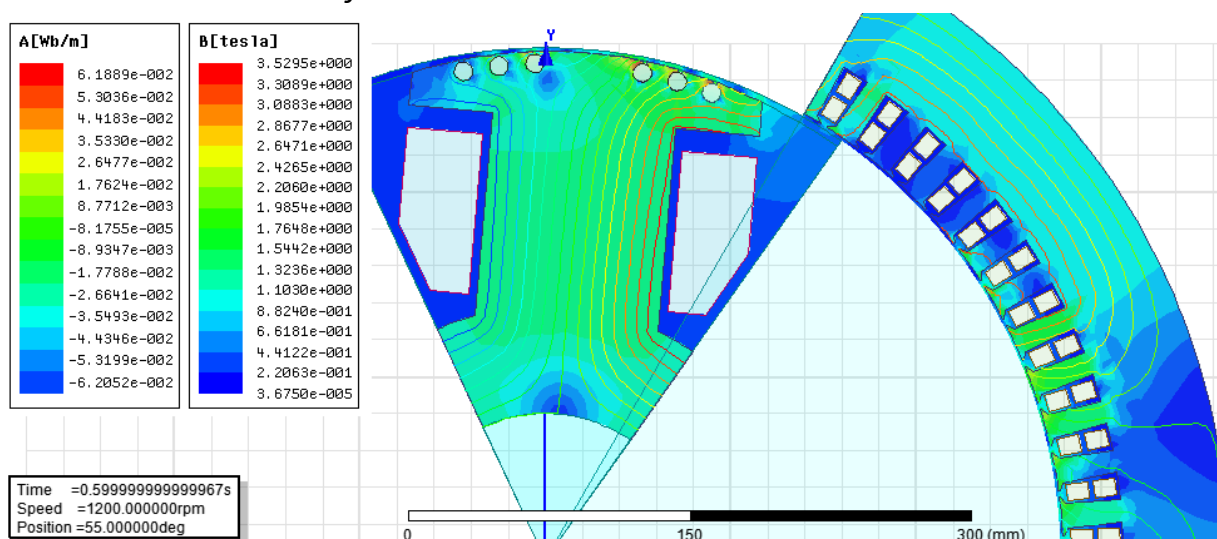


Figura 6.13-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor e estator imediatamente após a ocorrência do defeito.

Analisando-se a figura 6.13 podemos ver que o campo magnético, de uma forma geral, não se altera instantaneamente, apesar de já ser possível ver as evidências da desmagnetização do estator e do rotor. Isso é explicado pelo princípio de que não pode haver variação instantânea no fluxo concatenado na ocorrência de uma corrente desmagnetizante. Com isso

os outros enrolamentos são excitados com correntes induzidas e o fluxo permanece constante durante um curto período de tempo. Também é possível observar a distorção das linhas de fluxo do rotor ocasionando densidades de campo menores na extremidade superior esquerda do rotor. É visto também a consequência das altas correntes induzidas nos amortecedores através da maior densidade de campo observada em algumas barras.

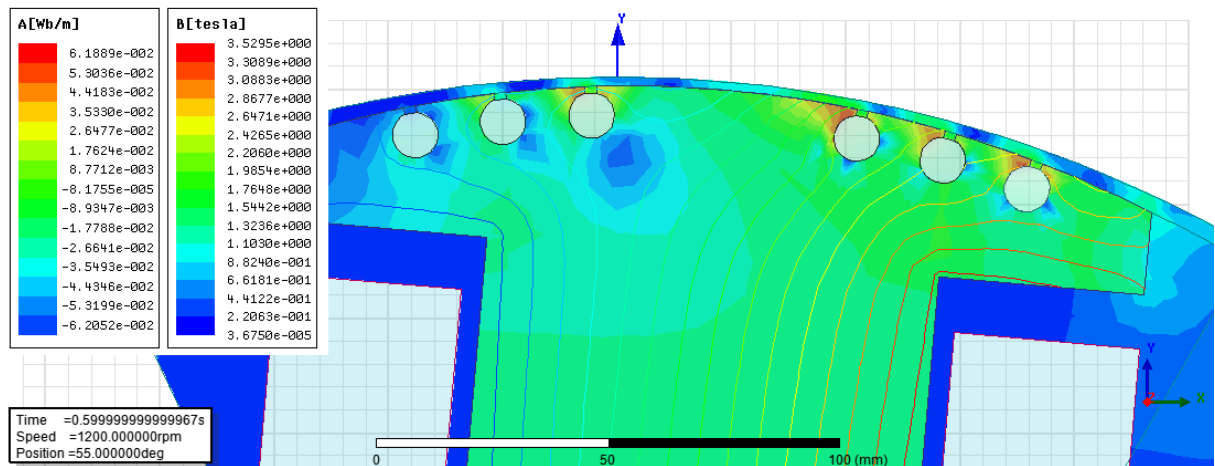


Figura 6.14- Linhas de campo e densidade de fluxo no entreferro imediatamente após a ocorrência do defeito.

A partir da análise mais detalhada da figura 6.14, tem-se a comprovação do campo induzido pelos amortecedores, observa-se isso também no entreferro.

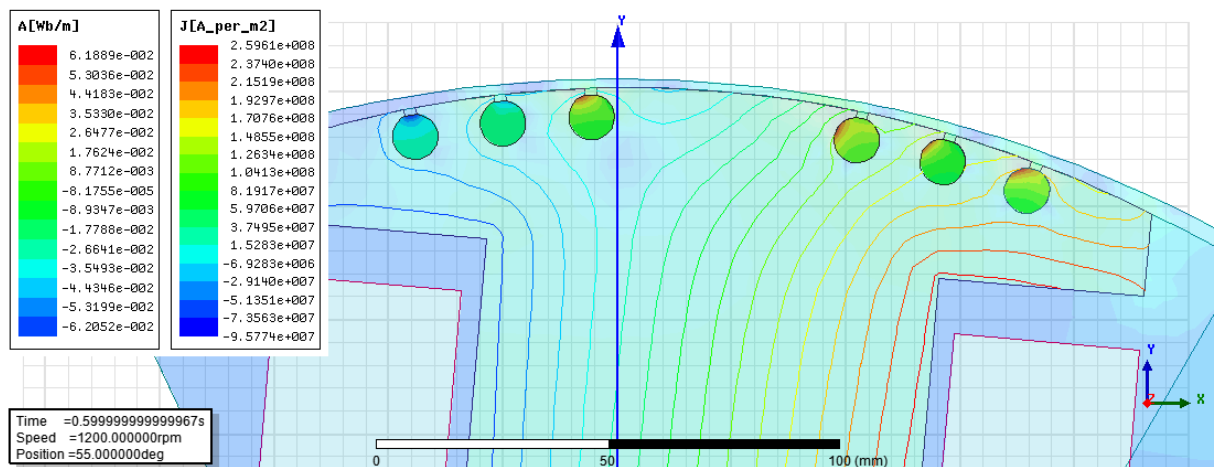


Figura 6.15 - Densidade de corrente nas barras amortecedoras imediatamente após a ocorrência do defeito.

Na figura 6.15 pode-se observar que as 3 barras amortecedoras da direita possuem correntes induzidas de maior intensidade, significando que há uma maior excitação naquela região do rotor, explicando também o fato da magnetização ser menor pelo lado esquerdo. Outro ponto a ser visto é que a densidade de corrente nas extremidades superiores das barras são maiores do que na região central e inferior.

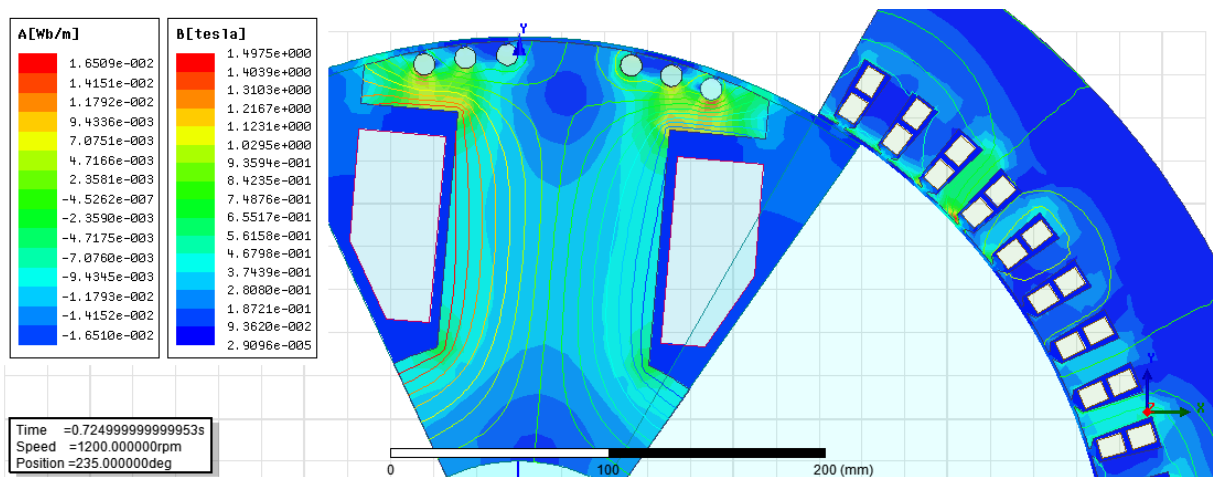


Figura 6.16 - Linhas de fluxo e densidade de campo algum tempo após a ocorrência do defeito.

Algum tempo depois já é possível visualizar a queda drástica no campo magnético ao longo do rotor e estator. Nesse instante a máquina está próxima do regime permanente (Figura 6.16).

- *Depois da falta*

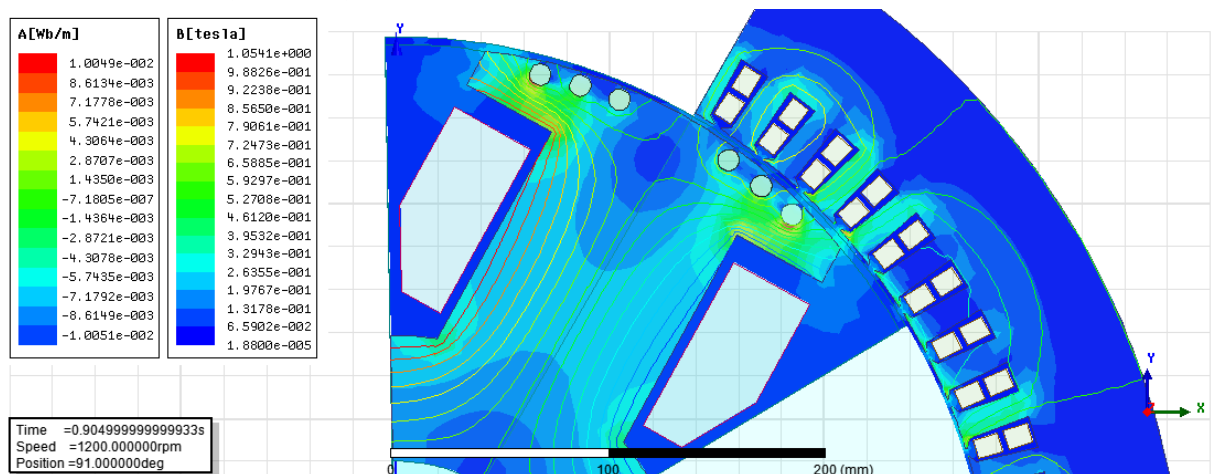


Figura 6.17 - Linhas de fluxo no rotor, estator e entreferro um tempo depois da falta.

Nesse instante de tempo o regime permanente já foi alcançado e é possível observar na figura 6.17 uma grande atenuação no campo magnético do rotor e estator, maior ainda no estator uma vez que as correntes desmagnetizantes partem dali. Apesar de ainda existir algum fluxo magnético proveniente da excitação, está drasticamente reduzido em comparação a momentos antes do defeito.

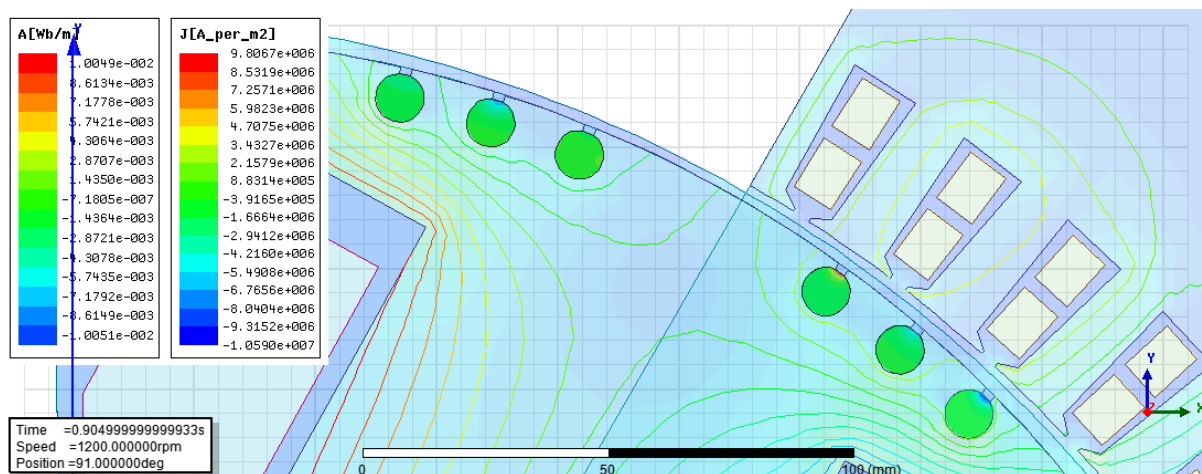


Figura 6.18 - Correntes induzidas nos amortecedores após o defeito.

É possível observar na figura 6.18 uma grande redução nas correntes nos enrolamentos amortecedores, uma vez que nesse instante o regime transitório já foi alcançado.

Novamente é possível observar a indução de corrente nas extremidades superiores das barras, ocasionadas pelos harmônicos espaciais. Essas correntes induzidas que provocam os harmônicos observados na figura 6.9.

6.2. Gerador em Vazio sem enrolamento amortecedor

6.2.1. Simulação

Nesse caso o gerador foi posto a operar sob as mesmas condições de operação dadas no caso anterior, a única diferença é que o tipo de material das barras de amortecimento foi alterado para um material não condutor a fim de que não haja mais correntes induzidas nos amortecedores, porém deve-se tomar cuidado na escolha do material para que as propriedades magnéticas da máquina não sejam alteradas. Por conta disso foi escolhido o vácuo no lugar do cobre nas barras amortecedoras. O objetivo dessa alteração é ver qual o efeito que as barras amortecedoras causam no curto circuito e na distribuição dos campos.

Para fazer a alteração do material foi preciso selecionar as 6 barras dar 1 click com o botão direito e na aba “Edit” selecionar a opção “Properties”. Dentro da janela de propriedades deve-se selecionar o tipo de material no campo “Material” e trocar de “Copper_75C” para “Vacuum”.

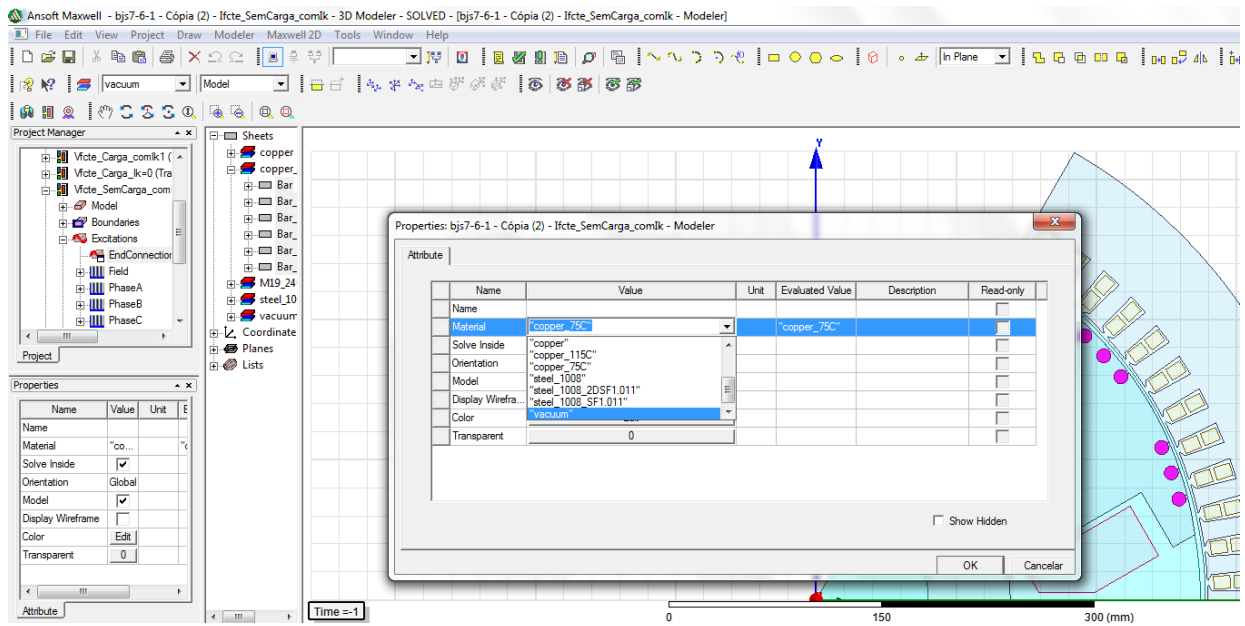


Figura 6.19 - Troca do material das barras amortecedoras.

Feita essa alteração pode-se dar prosseguimento a análise.

6.2.2. Resultados

Após as simulações os seguintes resultados foram encontrados.

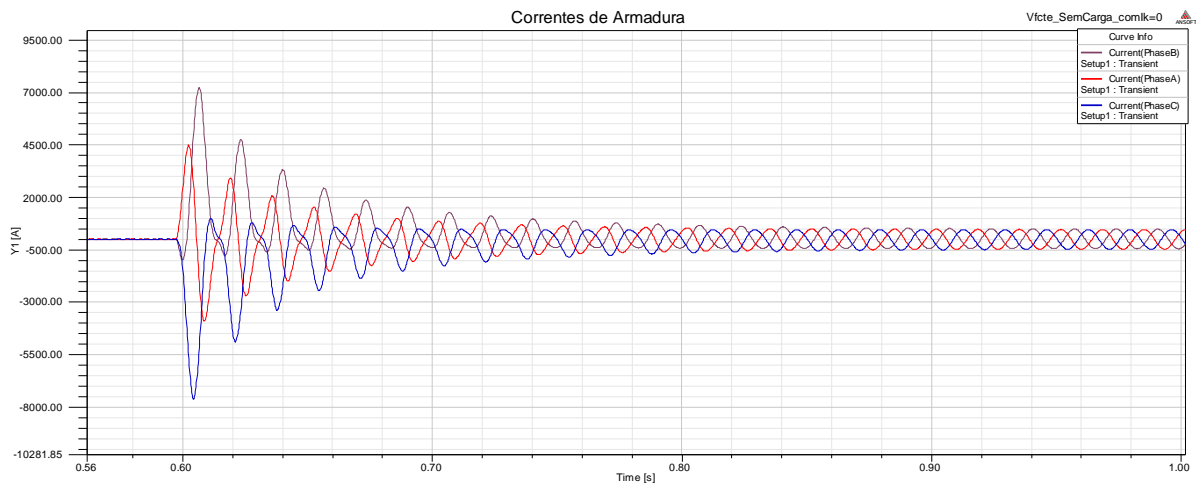


Figura 6.20 - Corrente de armadura para o Gerador em Vazio sem indução de correntes nas barras amortecedoras.

$I_{a \text{ pico-antes do curto nas 3 fases}} = 13 \text{ A} \rightarrow 1,28\% \text{ da corrente nominal}$

$I_{cc,a \text{ pico-1}^\circ \text{ ciclo}} = 4485 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 20,62\% \text{ em relação ao caso com amortecedores.}$

$I_{cc,b \text{ pico-1}^\circ \text{ ciclo}} = 7230 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 16,39\% \text{ em relação ao caso com amortecedores.}$

$I_{cc,c \text{ pico-1}^\circ \text{ ciclo}} = -7610 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 19,53\% \text{ em relação ao caso com amortecedores.}$

$I_{cc \text{ pico-regime permanente nas 3 fases}} = 464,5 \text{ A}$

Foi feita uma comparação entre as fases *a* para os dois casos, com enrolamento amortecedor e sem enrolamento amortecedor.

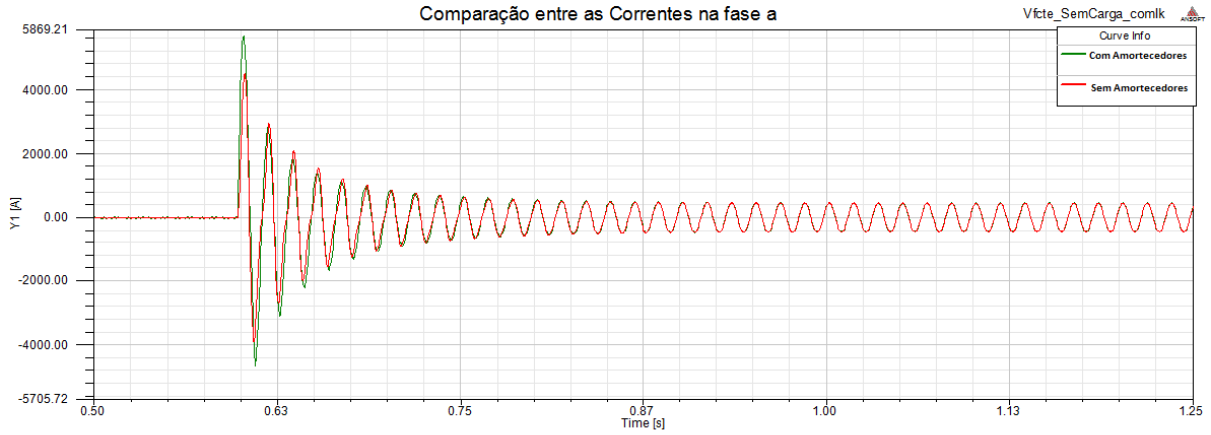


Figura 6.21 - Comparação entre as correntes da fase A para os casos com e sem amortecedores para o gerador em vazio.

Podemos observar na figura 6.21 uma considerável redução na amplitude das correntes de curto circuito principalmente durante o primeiro ciclo. Essa redução se dá a partir da análise das equações (4.5), (5.4), (5.5) e (5.6).

$$T''_d = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{kd} + \frac{L_f L_{md} L_a}{L_f L_{md} + L_{md} L_a + L_f L_a} \right) \quad (4.3)$$

$$i_a = \left(\frac{\sqrt{2} E_{af0}}{X_d} + \sqrt{2} E_{af0} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \sqrt{2} E_{af0} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \cos(\omega t + \theta_0) \quad (4.15)$$

Uma vez que para o caso onde o cobre foi substituído por vácuo que tem a resistividade muito maior que a do cobre temos que:

$$\lim_{\rho_{kd} \rightarrow \infty} R_{kd} = \infty \quad (6.2)$$

Dessa forma:

$$\lim_{r_{kd} \rightarrow \infty} T''_d = 0 \quad (6.3)$$

Assim analisando a parcela referente ao período subtransitório presente nas 3 expressões do curto circuito:

$$\lim_{T''_d \rightarrow 0} e^{-\frac{t}{T''_d}} = 0 \quad (6.4)$$

A partir da relação encontrada em (6.4) e aplicando-a em (4.15), pode-se concluir que a partir do momento em que se aumenta a resistência nos enrolamentos amortecedores a componente subtransitória irá desaparecer ou irá se atenuar consideravelmente, acarretando

numa redução das correntes de armadura nesse período. Nesse caso, com a componente cc nula nos dois casos, ou muito próxima de zero, a redução na corrente de armadura só foi vista com clareza no primeiro ciclo.

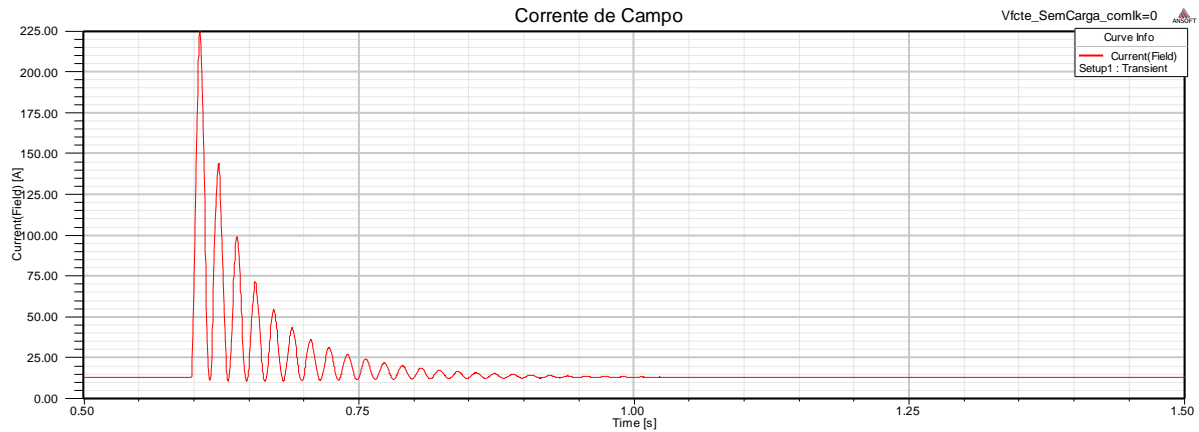


Figura 6.22-Corrente de campo para o gerador em vazio sem amortecedores.

Quando os enrolamentos amortecedores são removidos, a corrente de campo passa a ter um pico de 223,4 A caracterizando um aumento de 24,45% no valor máximo. Esse aumento é acarretado pela ausência dos amortecedores. Uma vez que não há mais corrente nos amortecedores, o sistema precisará de mais correntes induzidas para contrabalançar a corrente desmagnetizante, então o enrolamento de campo será solicitado para esse fim.

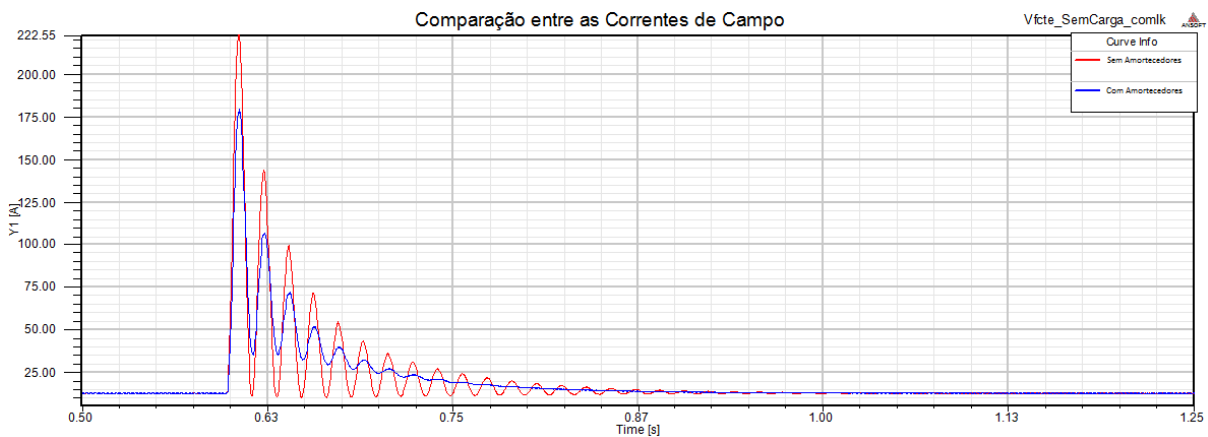


Figura 6.23 - Comparação entre as correntes de campo dos casos com e sem amortecedores para o gerador em vazio .

É importante observar na figura 6.23 que sem os enrolamentos amortecedores a corrente de campo demora mais a parar de oscilar.

Na figura 6.24 vemos que os harmônicos observados no caso com amortecedores em regime permanente são atenuados consideravelmente quando os amortecedores são removidos. Uma vez que sem os enrolamentos amortecedores a corrente de armadura não recebe mais a influência das correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores devido aos harmônicos espaciais.

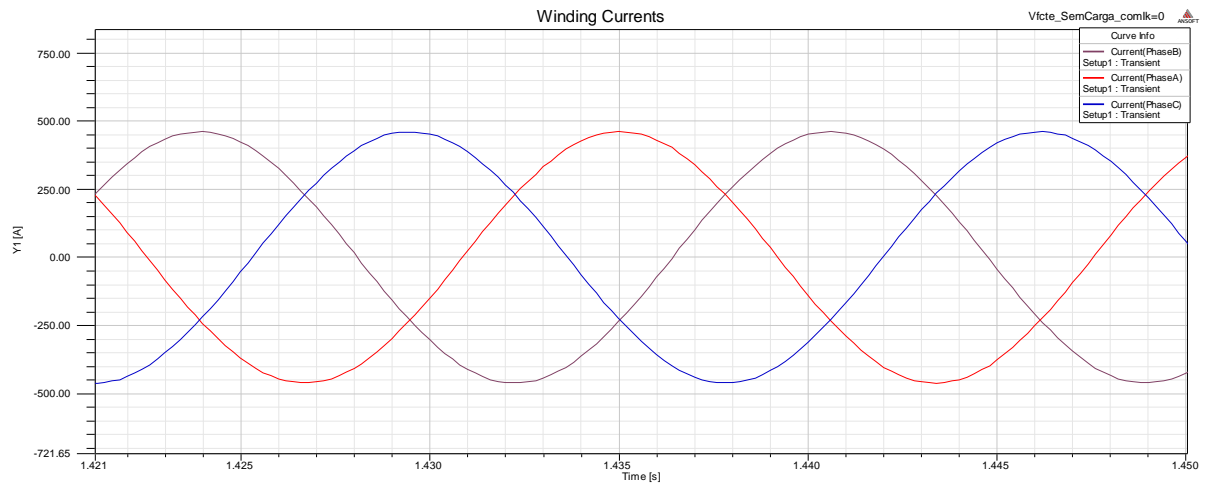


Figura 6.24-Correntes de curto circuito em regime permanente para o gerador em vazio sem amortecedores.

- *Antes da falta*

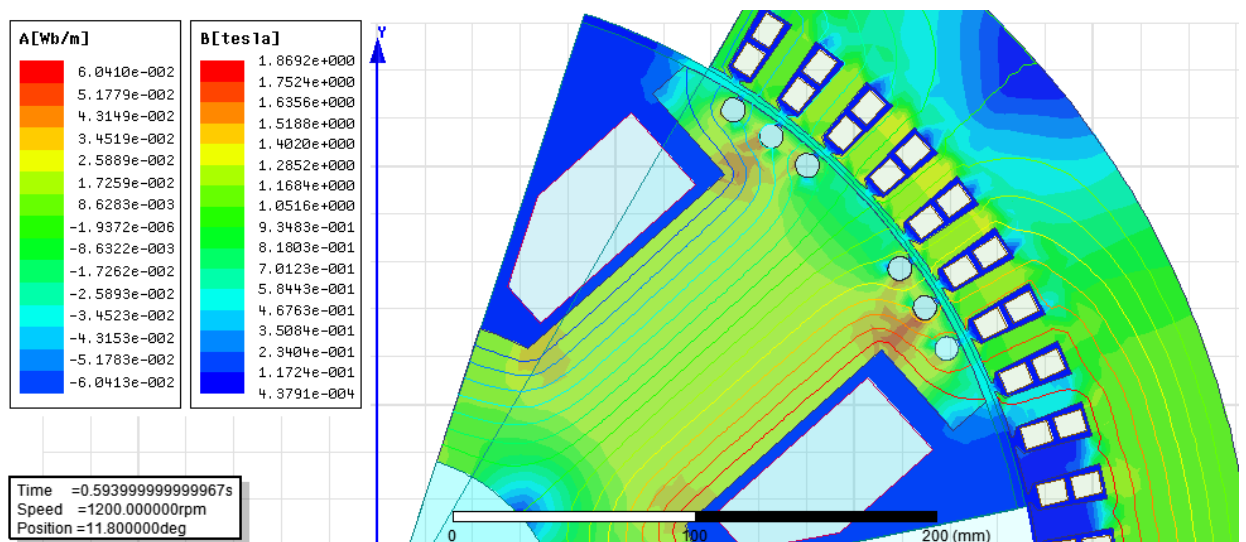


Figura 6.25-Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor, estator e entreferro da máquina antes do defeito.

Na figura 6.25 vemos que em regime permanente o fluxo magnético segue a mesma distribuição que o caso com enrolamentos amortecedores.

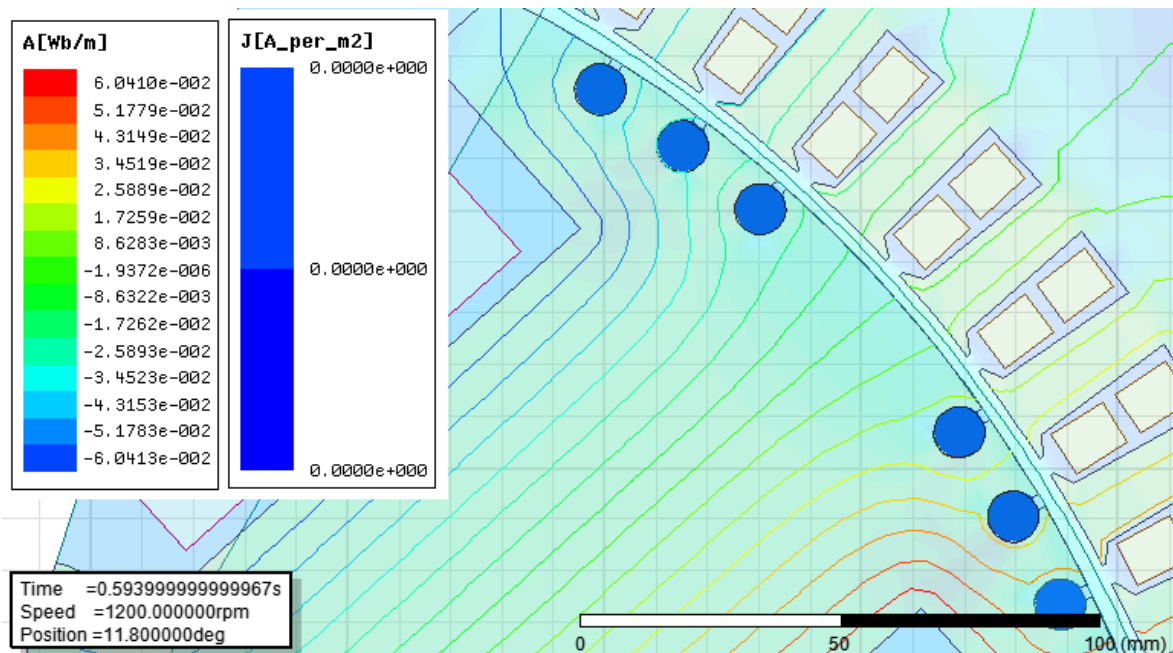


Figura 6.26-Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.

A figura 6.26 permite observar que não há indução de corrente em nenhum ponto das barras.

- *Durante a falta*

Para uma comparação adequada com o caso com enrolamentos amortecedores, o mesmo instante de tempo foi amostrado.

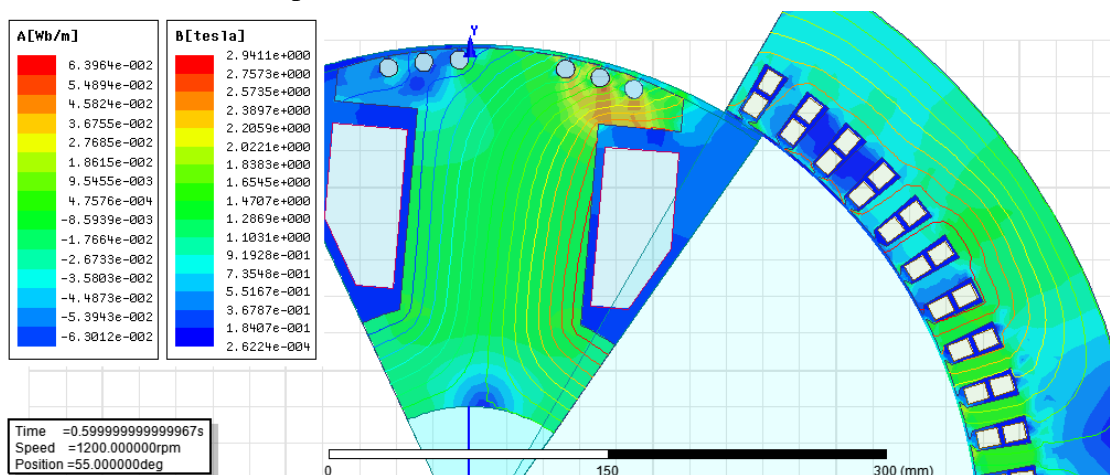


Figura 6.27 - Linhas de fluxo e densidade de campo para o caso sem enrolamentos amortecedores durante o defeito.

Na figura 6.27 vemos que sem os enrolamentos amortecedores a redução do magnetismo pelo lado esquerdo da cabeça do pólo é menor. Pelo lado direito do rotor a desmagnetização é maior, portanto o aumento da excitação foi suficiente para aumentar a densidade do campo magnético no lado direito da cabeça do pólo, e ali é possível ver que há uma saturação magnética. No entreferro observa-se o mesmo efeito, densidade de campo maior pelo lado direito da região polar e menor pelo esquerdo.

Novamente não há correntes induzidas nas barras amortecedoras, motivo pelo qual as mesmas não serão representadas.

- *Depois da falta*

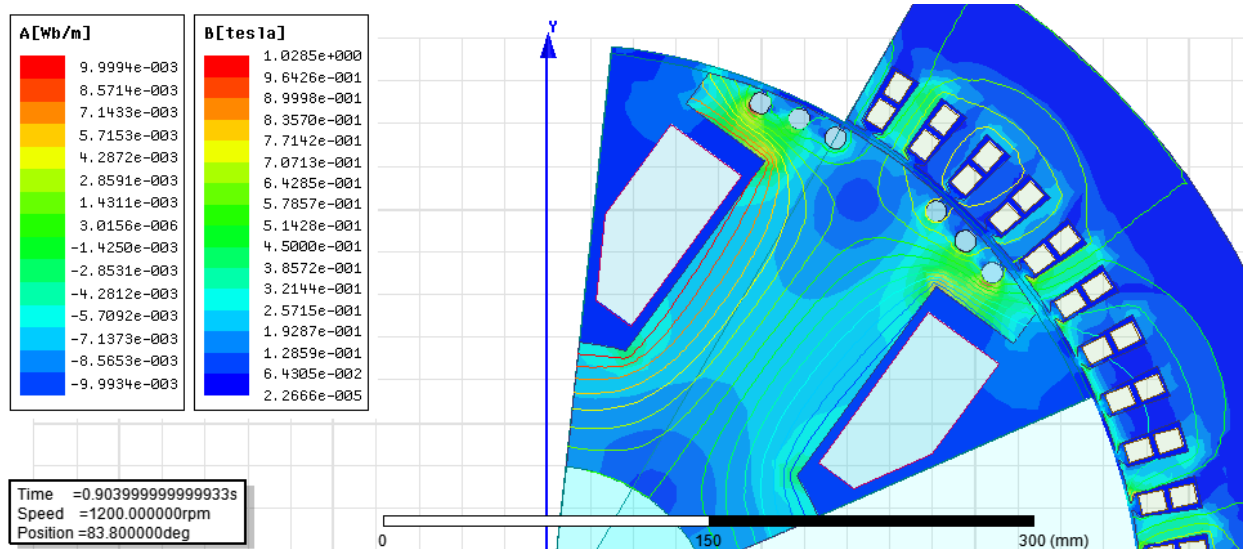


Figura 6.28 - Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor, estator e entreferro.

Nesse instante a desmagnetização é consideravelmente menor no rotor, e é possível ver mais áreas em azul escuro e menos áreas em verde. É possível ver uma densidade de campo maior na extremidade direita devido à excitação de campo (figura 6.28).

6.3. Gerador com carga nominal e com enrolamento amortecedor

6.3.1. Simulação

O objetivo desse caso é verificar o comportamento da máquina na ocorrência de um curto circuito sob condições nominais de operação.

Para alcançar a condição nominal primeiramente é necessário ajustar a excitação do enrolamento de campo de forma que a corrente de excitação em regime permanente seja de 35 A. Como o enrolamento de campo está ajustado com tensão constante de 125 V o valor de R_f é definido pela lei de Ohm:

$$R_f = \frac{V_{cc}}{I_f} = \frac{125}{35} = 3,57 \Omega$$

A indutância de dispersão foi mantida em 0,13 pu como nos casos anteriores, e com isso o enrolamento de campo foi modelado da seguinte forma:

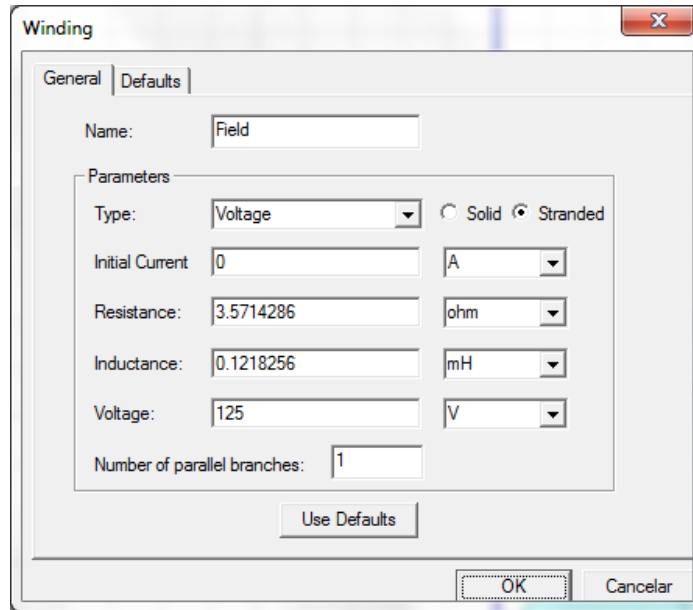


Figura 6.29 - Modelagem do enrolamento de campo.

Além da configuração do enrolamento de campo é necessário também definir uma carga que faça com que a corrente de armadura atinja um valor o mais próximo possível de $I_{a-rms} = 719,06 A$ antes da falta.

Como os transitórios mecânicos são desconsiderados nesse estudo, é necessário que a posição do rotor seja ajustada para o ângulo de carga desejado. Por tentativa e erro o valor encontrado para a posição inicial do rotor foi de 65° a fim de ajustar o ângulo de carga para que haja corrente nominal na armadura.

Todas as demais condições permanecem inalteradas. Uma vez efetuada a configuração corretamente, é possível dar continuidade nas simulações.

6.3.2. Resultados

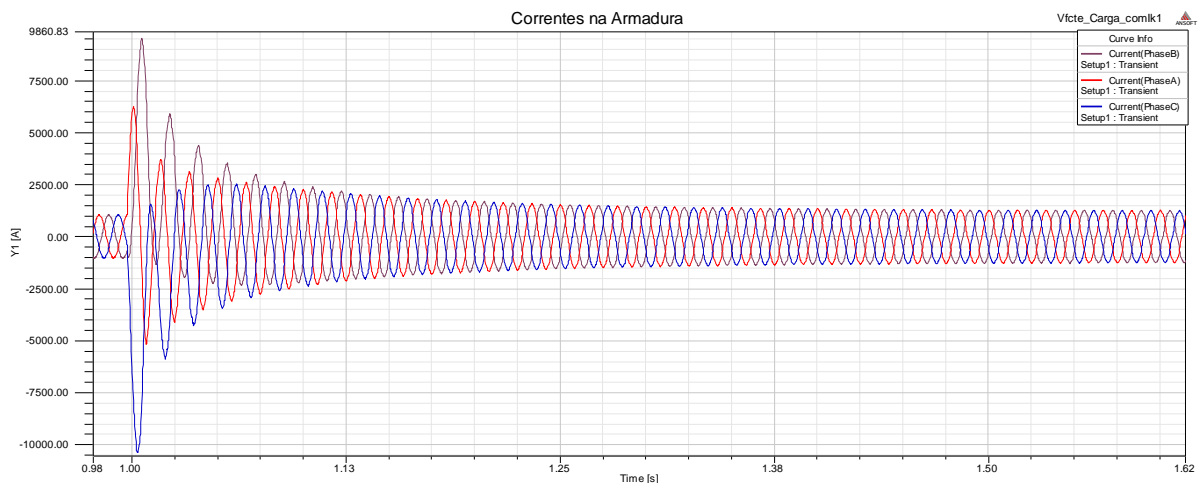


Figura 6.30 - Correntes de armadura na ocorrência de um defeito trifásico em um Gerador com carga nominal.

$I_{a \text{ pico-antes do curto nas 3 fases}} = 1020 A \rightarrow 0,39 \% \text{ maior que a corrente nominal.}$

$I_{cc,a \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 6160 A$

$I_{cc,b \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 9590 A$

$$I_{cc,c \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = -10325A$$

$$I_{cc \text{ pico} - \text{regime permanente nas 3 fases}} = 1234 A$$

Com base na figura 6.31, vemos que o regime permanente é alcançado aproximadamente 0,75 s após a ocorrência do curto, significando que esse aumento no tempo foi provocado pela entrada da carga.

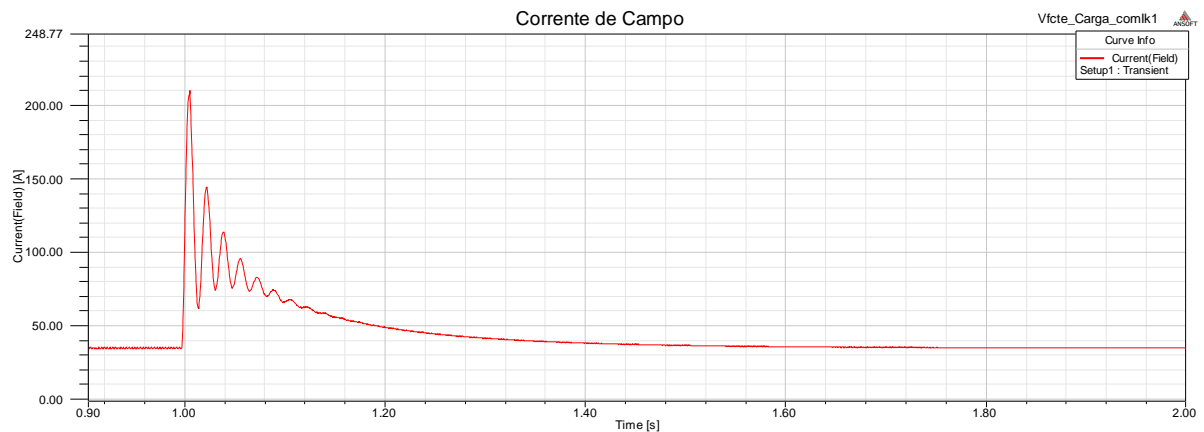


Figura 6.31 - Corrente de campo para o gerador com carga nominal.

A figura 6.31 mostra que a corrente de campo tem um pico de 210 A na ocorrência da falta.

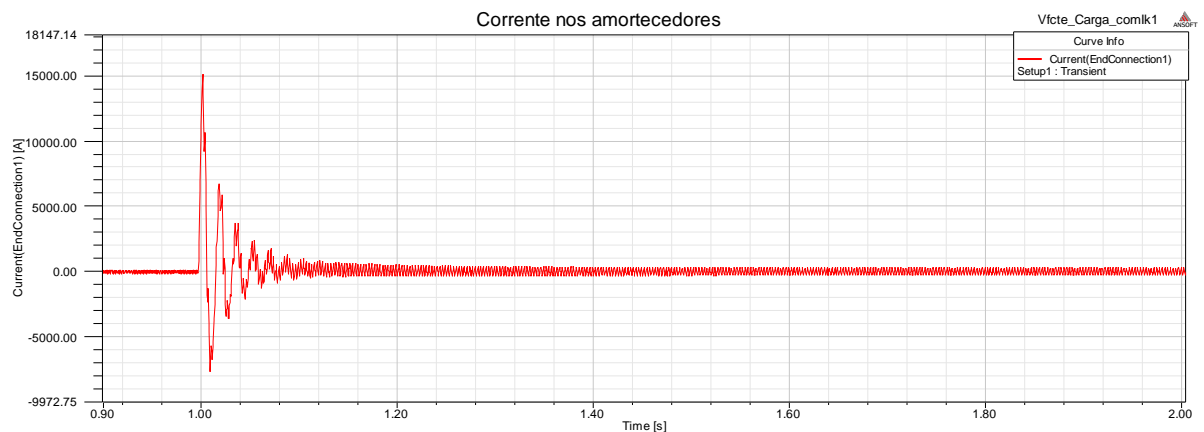


Figura 6.32 - Corrente nos amortecedores para o gerador com carga nominal.

Na figura 6.32 observa-se um pico de 15110 A no anel condutor na extremidade dos amortecedores. A oscilação do amortecedor dura cerca de 0,1 segundo a partir da ocorrência do curto, aproximadamente o mesmo tempo do caso em vazio.

- *Antes da falta*

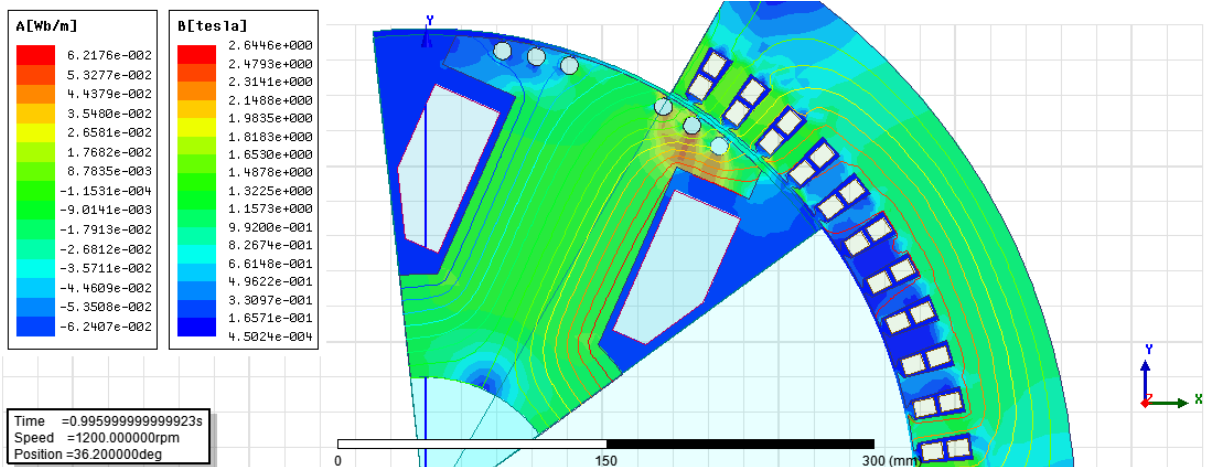


Figura 6.33 - Linhas de fluxo magnético e densidade de campo magnético no rotor estator e entreferro antes do defeito.

Na figura 6.33 pode-se observar que há uma magnetização maior na extremidade superior direita e menor na extremidade superior esquerda. Essa diferença é ocasionada pelo ângulo de carga entre o eixo do rotor e do estator, podendo ser vista também pela distorção nas linhas de fluxo. A densidade de campo magnético é maior em várias regiões, principalmente onde há saturação do ferro. Esse aumento é ocasionado pela reação de armadura que acompanha um incremento na carga.

Observando-se cuidadosamente a figura 6.33, pode-se observar que a distribuição da densidade de campo e das linhas de fluxo ao longo da máquina em regime permanente com carga segue o mesmo padrão observado nas figuras 6.13 e 6.27. Ambos os casos representam a distribuição da densidade de campo na ocorrência da falta, o que significa que num primeiro momento o curto circuito se comporta como uma grande requisição de carga.

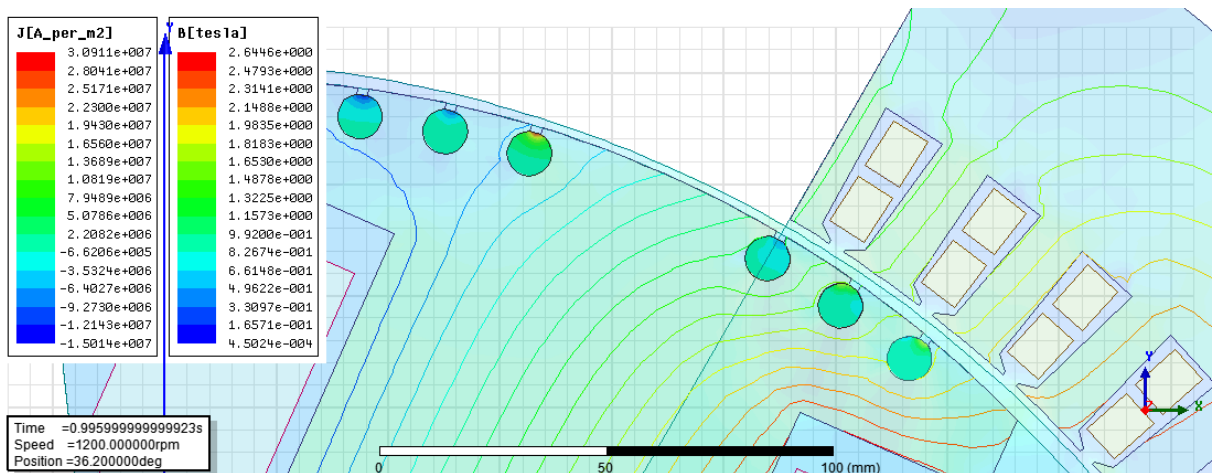


Figura 6.34-Correntes induzidas nos amortecedores antes do defeito.

Observando-se as barras amortecedoras na figura 6.34, vemos o mesmo efeito observado no caso sem carga, que em regime permanente há pouca indução de corrente nas barras.

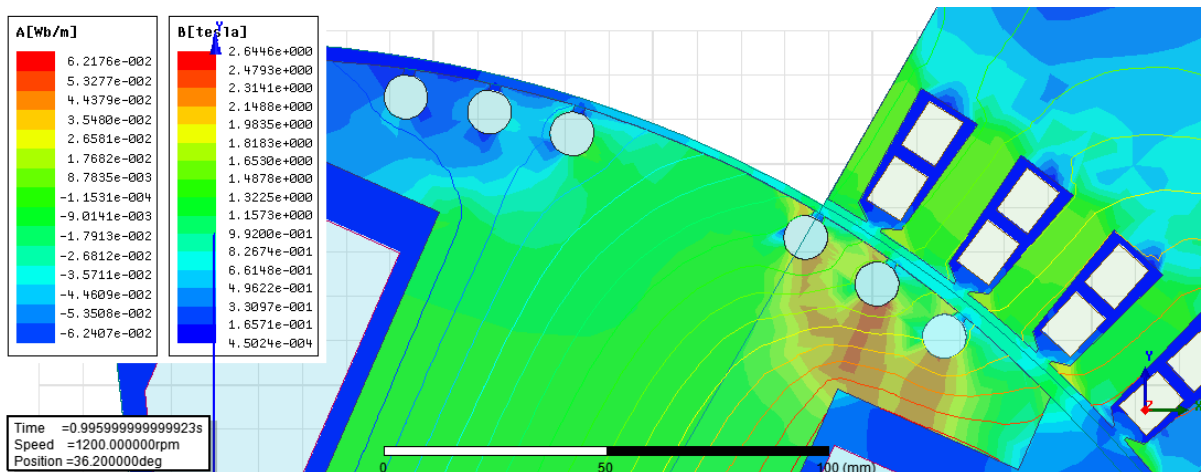


Figura 6.35 - Fluxo magnético e densidade de campo no entreferro antes do defeito.

Na figura 6.35 pode-se observar o que foi dito anteriormente, que as ranhuras provocam pequenas variações no campo magnético.

- Durante a falta

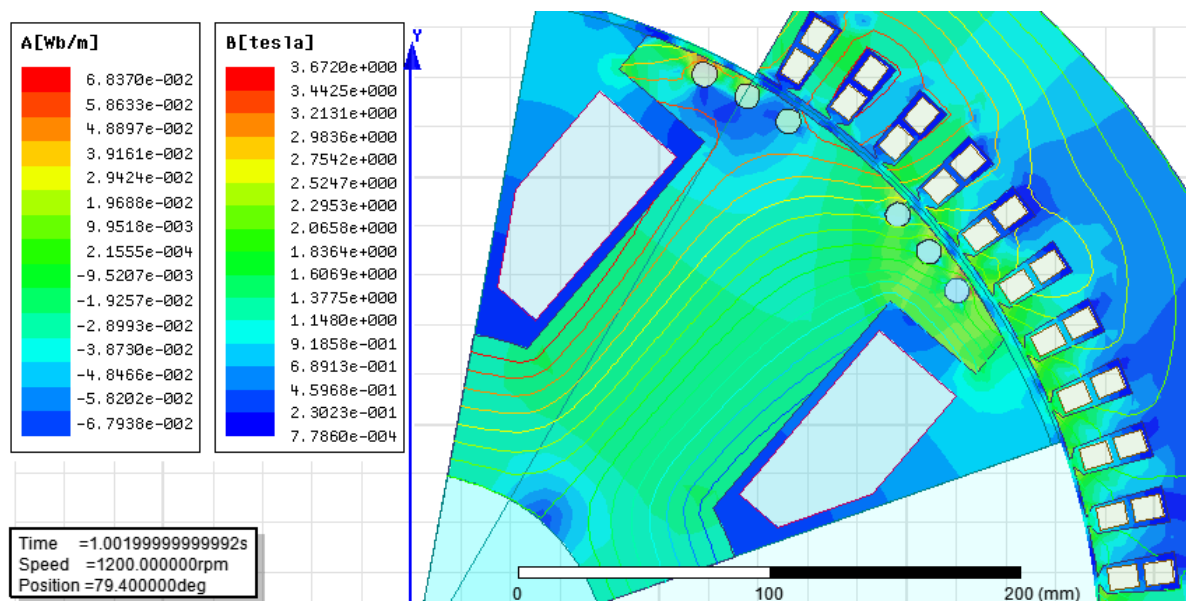


Figura 6.36 - Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no rotor estator e entreferro na ocorrência do defeito.

Com base na figura 6.36 possível observar uma forte magnetização nas proximidades dos amortecedores, causando a saturação do ferro em alguns pontos, especialmente em algumas extremidades. O campo no entreferro sofre forte influência dos campos induzidos pelas correntes dos enrolamentos amortecedores, apesar de apresentar campos de menor intensidade em comparação ao rotor e estator devido à permeabilidade magnética maior naquela região.

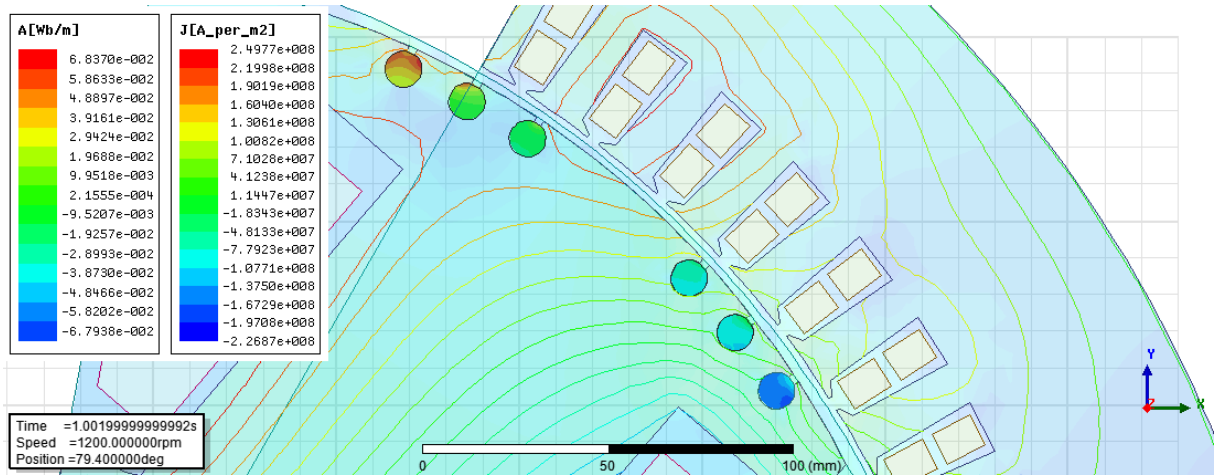


Figura 6.37 - Correntes induzidas nos amortecedores no instante do defeito.

Na figura 6.37 pode-se observar a grande quantidade de correntes induzidas nos amortecedores nesse instante de tempo.

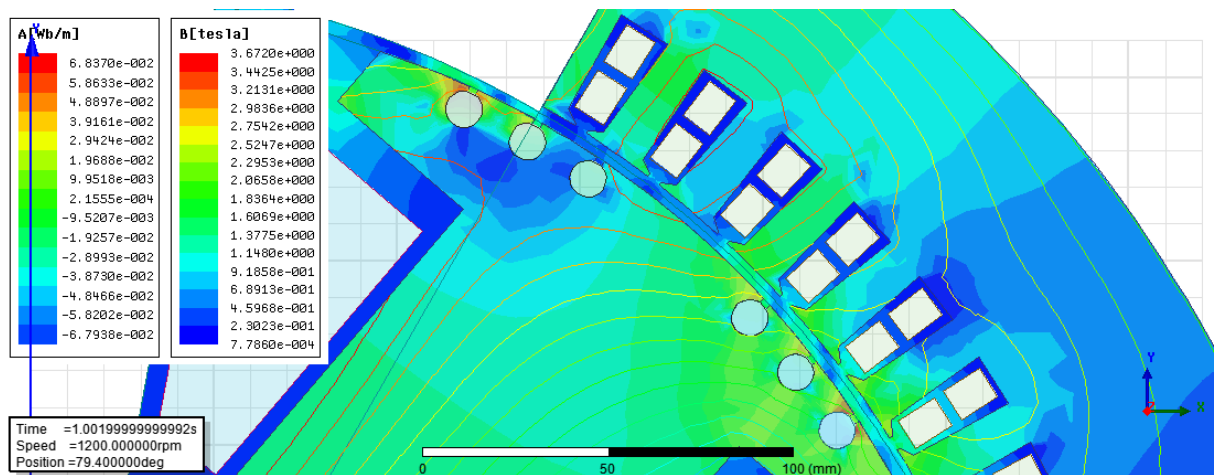


Figura 6.38 - Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no entreferro na ocorrência do defeito

Observando-se o fluxo magnético no entreferro visto na figura 6.38, é possível notar os efeitos das correntes induzidas nos amortecedores no campo magnético no entreferro, além das variações já provocadas pelas ranhuras.

- *Depois da falta*

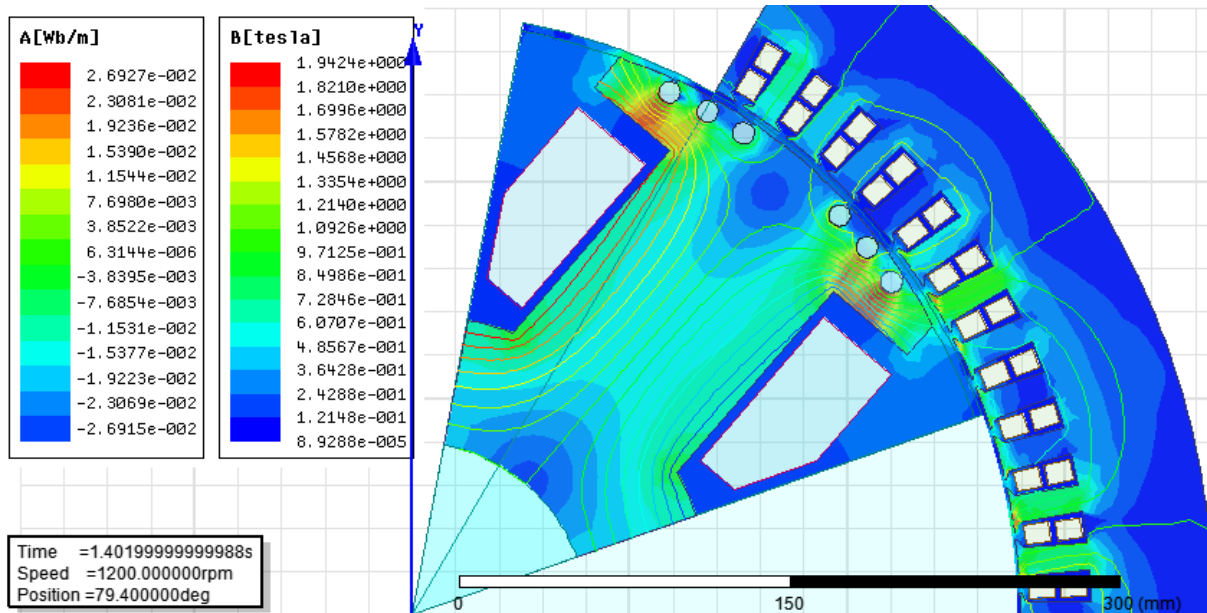


Figura 6.39 - Fluxo magnético e densidade de campo no rotor, estator e entreferro após a ocorrência do defeito.

No instante da figura 6.39 a máquina já está bem próxima do regime permanente, já é possível observar a desmagnetização do rotor e estator. É possível ver o campo induzido pelo enrolamento de campo. O efeito observado aqui é o mesmo observado nos outros casos, porém a intensidade do fluxo magnético é maior devido à maior excitação.

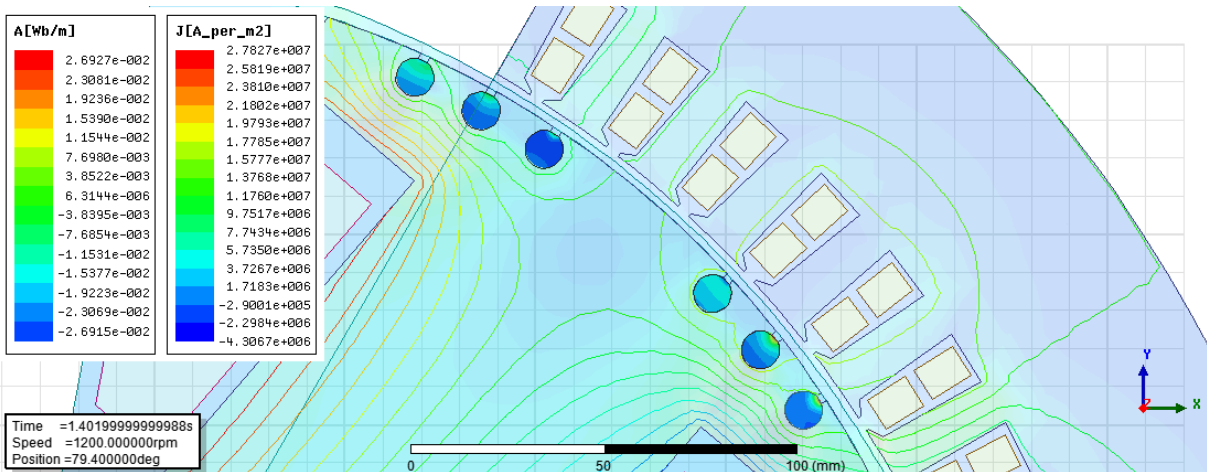


Figura 6.40 - Correntes induzidas no enrolamento amortecedor.

Na figura 6.40 observa-se a comprovação do regime permanente da máquina, uma vez que há poucas correntes induzidas ao longo das barras, apenas nas extremidades superiores devido às ranhuras.

6.4. Gerador com carga nominal sem enrolamento amortecedor

6.4.1. Simulação

Nesse caso serão utilizadas as mesmas configurações de carga para o caso 6.3, a única diferença é que os enrolamentos amortecedores também serão removidos. Para ser feita a remoção dos enrolamentos amortecedores o procedimento adotado será o mesmo adotado em 6.2, onde o material das barras amortecedoras será trocado de cobre para vácuo.

Feito isso é dado prosseguimento na simulação.

6.4.2. Resultados:

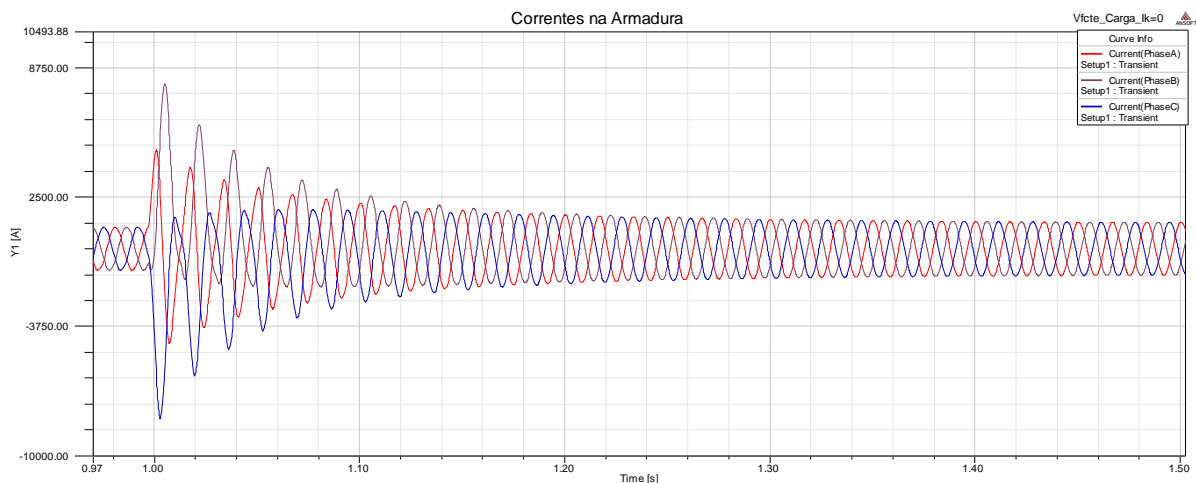


Figura 6.41 - Corrente de armadura para o gerador com carga e sem amortecedores.

$I_{a \text{ pico-antes do curto nas 3 fases}} = 1020 \text{ A} \rightarrow 0,39\% \text{ maior que a corrente nominal.}$

$I_{cc,a \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 4750 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 22,89\% \text{ em relação ao caso sem amortecedores.}$

$I_{cc,b \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = 8045 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 16,11\% \text{ em relação ao caso sem amortecedores.}$

$I_{cc,c \text{ pico} - 1^\circ \text{ ciclo}} = -8187,5 \text{ A} \rightarrow \text{Redução de } 20,7\% \text{ em relação ao caso sem amortecedores.}$

$I_{cc \text{ pico-regime permanente nas 3 fases}} = 1217,5 \text{ A}$

$\rightarrow \text{Redução de } 1,33\% \text{ em relação ao caso sem amortecedores.}$

Observa-se uma redução de aproximadamente 20% no 1º ciclo em relação ao caso com enrolamentos amortecedores essa redução também é consequência do desenvolvimento feito através das relações de (6.2) a (6.4).

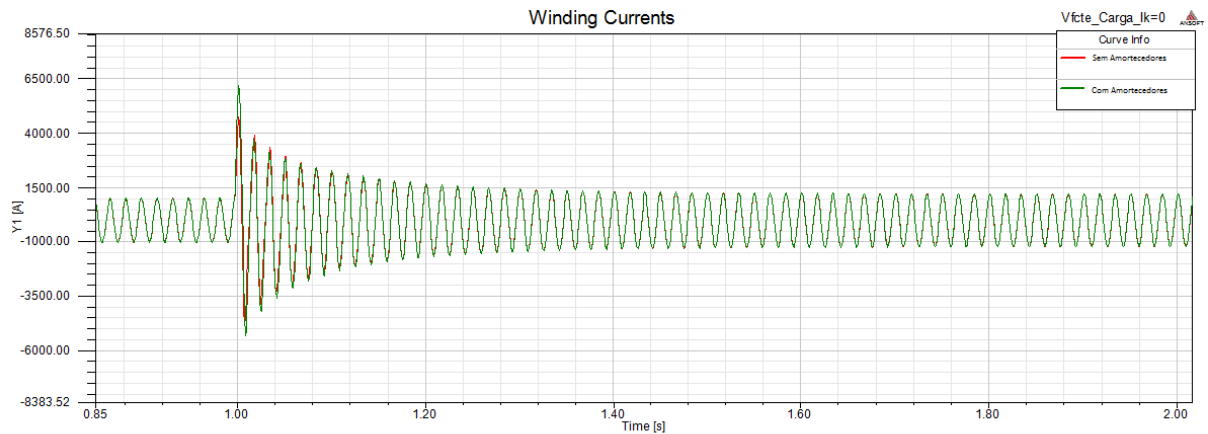


Figura 6.42 - Comparação entre as correntes de armadura na fase a entre os geradores com carga com e sem amortecedores.

Através dessa comparação da figura 6.42 pode-se observar que o efeito da ausência dos amortecedores é menor com a incidência da carga. No caso sem carga as diferenças entre as amplitudes é mais evidente especialmente no primeiro ciclo.

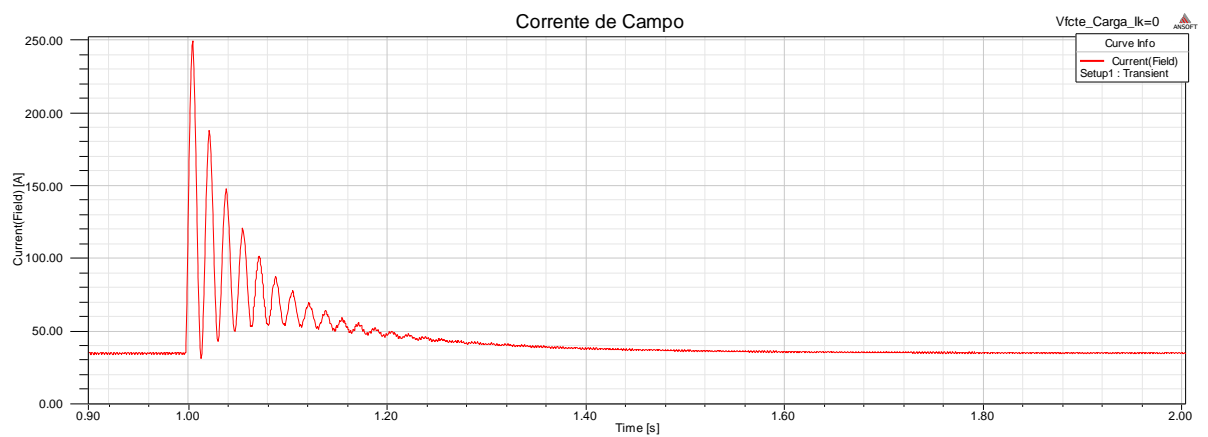


Figura 6.43 - Corrente de campo para o gerador com carga e sem amortecedores.

O pico de corrente para esse caso é de 248,25 A, o que significa um aumento de 18,21% no pico de corrente, sendo explicado pelo fato de que o enrolamento de campo terá uma requisição de corrente maior a fim de contrabalançar a brusca variação de enlace de fluxo magnético ocasionada pelas correntes desmagnetizantes que surgem no estator. Com a incidência da carga pode-se verificar que a variação percentual é levemente reduzida em comparação com o caso em vazio.

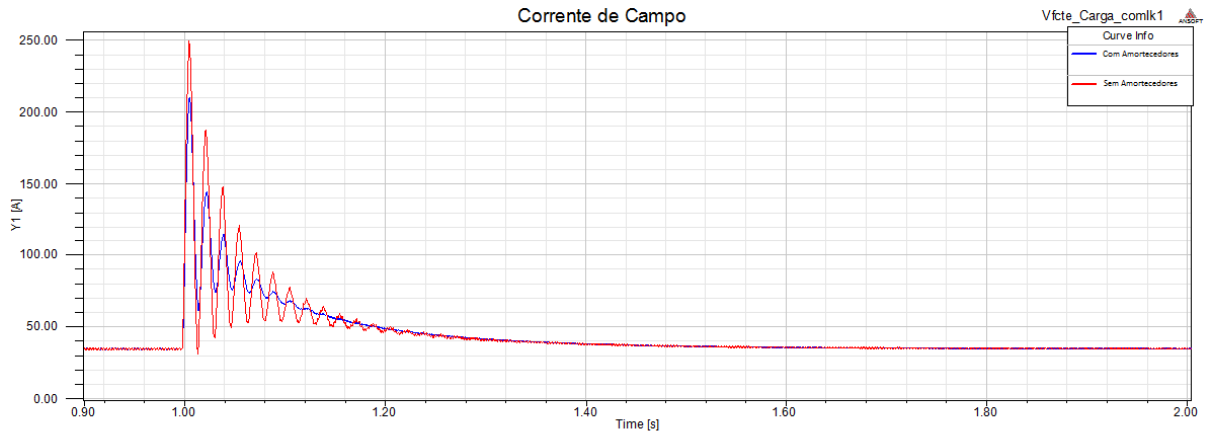


Figura 6.44 - Comparação entre as correntes de campo entre os geradores com e sem amortecedores.

Sem os enrolamentos amortecedores é possível observar que há uma oscilação muito maior na corrente de campo(figura 6.44).

- *Antes da falta*

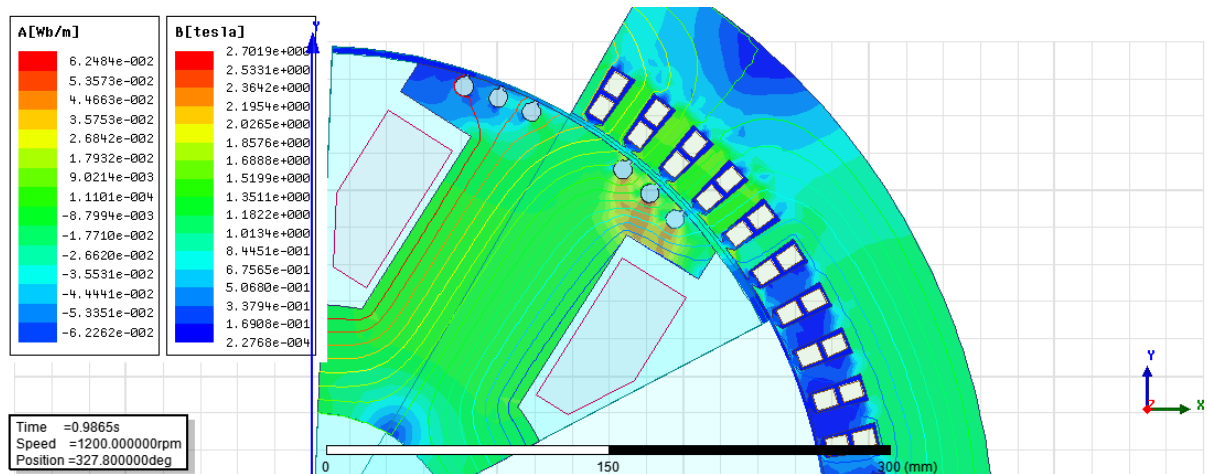


Figura 6.45 - Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor estator e entreferro.

Em regime permanente, antes do curto, não houve variações significativas em comparação ao caso com amortecedores, tanto com relação a distribuição do campo, quanto com a intensidade do fluxo, que nesse caso está levemente aumentada.

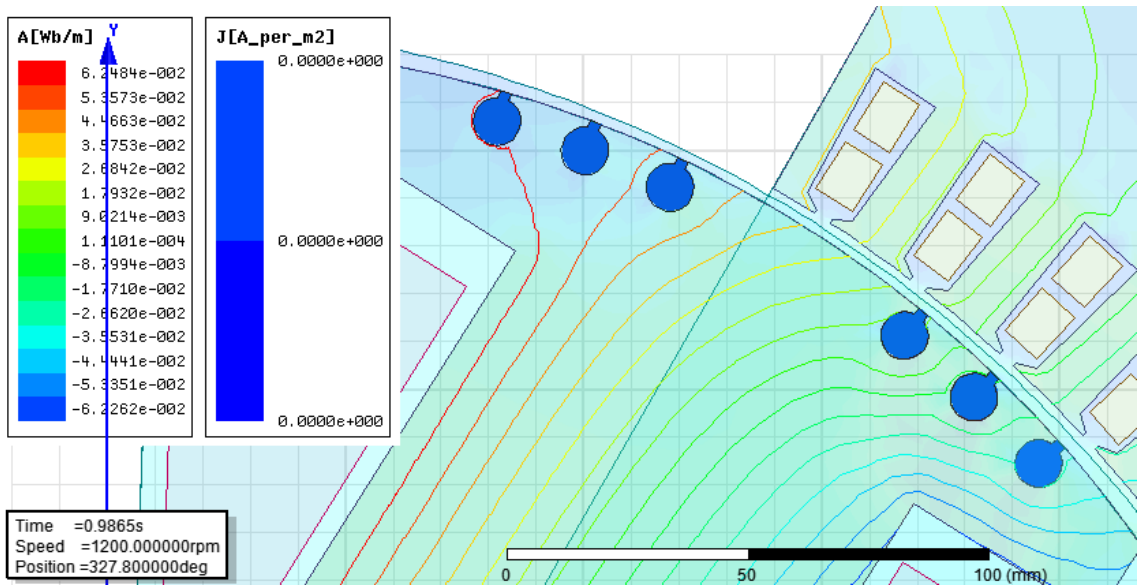


Figura 6.46 - Correntes no amortecedores.

Novamente pode-se observar na figura 6.46 que quando o cobre é trocado por vácuo nos amortecedores não há corrente induzida de nenhum tipo ali.

- *Durante a falta*

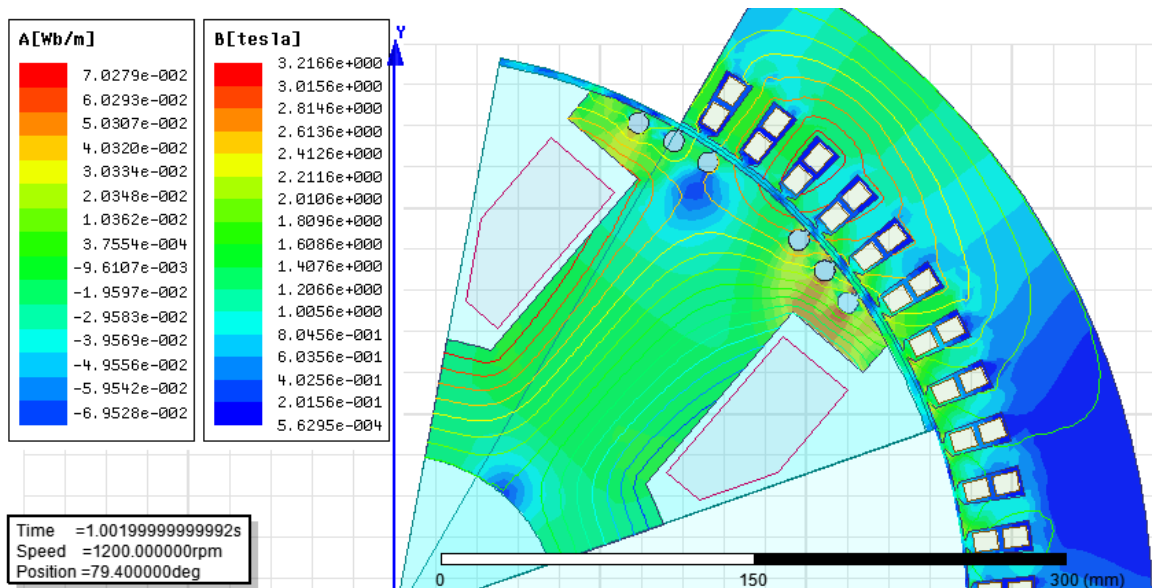


Figura 6.47 - Linhas de fluxo e densidade de campo magnético no rotor, estator e entreferro.

Na figura 6.47 não há variação na distribuição do fluxo em relação ao caso com enrolamentos amortecedores, salvo com relação a intensidade do fluxo magnético principalmente nas redondezas das ranhuras e nas extremidades do rotor. Nesse caso a intensidade do fluxo magnético no rotor é um pouco maior do que em relação ao caso com corrente nos amortecedores.

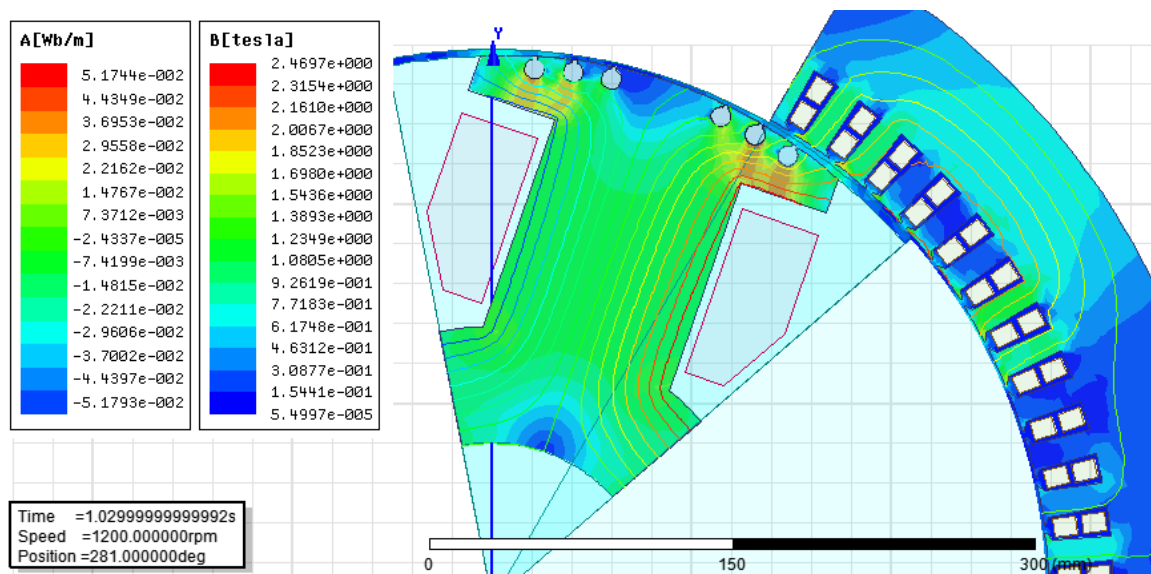


Figura 6.48 - Linhas de fluxo e densidade de campo magnético instantes depois do defeito.

Alguns instantes depois vemos que o campo magnético se torna mais uniforme (figura 6.48).

- *Depois da falta*

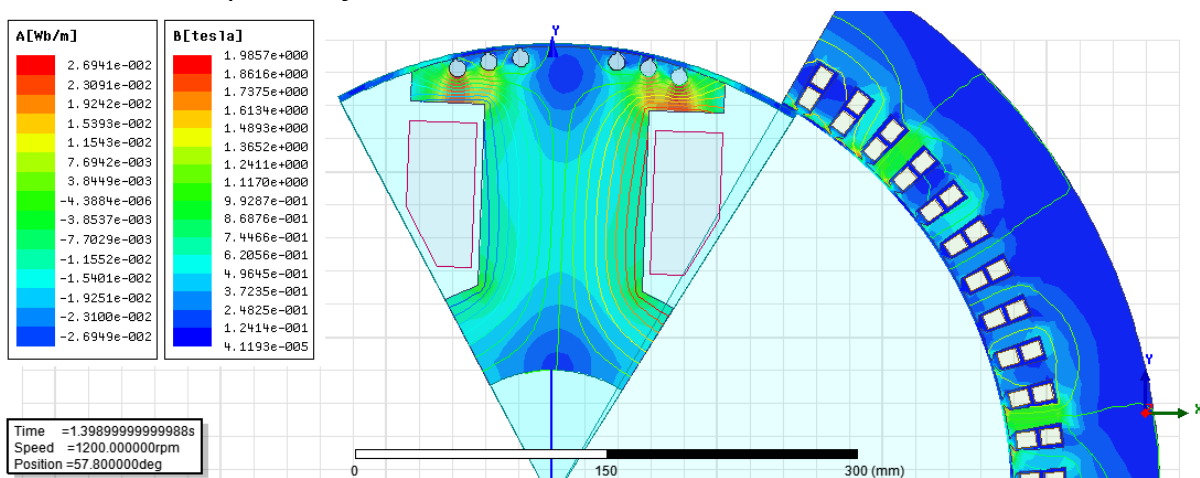


Figura 6.49 - Linhas de fluxo e densidade de campo no rotor estator e entreferro.

Uma vez que a máquina entra em regime permanente, não há variações entre os casos com e sem amortecedores.

A distribuição de correntes nos amortecedores nesse instante e no tempo anterior não será mostrada pois já sabemos que será nulo.

Dessa forma estão concluídas as simulações.

7. Conclusões

7.1. Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo mostrar o comportamento de um gerador síncrono de polos salientes durante o transitório de um curto circuito trifásico simétrico sob diferentes condições de carga, inclusive mostrar através do programa Maxwell os efeitos pertinentes no rotor, estator e entreferro quando os enrolamentos amortecedores são removidos. Este objetivo foi conseguido com sucesso.

A partir das simulações executadas foi possível observar que uma vez que a máquina atinge o regime permanente não há alterações, com a ausência ou presença dos enrolamentos amortecedores, evidenciando o fato que o modelo de máquina pode ser simplificado para uma impedância constante sob as condições de regime permanente.

Nas simulações, o principal conceito magnético da máquina síncrona pode ser observado com sucesso, “*o enlace de fluxo magnético num circuito fechado não pode variar instantaneamente*”[2] sendo visto que as correntes de campo e amortecimento se elevam a fim de compensar a desmagnetização do estator. O transitório da corrente de armadura alcança valores mais elevados no primeiros ciclos no caso com amortecedores devido ao fato de que a componente subtransitória é eliminada do sistema quando eliminamos os amortecedores. Quando os amortecedores são removidos, as correntes de campo atingem valores mais elevados no intuito de compensar a ausência dos amortecedores.

Outros efeitos importantes também puderam ser observados como a desmagnetização do estator na ocorrência do curto. Foi observada uma forte magnetização do rotor no instante de ocorrência da falta e no caso com carga nominal foi observado o efeito do ângulo de carga mostrado pela distorção das linhas de fluxo no rotor.

Uma observação interessante é que nos primeiros ciclos do curto circuito a máquina tem a tendência a se comportar da mesma forma que ela se comporta quando há uma carga no sistema.

Sendo assim foi possível uma observação bem sucedida dos principais efeitos transitórios que podem ocorrer num gerador síncrono de pólos salientes operando conectado a uma barra infinita durante uma falta trifásica simétrica, também chamado de curto circuito franco. Todos os resultados foram condizentes com a teoria proposta mostrando a validade do modelo teórico adotado e a validade do modelo adotado nas simulações.

7.2. Sugestão de trabalhos futuros

Seria interessante, se o estudo feito nesse trabalho fosse estendido no futuro para níveis de tensão e potência mais elevados e para condições de carga variável, conectando o gerador a modelos de carga relativos a motores síncronos ou motores de indução considerando os transitórios mecânicos.

Também é possível a indicação de trabalhos que mostrem a resposta da máquina para diferentes tipos de defeito, como faltas monofásicas e bifásicas.

8. Referências Bibliográficas

- [1] Kundur, Prabha. *Power System Stability and Control*. New York, McGraw-Hill, 1994.
- [2] FITZGERALD, A. E.; Kingsley, Charles; Umans, Stephen D. *Electric Machinery*. 5ª ed. London, McGraw-Hill, 1992.
- [3] Kosow, Irving. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. 15ª ed. São Paulo, Globo, 2005.
- [4] CHAPMAN, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*. 2ª ed., Nova Iorque, McGraw Hill, 2001.
- [5] Fernandes, João Leal. *Máquina Síncrona em Regime Transitório após Brusco Curto-Circuito no Estator*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.
- [6] Sadiku, Matthew N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 3ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2004.
- [7] Stevenson, William D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. Rio de Janeiro, McGraw Hill, 1974.
- [8] *Maxwell 2D- User Manual*, Ansoft, 2010.
- [9] *Brushless Exciters*. <http://www.electricmachinery.com/products-Brushless-Exciters.html>. 05/08/13.
- [10] *DT-5 Características e Especificações de Geradores*. <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. 05/08/2013
- [11] Rosan, Fabio. *Análise da partida do motor de indução trifásico pelo método dos elementos finitos*. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Setembro 2012.