



## SIMULAÇÃO DE FALTA NO ENROLAMENTO DE CAMPO DE GERADORES SÍNCRONOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

André da Cunha Schmidt

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro

Março de 2017

SIMULAÇÃO DE FALTA NO ENROLAMENTO DE CAMPO DE GERADORES  
SÍNCRONOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

André da Cunha Schmidt

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing

---

Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2017

Schmidt, André da Cunha

Simulação de falta no enrolamento de campo de geradores síncronos pelo método dos elementos finitos / André da Cunha Schmidt – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVIII, 100 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 99 - 100.

1. Curto circuito entre espiras do rotor 2. Gerador Síncrono 3. Sistema Interligado Nacional. I. Ferreira, Antonio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me dar saúde, força e perseverança para seguir em frente.

Aos meus pais, Elisabete e Evanir, que apostaram na minha educação.

Aos meus irmãos, Daniel e Aline, pelo apoio e pelos muitos bons momentos juntos.

A minha esposa Gisele e minha filha Valentina por me completarem diariamente.

Ao meu orientador Antonio Carlos Ferreira pela grande ajuda para fazer desse trabalho uma realidade.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## SIMULAÇÃO DE FALTA NO ENROLAMENTO DE CAMPO DE GERADORES SÍNCRONOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

André da Cunha Schmidt

Março/2017

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo sobre a detecção de curtos entre espiras do rotor – também chamadas de bobinas de campo - de geradores síncronos através da simulação de uma máquina típica de usinas termoelétricas que tem como força motriz turbinas estacionárias de grande porte (heavy duty ou não aeroderivadas). Nela é utilizada uma técnica de detecção já conhecida, a análise da variação do fluxo magnético no entreferro, e adaptada para o modelo de simulação computacional. A simulação é realizada pelo método dos elementos finitos através do software Maxwell com auxílio do pacote de modelagem de máquinas elétricas RMXprt, ambos de propriedade da Ansys. No estudo são propostos alguns cenários de defeitos, para que sejam observados os efeitos destes defeitos nos parâmetros operacionais da máquina. Como, na maioria dos casos, estes efeitos são de difícil observação durante a rotina de uma unidade operacional, serão analisadas as variações de fluxo magnético no entreferro e de parâmetros de saída da máquina em diversos cenários distintos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FAULT SIMULATION ON SYNCHRONOUS GENERATORS FIELD WINDINGS  
USING FINITE ELEMENTS METHOD

André da Cunha Schmidt

March/2017

Advisor: Antonio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

This work presents a study about rotor interturn short detection – also called as field coils – of synchronous generators through simulation of a typical machine of thermoelectrical power plants moved by heavy duty stationary turbines (not aeroderivative). It is applied a known detection technique, the air gap magnetic flux variation analysis, adapted to a computational simulation model. The simulation is performed by the finite elements method in the software Maxwell supported by its electrical machines modelling package RMXprt, both from Ansys property. In the study, some fault models are proposed, to observe the effect of those faults in the operational parameters of the machine. In the biggest part of the cases, these effects are hard to be observed during the operational routine, it will be analyzed the air gap magnetic flux variation and the machine's output parameters in many distinct scenarios.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. Motivação</b> .....	1
<b>1.2. Objetivo</b> .....	3
<b>1.3. Estrutura do trabalho</b> .....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	7
<b>2.1. Introdução</b> .....	7
<b>2.2. Causas da ocorrência de curto entre espiras do rotor</b> .....	8
<b>2.2.1. Problemas ocorridos na fabricação dos geradores:</b> .....	8
<b>2.2.2. Presença de objetos estranhos condutivos na superfície das espiras ou no material que as isola:</b> .....	8
<b>2.2.3. Dobras na fita de cobre:</b> .....	8
<b>2.2.4. Problemas ocorridos durante a operação normal da máquina:</b> .....	8
<b>2.2.5. Deterioração da isolação causada por estresse térmico</b> .....	8
<b>2.3. Efeitos da ocorrência de curto entre espiras do rotor</b> .....	9
<b>2.4. Seleção dos métodos a serem utilizados nas simulações</b> .....	12
<b>3. SIMULAÇÃO DA MÁQUINA LIVRE DE DEFEITOS</b> .....	15
<b>3.1. Introdução</b> .....	15
<b>3.2. Modelagem da máquina a ser simulada</b> .....	15
<b>3.3. Simulação da máquina</b> .....	18
<b>3.3.1. No RMXprt</b> .....	18
<b>3.3.2. No Maxwell 2D</b> .....	19
<b>3.3.3. Valores de referência, da máquina sem defeitos</b> .....	22
<b>4. SIMULAÇÕES DAS MÁQUINAS COM OS DEFEITOS PROPOSTOS</b> .....	35
<b>4.1. Introdução</b> .....	35
<b>4.2. Definição dos defeitos a serem inseridos</b> .....	36
<b>4.3. Máquina com curto na bobina #1</b> .....	38
<b>4.4. Máquina com curto na bobina #1 (todas as espiras em curto)</b> .....	45
<b>4.5. Máquina com curto na bobina #2</b> .....	52
<b>4.6. Máquina com curto na bobina #3</b> .....	59
<b>4.7. Máquina com curto na bobina #4</b> .....	65
<b>4.8. Máquina com curto na bobina #5</b> .....	70
<b>4.9. Máquina com curto na bobina #6</b> .....	77
<b>4.10. Máquina com curto na bobina #7</b> .....	83
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	89

<b>A. APÊNDICE A – Dados utilizados nas simulações</b> .....	91
<b>A.1. Dados da simulação da máquina base</b> .....	91
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	99



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - exemplo de rotor bobinado, com destaque às espiras de uma das bobinas .....	7
Figura 3-1 - Vista em corte transversal da máquina simulada (RMXprt) .....	16
Figura 3-2 - Vista em corte transversal da máquina simulada (Maxwell 2D).....	16
Figura 3-3 – representação, em três dimensões, do motor a ser simulado (Maxwell 3D) .....	17
Figura 3-4 - representação, em três dimensões, do motor a ser simulado (Maxwell 3D) .....	17
Figura 3-5 - detalhe do estator da máquina simulada.....	18
Figura 3-6 - Curvas "V" - relação entre corrente de excitação e da armadura .....	19
Figura 3-7 - tensões induzidas nos enrolamentos com a máquina sem carga .....	19
Figura 3-8 - Identificação das bobinas de medição testadas .....	20
Figura 3-9 - circunferências plotadas para a medição da densidade de fluxo radial no entreferro .....	23
Figura 3-10 - detalhe das circunferências plotadas para a medição da densidade de fluxo radial no entreferro .....	23
Figura 3-11 - densidade de fluxo radial a 5mm da superfície do rotor .....	24
Figura 3-12 - densidade de fluxo radial a 10mm da superfície do rotor .....	24
Figura 3-13 - densidade de fluxo radial a 15mm da superfície do rotor .....	24
Figura 3-14 - comparativo de densidade de fluxo radial nas três circunferências plotadas .....	25
Figura 3-15 - exemplo de linhas de fluxo saindo do polo do rotor e chegando ao estator .....	25
Figura 3-16 - comparativo de densidade de fluxo radial - 3600 x 0 rpm .....	26
Figura 3-17 - distribuição de correntes pelos condutores da máquina livre de defeitos .....	27
Figura 3-18 - Detalhe das bobinas de medição da 1a linha a 12mm de distância do rotor .....	27
Figura 3-19 - fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos.....	28
Figura 3-20 -derivada do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos .....	28
Figura 3-21 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos .....	29
Figura 3-22 - variação do fluxo na bobina 1M, para a máquina em carga e sem defeitos .....	29
Figura 3-23 - variação do fluxo na bobina 1G, para a máquina em carga e sem defeitos.....	29
Figura 3-24 - variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga e sem defeitos .....	30
Figura 3-25 - variação do fluxo na bobina 2M, para a máquina em carga e sem defeitos .....	30
Figura 3-26 - variação do fluxo na bobina 2G, para a máquina em carga e sem defeitos.....	30
Figura 3-27 - variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga e sem defeitos .....	31
Figura 3-28 - variação do fluxo na bobina 3M, para a máquina em carga e sem defeitos .....	31
Figura 3-29 - variação do fluxo na bobina 3G, para a máquina em carga e sem defeitos.....	31
Figura 3-30 - variação do fluxo na bobina 4P, para a máquina em carga e sem defeitos .....	32
Figura 3-31 - variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga e sem defeitos.....	32
Figura 3-32 - variação do fluxo na bobina alinhada com a ranhura, para a máquina em carga e sem defeitos.....	33
Figura 3-33 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga e sem defeitos .....	33
Figura 5-1 - circuito externo utilizado para realizar a simulação do teste de curto circuito .....	35
Figura 5-2 - configuração da bobina no Maxwell 2D .....	37
Figura 5-3- exemplo de posição dos condutores de uma mesma bobina do circuito de campo..	37
Figura 5-4 – identificação das bobinas que terão curtos inseridos.....	38
Figura 5-5 - posição da bobina #1, na qual o curto foi aplicado .....	38
Figura 5-6 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #1 .....	39
Figura 5-7 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #1 .....	39
Figura 5-8 - variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #1 .....	39

Figura 5-9 - variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #1 .....	40
Figura 5-10 - variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga curto na bobina #1 ....	40
Figura 5-11 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1 .....	41
Figura 5-12 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1 .....	41
Figura 5-13-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1 .....	41
Figura 5-14-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1 .....	42
Figura 5-15-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1 .....	42
Figura 5-16 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1 .....	43
Figura 5-17-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1 .....	43
Figura 5-18-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1 .....	43
Figura 5-19-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1 .....	44
Figura 5-20-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1 .....	44
Figura 5-21 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto na bobina #1..	45
Figura 5-22 - posição da bobina #1, na qual o curto total foi aplicado .....	45
Figura 5-23 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	46
Figura 5-24-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	46
Figura 5-25-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	46
Figura 5-26-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	47
Figura 5-27-variação do fluxo na bobina 4G,para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	47
Figura 5-28 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1 .....	48
Figura 5-29 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1 .....	48
Figura 5-30-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1 .....	48
Figura 5-31-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1 .....	49
Figura 5-32-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1 .....	49
Figura 5-33 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1 .....	50
Figura 5-34-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1 .....	50

Figura 5-35-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1 .....	51
Figura 5-36-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1 .....	51
Figura 5-37-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1 .....	52
Figura 5-38 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto total na bobina #1 .....	52
Figura 5-39 - posição da bobina #2, na qual o curto foi aplicado .....	53
Figura 5-40 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #2 .....	53
Figura 5-41-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #2 .....	54
Figura 5-42-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #2 .....	54
Figura 5-43-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #2 .....	54
Figura 5-44-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto na bobina #255	
Figura 5-45 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2 .....	55
Figura 5-46 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2 .....	55
Figura 5-47-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2 .....	56
Figura 5-48-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2 .....	56
Figura 5-49-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2 .....	56
Figura 5-50 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2 .....	57
Figura 5-51-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2 .....	57
Figura 5-52-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2 .....	57
Figura 5-53-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2 .....	58
Figura 5-54-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2 .....	58
Figura 5-55 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto na bobina #2..	59
Figura 5-56 - posição da bobina #3, na qual o curto foi aplicado .....	59
Figura 5-57 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #3 .....	60
Figura 5-58-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #3 .....	60
Figura 5-59-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #3 .....	60
Figura 5-60-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #3 .....	61
Figura 5-61-variação do fluxo na bobina 4G para a máquina em carga com curto na bobina #361	
Figura 5-62 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3 .....	61

Figura 5-63 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3 .....	62
Figura 5-64-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3 .....	62
Figura 5-65-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3 .....	62
Figura 5-66-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3 .....	63
Figura 5-67 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3 .....	63
Figura 5-68-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3 .....	63
Figura 5-69-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3 .....	64
Figura 5-70-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3 .....	64
Figura 5-71-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3 .....	64
Figura 5-72 - posição da bobina #4, na qual o curto foi aplicado .....	65
Figura 5-73 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #4 .....	65
Figura 5-74-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #4 .....	66
Figura 5-75-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #4 .....	66
Figura 5-76-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #4 .....	66
Figura 5-77-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto na bobina #4 .....	67
Figura 5-78 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4 .....	67
Figura 5-79 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4 .....	67
Figura 5-80-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4 .....	68
Figura 5-81-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4 .....	68
Figura 5-82-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4 .....	68
Figura 5-83 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4 .....	69
Figura 5-84-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4 .....	69
Figura 5-85-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4 .....	69
Figura 5-86-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4 .....	70
Figura 5-87-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4 .....	70
Figura 5-88 - posição da bobina #5, na qual o curto foi aplicado .....	71
Figura 5-89 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #5 .....	71

Figura 5-90-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #5	72
Figura 5-91-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #5	72
Figura 5-92-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #5	72
Figura 5-93-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto na bobina #5	73
Figura 5-94 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5	73
Figura 5-95 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5	73
Figura 5-96-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5	74
Figura 5-97-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5	74
Figura 5-98-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5	74
Figura 5-99 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5	75
Figura 5-100-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5	75
Figura 5-101-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5	75
Figura 5-102-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5	76
Figura 5-103-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5	76
Figura 5-104 - posição da bobina #6, na qual o curto foi aplicado	77
Figura 5-105 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #6	77
Figura 5-106-variação do fluxo na bobina 1P, para máquina em carga com curto na bobina #6	78
Figura 5-107-variação do fluxo na bobina 2P, para máquina em carga com curto na bobina #6	78
Figura 5-108-variação do fluxo na bobina 3P, para máquina em carga com curto na bobina #6	78
Figura 5-109-variação do fluxo na bobina 4G, para máquina em carga com curto na bobina #6	79
Figura 5-110 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6	79
Figura 5-111 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6	79
Figura 5-112-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6	80
Figura 5-113-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6	80
Figura 5-114-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6	80
Figura 5-115 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6	81
Figura 5-116-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6	81

Figura 5-117-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6 .....	81
Figura 5-118-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6 .....	82
Figura 5-119-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6 .....	82
Figura 5-120 - posição da bobina #7, na qual o curto foi aplicado .....	83
Figura 5-121 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #7 ....	83
Figura 5-122-variação do fluxo na bobina 1P, para máquina em carga com curto na bobina #7	84
Figura 5-123-variação do fluxo na bobina 2P, para máquina em carga com curto na bobina #7	84
Figura 5-124 -variação do fluxo na bobina 3P, para máquina em carga com curto na bobina #7 .....	84
Figura 5-125-variação do fluxo na bobina 4G, para máquina em carga com curto na bobina #7 .....	85
Figura 5-126 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7 .....	85
Figura 5-127 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7 .....	85
Figura 5-128-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7 .....	86
Figura 5-129-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7 .....	86
Figura 5-130-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7 .....	86
Figura 5-131 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7 .....	87
Figura 5-132-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7 .....	87
Figura 5-133-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7 .....	87
Figura 5-134-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7 .....	88
Figura 5-135-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto .....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela A-1 - dados gerais da máquina a ser simulada.....	91
Tabela A-2 - Dados do estator.....	91
Tabela A-3 - dados do enrolamento do estator.....	92
Tabela A-4 - dados do rotor .....	92
Tabela A-5 - dados do enrolamento de campo.....	93
Tabela A-6 - alguns fatores importantes e dados de consumo de material .....	93
Tabela A-7 - parâmetros saturados de regime permanente .....	94
Tabela A-8 - dados magnéticos da máquina sem carga .....	94
Tabela A-9 - dados magnéticos a plena carga.....	95
Tabela A-10 - dados elétricos da máquina a plena carga .....	96
Tabela A-11 - parâmetros transitórios, constantes de tempo e dados de MEF para a simulação	96
Tabela A-12 - parâmetros transitórios, constantes de tempo .....	96
Tabela A-13 - dados de entrada do MEF transitório .....	97

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MEF	Método dos elementos finitos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional



## SÍMBOLOS

V	Tensão eficaz, em Volts (V)
I	Corrente eficaz, em Amperes (A)
L	Indutância, em Henrys (H)
s	segundo, medida de tempo (s)
J	Densidade de corrente, em Ampéres por metro quadrado (A/m <sup>2</sup> )
P <sub>IN</sub>	Potência mecânica fornecida ao eixo do gerador pela máquina motriz, em Watts (W)
P <sub>OUT</sub>	Potência elétrica de saída do gerador, em Watts (W)
S	Potência aparente, em MVA
Q	Potência reativa, em MVA <sub>r</sub>
B	Fluxo magnético, em Tesla
B <sub>r</sub>	Fluxo magnético radial, em Tesla
V <sub>f</sub>	Tensão de campo (fornecida pelo sistema de excitação), em Volts
I <sub>f</sub>	Corrente de campo (fornecida pelo sistema de excitação), em Ampéres
R <sub>f</sub>	Resistência de campo (dos enrolamentos do rotor, na máquina síncrona), em Ohms
I <sub>f0</sub>	Corrente inicial de campo (corrente inicial fornecida pelo sistema de excitação), em Ampéres
R <sub>sc</sub>	Resistência de curto, em Ohms
rpm	rotações por minuto

## SUBSCRITOS

f	dados referentes ao campo da máquina. Relativos aos enrolamentos do rotor no caso da máquina síncrona.
f0	dados iniciais referentes ao campo da máquina. Relativos aos enrolamentos do rotor no caso da máquina síncrona.
SC	curto circuito
IN	dados de entrada da máquina, fornecidos a ela
OUT	dados de saída da máquina, fornecidos por ela

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

O uso de energia é primordial para quase todas as atividades que exercemos diariamente. A energia empregada nas diversas atividades pode variar, vindo diretamente de combustíveis fósseis - gás natural, carvão, derivados do petróleo, etc - ou de energia elétrica, que é largamente utilizada e tem papel bastante relevante atualmente na vida de toda a população, direta ou indiretamente. A economia brasileira tem se transformado, com crescente participação de seu setor industrial e de prestação de serviços bem como da modernização dos processos agrícolas. Assim há maior dependência da energia elétrica em seus processos produtivos. Até mesmo o consumo residencial tem apresentado mudanças, como as decorrentes da verticalização das residências que necessitam de elevadores para transporte de pessoas e de sistemas de bombeamento de água, além de novos equipamentos de consumo como microcomputadores, por exemplo. Conseqüentemente, a garantia do suprimento energético se torna ainda mais valiosa para todos.

A matriz energética brasileira é baseada em energia hidroelétrica, sendo que esse tipo de fonte normalmente opera na base do sistema, ou seja, durante todo o tempo que estão disponíveis, enquanto a energia termoelétrica opera de forma complementar ao sistema, operando de forma a suprir as necessidades do sistema não atendidas pelas fontes hidroelétricas. Outras fontes, tais como eólica e solar ainda completam essa matriz, mas ainda têm um papel menos preponderante no sistema e seu planejamento da operação.

O sistema interligado nacional (SIN) é o sistema que interliga eletricamente quase a totalidade do território do Brasil (exceto, atualmente, parte da região norte do país). Essa interligação traz maior segurança para o sistema como um todo, tendo opções para manobras e diferentes possibilidades para o transporte da energia entre dois pontos do sistema, conferindo-lhe robustez. Porém, mesmo com toda a robustez do SIN pode haver fragilidades, causadas por defeitos ou mesmo durante manutenções locais da rede que podem tornar o sistema, ou parte dele, vulnerável. Nesses casos, a falta de geração ou de uma linha de transmissão em algum ponto pode acarretar na falta de energia em alguma região. Além disso, a perda de grandes blocos de energia pode acarretar em perturbações/oscilações e, conseqüentemente, perdas significativas para o SIN. Quando há perda de um grande gerador esse tipo de problema pode vir a ocorrer, o que é altamente

indesejável, por isso a manutenção preventiva tem papel primordial na continuidade operacional confiável das unidades geradoras.

Dentre as diversas manutenções preventivas e preditivas realizadas nas unidades geradoras, que normalmente são máquinas síncronas, e seus sistemas auxiliares há uma que pouco é realizada, é a detecção de curto entre espiras do enrolamento do rotor (ou das bobinas do enrolamento de campo) [1]. A falta dessa verificação pode trazer grandes perdas tanto para o SIN, com a perda da energia entregue, como diretamente para o agente gerador, no caso de ocorrência de curtos entre espiras do rotor não detectados.

Dentre os prejuízos do agente gerador pode destacar a perda de garantia física, que é a média móvel do montante de energia que cada unidade geradora declarou como disponível e entregou ao SIN quando foi solicitada a gerar nos últimos 60 meses. Essa garantia física é a quantidade máxima de energia que pode ser comercializado para esta unidade geradora. Podemos citar também as penalidades por não entregar a energia já vendida em leilão, neste caso o gerador deve contratar de outro gerador, a quantidade de energia que devia ter gerado, no mercado de curto prazo (que em geral é bem mais caro) como uma forma de compensar a energia que deixou de gerar. Em unidades fabris, onde o gerador é autoprodutor deixou de gerar de energia, a falta de energia pode causar perda de produção pelo tempo da fábrica parada, perda de insumos que já iniciaram, mas não terminaram o processamento (estão “em linha”).

Curto entre espiras do rotor podem ocorrer por problemas originados desde a fabricação até ao envelhecimento natural da isolação entre espiras e/ou bobinas do rotor, que pode vir a falhar. Porém, a detecção deste problema não é fácil pois é possível que a máquina continue a operar normalmente com algumas espiras em curto sem que seja percebida, pois a alteração dos parâmetros operacionais costuma ser bastante sutil em seu início, quando ainda há poucas de espiras em curto.

Para realizar essa detecção muitos estudos e métodos já foram propostos, tanto para monitoramento online (com a máquina em operação) quanto para off-line (com a máquina fora de operação). Os métodos online vêm demonstrando melhor desempenho na tarefa de detecção de curto entre espiras do rotor, pois na ausência da força centrífuga, que acaba por comprimir as espiras umas contra as outras e aproximar ainda mais pontos adjacentes que estejam com algum problema na isolação, alguns defeitos podem ser ocultados. Entre os métodos de detecção online destacam-se os que monitoram a alteração do fluxo

magnético no entreferro [1], [3], [5] e [6], os que monitoram a vibração do gerador [1], [2], [3], [4] e [5], e os que se baseiam na tensão do eixo como valor de referência para detecção [5], [8], [9], [10], [11] e [12]. Essa tensão é medida entre o eixo e a referência (terra) por meio de um circuito de medição específico e, além de outras causas, tem como motivo de sua ocorrência o curto entre espiras do rotor e entre espira e o corpo do rotor.

Estudos nesta área têm sido realizados desde o fim da década de 1950 [1] até os dias de hoje [15] e [16], as pesquisas realizadas buscam um método de detecção mais eficaz e economicamente viável.

Atualmente, existem equipamentos sendo comercializados para realizar esta tarefa e a maioria se utiliza do método de medição da variação do fluxo magnético no entreferro para detectar curtos entre espiras do rotor. Este tipo de equipamento, apesar de já estar há algum tempo no mercado, ainda carece de melhorias para aumentar a confiabilidade das medições do equipamento, que ainda requer algumas adaptações para cada gerador diferente em que é instalado, além de necessitar de uma parada da máquina para sua instalação, caso o sistema não venha instalado de fábrica na máquina.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo deste trabalho é auxiliar na descoberta da ocorrência de curtos entre espiras do rotor, evitando paradas forçadas, programando os reparos e, com o acompanhamento da evolução do defeito, decidir quando e como fazer este reparo, isso se ele for realmente necessário. Por isso é sugerida monitoração do problema de maneira constante ou periódica para antecipar a detecção de uma falha e, conseqüentemente, a tomada de decisão.

Contudo, uma situação que deve ser evitada é a detecção errônea de curto entre espiras do rotor, pois o investimento de tempo e dinheiro necessários para a realização do reparo desnecessário é elevado e trará um grande prejuízo para a companhia de geração, o que dá ainda mais importância a um método de detecção confiável e preciso.

Detectar se há curto entre espiras do rotor, a quantidade de espiras afetadas e sua localização são de fundamental importância para definir se a máquina pode conviver com o problema e continuar sendo monitorado ou se o reparo deverá ser realizado e de que forma ele se dará, pois este é um defeito com o qual podemos conviver caso o prejuízo operacional para a máquina seja aceitável técnica e financeiramente. Com o planejamento do reparo muitos prejuízos são evitados tais como os já citados por conta de o agente

deixar de gerar até realizar um reparo de menor custo, realizando-o de forma programada, e não de emergência, pois o reparo deste tipo de problema é complexo, necessita da retirada do rotor para sua execução, o que requer um longo tempo com a máquina parada, e isto eleva em muito o custo total do reparo.

Para isso serão realizadas simulações computacionais, no software Ansys com seu complemento para simulação máquinas elétricas e seu pacote eletromagnético Maxwell que utiliza o método dos elementos finitos para realização dos cálculos, além de outros complementos específicos para simulação de máquinas elétricas.

Inicialmente será simulada uma máquina livre de defeitos, que será tomada como referência. Depois serão inseridos alguns tipos de defeitos para observar seus efeitos nos parâmetros observados da máquina. Para isso serão utilizados métodos já descritos na literatura e adaptados para uma simulação computacional em elementos finitos. Será utilizada uma máquina típica de unidades termoeletricas no Brasil que tem como força motriz uma turbina de grande porte (heavy duty, não areoderivada), em geral maiores que 100 MVA, nos quais os sinais de entrada e saída que serão observados têm maiores amplitudes e, com isso, as variações podem ser melhor percebidas, o que é favorável para o método proposto. Porém, o método pode ser estendido tanto para máquinas menores quanto para hidrogeradores, mas ambos os casos necessitam de validações e adaptações relativas à forma construtiva das máquinas.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

O trabalho está estruturado em Cinco capítulos, sendo que esse primeiro consta da apresentação geral do tema da pesquisa, sua motivação, justificativa e objetivo no contexto atual.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as causas dos curtos entre espiras e seus métodos de detecção já descritos na literatura.

O terceiro capítulo fala sobre a simulação da máquina sem defeitos, que será utilizada como parâmetro para comparação com as máquinas com os defeitos que serão inseridos. Nele também será descrita a máquina em todos os seus aspectos construtivos, que podem influenciar no resultado da simulação e na definição dos tipos de defeitos a serem inseridos já no capítulo seguinte.

O capítulo quatro apresentará os defeitos a serem inseridos na máquina, incluindo as bases prática e teórica que levaram à escolha de cada tipo de defeito e como cada um

deles será utilizado nos possíveis cenários em duas dimensões. Todos esses cenários serão descritos simulados e analisados.

Para finalizar o trabalho, o quinto capítulo traz a conclusão de todos os capítulos anteriores, comentando os pontos fortes e fracos do método além de suas limitações.





## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

Neste capítulo será realizado um levantamento bibliográfico sobre a ocorrência e métodos de detecção de curtos entre espiras do rotor de máquinas síncronas, tendo abordagem voltada para geradores, também aplicável a motores, mas com as devidas adaptações.

As bobinas de campo de geradores síncronos são alimentadas em corrente contínua por fonte externa e com o giro fornecido por uma fonte mecânica a ele acoplada forma o campo magnético girante em relação às bobinas do estator, nas quais a tensão será induzida por conta desse movimento relativo. As bobinas do rotor são constituídas por uma sequência de espiras ligadas em série. Para grandes máquinas essas espiras são, normalmente, chapas de cobre isoladas entre si por fitas isolantes e/ou banhadas em resina isolante, que varia por conta do tamanho da máquina e da tecnologia de fabricação, para garantir a isolamento elétrico entre espiras adjacentes e a homogeneidade esperada do campo magnético estático em relação ao rotor. Assim a bobina é formada por uma longa fita de cobre com o comprimento total da bobina, que é dobrada e conformada para ter o formato final da bobina. Dessa forma, a bobina se assemelha a uma “pilha de espiras” e, por isso, qualquer falha de isolamento entre duas ou mais espiras adjacentes poderá levar à ocorrência de curto entre elas.

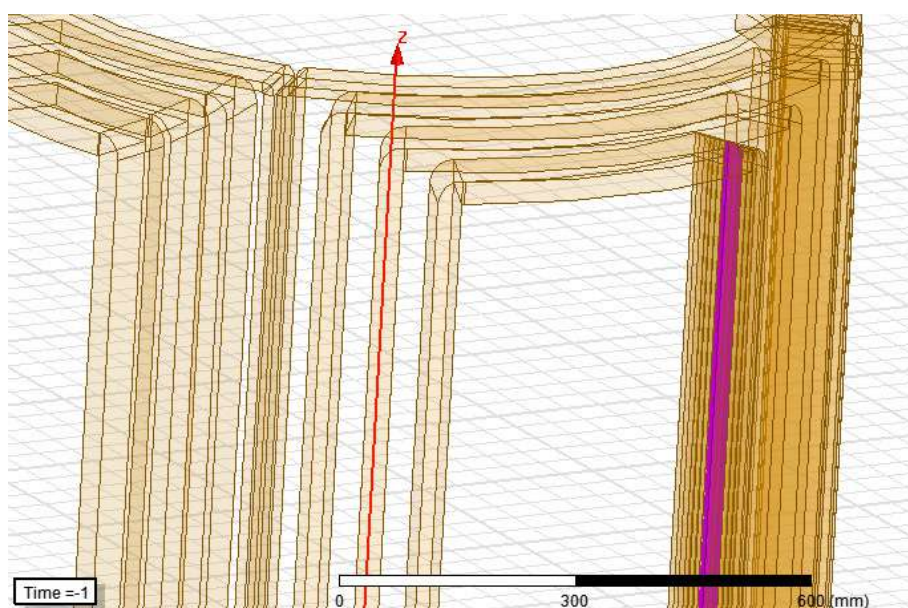


Figura 2-1 - exemplo de rotor bobinado, com destaque às espiras de uma das bobinas

## 2.2. Causas da ocorrência de curto entre espiras do rotor

A isolação da máquina é projetada para resistir a estresses elétricos, térmicos e mecânicos. O curto entre espiras é o resultado de falha na isolação entre espiras do rotor, que é uma ocorrência relativamente comum em geradores de grande porte, porém, geralmente, não chega a causar grandes danos ou problemas operacionais. Abaixo, serão listados os principais eventos causadores desse tipo de ocorrência [1], [2] e [3].

**2.2.1. Problemas ocorridos na fabricação dos geradores:** originados no processo de isolação elétrica das bobinas, que podem já vir de fábrica com curto entre espiras adjacentes ou podem facilitar essa ocorrência por conta de uma das espiras já estar com problemas na isolação restando apenas outra espira ter problemas durante a operação para que elas entrem em curto.

**2.2.2. Presença de objetos estranhos condutivos na superfície das espiras ou no material que as isola:** provenientes tanto do processo de fabricação da máquina quanto de outras partes da máquina (ou de fontes externas) durante a sua operação. Isso pode facilitar o rompimento da isolação naquele ponto, principalmente com a influência da temperatura, da força centrífuga e do envelhecimento da isolação da máquina.

**2.2.3. Dobras na fita de cobre:** na fase de montagem da bobina podem ocorrer rugas (ou ondulações) em suas proximidades e, esses pontos passam a ser pontos de possível fragilidade da isolação elétrica que será aplicada na bobina, pois a irregularidade da superfície do material pode vir a se tornar ponto de concentração de tensões mecânicas quando a máquina estiver em giro e, com o passar do tempo desta em operação, esse ponto da isolação elétrica pode vir a colapsar e se tornar um ponto de condução de corrente através da isolação.

**2.2.4. Problemas ocorridos durante a operação normal da máquina:** que trabalha sob a influência da compressão, deslocamento e torção das bobinas causadas pela força centrífuga, além da temperatura elevada do rotor do gerador em operação, ou simplesmente pelo envelhecimento do material isolante da máquina. Sob essas influências pode ocorrer o movimento relativo entre espiras adjacentes ou entre espiras e ranhuras, causando desgaste no cobre, ferro e/ou no material isolante, pois com a elevação da temperatura do rotor, após sua entrada em operação, há expansão dos metais. Além disso pode haver contaminação na isolação causada por detritos condutores vindos de outras partes do gerador, de máquinas próximas ao gerador, ou até que tenham vindo do processo de fabricação e montagem da máquina, que pode ter como consequência a ruptura da isolação de uma ou mais espiras.

**2.2.5. Deterioração da isolação causada por estresse térmico:** ocorre principalmente em máquinas mais antigas, já com longo tempo em operação, com a isolação elétrica antiga e que esteja operando ou já tenha operado por longos períodos com temperatura acima do que a máquina foi projetada para operar.

Além das causas já descritas, que são as mais comuns e conhecidas, podemos ter outros mecanismos de falha ou a conjunção de dois ou mais fatores que possam levar à falha da isolação elétrica das espiras da bobina de campo de uma máquina síncrona.

### 2.3. Efeitos da ocorrência de curto entre espiras do rotor

Em muitos casos o rotor continuará a operar sem consequências significativas, enquanto a falha não for percebida nenhuma ação será tomada para monitorar, evitar a evolução ou solucionar o problema. Os métodos de detecção de curtos entre espiras do rotor de máquinas síncronas podem ser separados em dois grandes grupos, os métodos de detecção online, que são os utilizados com a máquina em operação, e os métodos off-line, que são utilizados com a máquina parada, fora de operação.

Alguns métodos de detecção off-line são conhecidos e utilizados. Porém, muitos defeitos acabam ocultos com a máquina parada, pois a ausência da força centrífuga modifica algumas interfaces entre partes do rotor. Sem esta força não há compressão entre espiras adjacentes ou entre espira e núcleo, por exemplo, o que pode fazer com que um curto esteja ou não presente em uma região com falha na isolação entre duas espiras ou entre espira e núcleo.

A tabela 1 mostra os principais efeitos percebidos quando da ocorrência do curto entre espiras do rotor, os principais métodos de detecção e causas desses efeitos.

Efeito	Motivação da ocorrência	Métodos de detecção	Observações
Vibração [1], [2], [3], [4] e [5]	Espiras em curto causam alteração no valor de Amperes x Espiras no ponto da falta causando deformação no campo magnético girante do rotor em relação ao estator. Esse desbalanço magnético causa vibração na máquina.	Sensores de vibração (axial e radial) instalados nos mancais da máquina.	Vibração normalmente é relacionada a desalinhamento e desbalanceamento da máquina. É comum, as máquinas possuírem, pelo menos, um par de sensores de vibração em cada mancal separados em 90°, pois com essa configuração pode-se gerar o gráfico da órbita do eixo dentro do mancal e com isso conseguir um indicativo de onde pode haver problemas no rotor.

<p>Variação do fluxo magnético no entreferro [1], [3], [5] e [6]</p>	<p>Espiras em curto causam alteração no valor de Amperes x Espiras no ponto da falta causando deformação no campo magnético girante do rotor no entreferro.</p>	<p>Bobina de medição instalada no núcleo do estator da máquina tem em sua saída induzida uma tensão proporcional ao fluxo magnético ao qual ele está submetido. O ponto de deformação do campo magnético resultará em uma menor tensão de saída na bobina de medição e também indica a bobina na qual o curto está localizado.</p>	<p>Método mais difundido atualmente e o único comercialmente disponível. Requer parada da máquina para instalação do equipamento, além do grande investimento para sua aquisição. Em máquinas refrigeradas a hidrogênio, um furo adicional na carcaça pode conferir mais um ponto de fragilidade a esse sistema.</p>
<p>Elevação da temperatura [6]</p>	<p>O curto tem resistência superior à resistência da espira e, com isso há maior perda por efeito Joule. Isso pode comprometer ainda mais a isolamento na região do curto e fazer com que o curto avance para espiras adjacentes.</p>	<p>Sensores de temperatura instalados pelo estator, mancais e entradas e saídas dos fluidos de arrefecimento (ar, ar-água, nitrogênio, etc.) da máquina.</p>	<p>A posição relativa entre o ponto de curto e os sensores de temperatura pode influenciar na detecção dessa elevação de temperatura. O rotor em giro atrapalha essa detecção, para pequenas elevações de temperatura.</p>
<p>Elevação da corrente de excitação [1], [4], [6] e [7]</p>	<p>O sistema de excitação da máquina tenta compensar a falta de fluxo magnético no entreferro causada pelo curto e que acarreta em alterações nos parâmetros elétricos de saída da máquina. A malha de controle fechado desse sistema atua de forma a manter constantes os parâmetros de saída da máquina.</p>	<p>O sistema de excitação tem como padrão a medição da corrente de fornecida, sendo que essa ainda faz parte da malha de controle do sistema.</p>	<p>Para uma quantidade grande de espiras em curto pode ser que o sistema não tenha condição de suprir essa corrente adicional.</p>

<p>Variação da resistência do circuito de campo [1], [5], [6], [7] e [8]</p>	<p>Com um curto entre espiras a resistência equivalente do circuito de campo é alterada.</p>	<p>Esse valor pode ser medido com a máquina parada e deve ser comparado com as medições anteriores. Caso a medição seja realizada com a máquina em operação, durante a aceleração da máquina já será percebida a alteração no valor da resistência do circuito de campo. Esse medidor, do tipo vetorial, é conectado ao sistema que alimenta o capo do rotor, e não é comum nesse tipo de máquina e tem elevado valor para aquisição.</p>	<p>Com a máquina parada, na ausência da força centrífuga, o defeito pode ser mascarado e não ser detectado. Como o valor dessa resistência é muito baixo (na faixa de décimos de ohms) o método de medição deve ser seguido para evitar que o método de medição influencie na medida realizada. Há medidores vetoriais que fazem essa medição com a máquina operando, mas pouco comuns e de custo elevado.</p>
<p>Sinais do eixo [5], [8], [9], [10], [11] e [12]</p>	<p>Desbalanço no circuito magnético do rotor podem induzir corrente no eixo. Essa corrente flui pelo eixo para os mancais, pedestais, carcaça, etc e pode circular por esse “circuito” fechado.</p>	<p>Sistemas específicos de medição da tensão do eixo para a terra, através de uma resistência de aterramento, medem o quanto a corrente se eleva. Alguns também fazem análises das componentes harmônicas desse sinal para avaliar a possibilidade de existência de curtos entre espiras dor rotor, mas esses são pouco difundidos na atualidade.</p>	<p>Excentricidade do eixo também pode causar desbalanço magnético e induzir correntes no eixo. Essa corrente pode danificar os componentes pelos quais flui, incluindo selos e óleo lubrificante. O “circuito” pode ser interrompido isolando-se os pedestais dos mancais, mas o problema do curto entre espiras continua a existir.</p>

Métodos de localização do ponto do curto e a quantidade de espiras em curto. [5] e [13]	Localizar ponto de ocorrência do curto e a quantidade de espiras em curto são dados importantes para a tomada de decisão de realização ou não do reparo.	Método da onda dupla viajante (também utilizada em cabos subterrâneos e submarinos) consiste no envio de um sinal em cada ponta do enrolamento e comparar os sinais que retornam. Com isso pode-se estimar o local do curto.	A limitação deste método é para curtos próximos ao centro do comprimento da espira, pois o sinal refletido fica quase inalterado, mascarando o resultado.
---	--	--	---

## 2.4. Seleção dos métodos a serem utilizados nas simulações

Dentre os efeitos citados na seção 2.3 listaremos aqui aqueles que podemos utilizar com o tipo de simulação que será realizada, utilizando um pacote específico de simulação de máquinas elétricas, Ansys RMXprt e, posteriormente, no Ansys Maxwell, que utiliza para seus cálculos o método dos elementos finitos (MEF). Portanto, iremos nos ater a parâmetros elétricos. Assim, parâmetros como vibração, excentricidade do eixo e temperatura não serão monitorados e analisados nas simulações, pois iriam requerer o desenvolvimento e a integração da simulação já prevista com novos modelos mecânicos em novos softwares capazes de realizar estes tipos de simulação e análise.

Com isso, a partir do método e das ferramentas definidas para realizar este trabalho, que são o software Ansys Maxwell, com o pacote de simulação específico de máquinas elétricas RMXprt, podemos listar os efeitos que iremos monitorar e analisar nas simulações a serem realizadas. Que serão, basicamente, parâmetros que possam ser medidos em máquinas que já estejam em operação há algum tempo e com estas operando (em giro), sem que haja a necessidade de parada da máquina para realização de medições nem de realização de investimento em novos equipamentos de medição.

Iremos medir e acompanhar, a variação do fluxo magnético no entreferro da máquina, verificando seu valor antes e depois de cada defeito simulado.

Sinais do eixo e resistência do circuito de campo, também poderiam ser acompanhados nesse tipo de simulação. A obtenção de alguns desses sinais do eixo pode requerer a elaboração de um circuito externo para efetuar a medição.

A variação da densidade de corrente nas bobinas de campo, será verificada, apenas para posterior análise, e validação dos dados das análises anteriormente citadas.

Dessa forma, outros parâmetros elétricos podem ser acompanhados, para auxiliar no entendimento de algum cenário simulado. Alguns métodos de detecção off-line também poderão ser utilizados, assumindo que o usuário da máquina pode fazer o acompanhamento desses valores sempre que houver a parada da máquina, o que pode auxiliar no método, em conjunto com os valores acompanhados online.





## 3. SIMULAÇÃO DA MÁQUINA LIVRE DE DEFEITOS

### 3.1. Introdução

Nesse capítulo iremos discutir a motivação da escolha do tipo de máquina a ser simulada, descrevê-la e simulá-la livre de defeitos para ter os valores de referência com os quais iremos comparar os valores das simulações seguintes, com os defeitos inseridos.

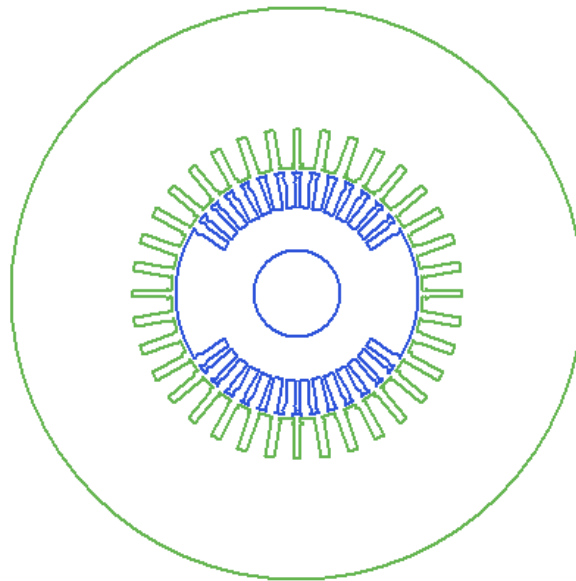
A máquina a ser simulada é um gerador síncrono de pólos lisos, comum em unidades termoeletricas no Brasil. Portanto será utilizada uma máquina de médio porte (em comparação com outras unidades termoeletricas no Brasil) com 125MVA de potência nominal. Essa é uma máquina típica de ter como força motriz uma turbina a gás de grande porte (*heavy duty*, não aeroderivada) ou uma turbina a vapor de pequeno porte. Máquinas que têm força motriz uma turbina a gás aeroderivada, normalmente, não chegam aos 50MVA de potência nominal. Já máquinas que têm como força motriz turbinas hidráulicas têm as mais variadas potências, mas operam em uma velocidade de rotação consideravelmente mais baixa que as demais já citadas e, com isso, acabam por ter um número mais elevado de pólos para que a frequência da tensão gerada seja compatível com a rede (60Hz, no Brasil, por exemplo).

Por conta de ser movida por uma turbina a gás ou a vapor essa máquina gira em altas velocidades e tem um baixo número de pólos, normalmente 2. Com isso o mais comum é que essa seja uma máquina síncrona de pólos lisos. Já as máquinas síncronas de pólos salientes são mais utilizadas em hidrogeradores, que têm um maior número de pólos por girar em menores velocidades, como já citado no parágrafo anterior.

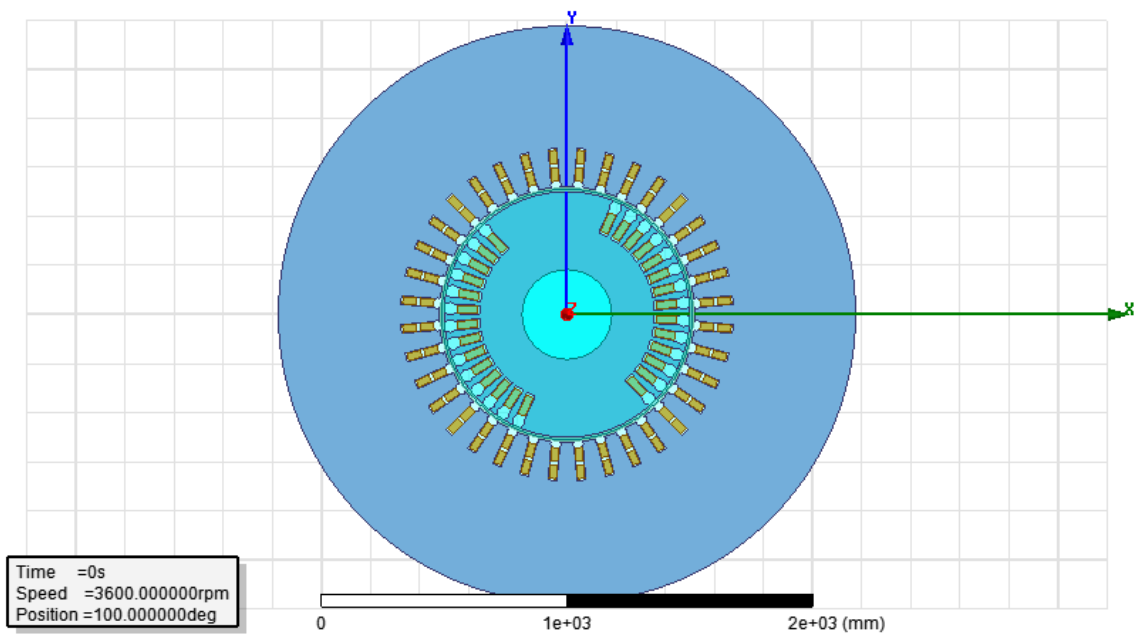
### 3.2. Modelagem da máquina a ser simulada

A máquina a ser simulada, conforme o descrito na seção 3.1, é um gerador síncrono, conectado a uma barra infinita, com potência nominal de 125MVA, 13,8kV de tensão nominal e velocidade de rotação de 3600rpm, para conferir 60Hz de frequência na tensão de saída, que será induzida no estator. Para se ter uma ideia do tamanho dessa máquina ela tem aproximadamente 3,5 metros de comprimento e 2,5 metros de diâmetro externo, com peso de quase 100 toneladas, sem contar a carcaça. Pode-se ver, nas figuras 3-1 e 3-2, uma vista em corte transversal dessa máquina no RMXprt e Maxwell 2D, respectivamente.

Os dados completos da simulação da máquina no RMXprt podem ser encontrados na seção A.1 do Apêndice A.



*Figura 3-1 - Vista em corte transversal da máquina simulada (RMXprt)*



*Figura 3-2 - Vista em corte transversal da máquina simulada (Maxwell 2D)*

Nas figuras 3-3 e 3-4 podemos ver representações da máquina em três dimensões da máquina que será simulada.

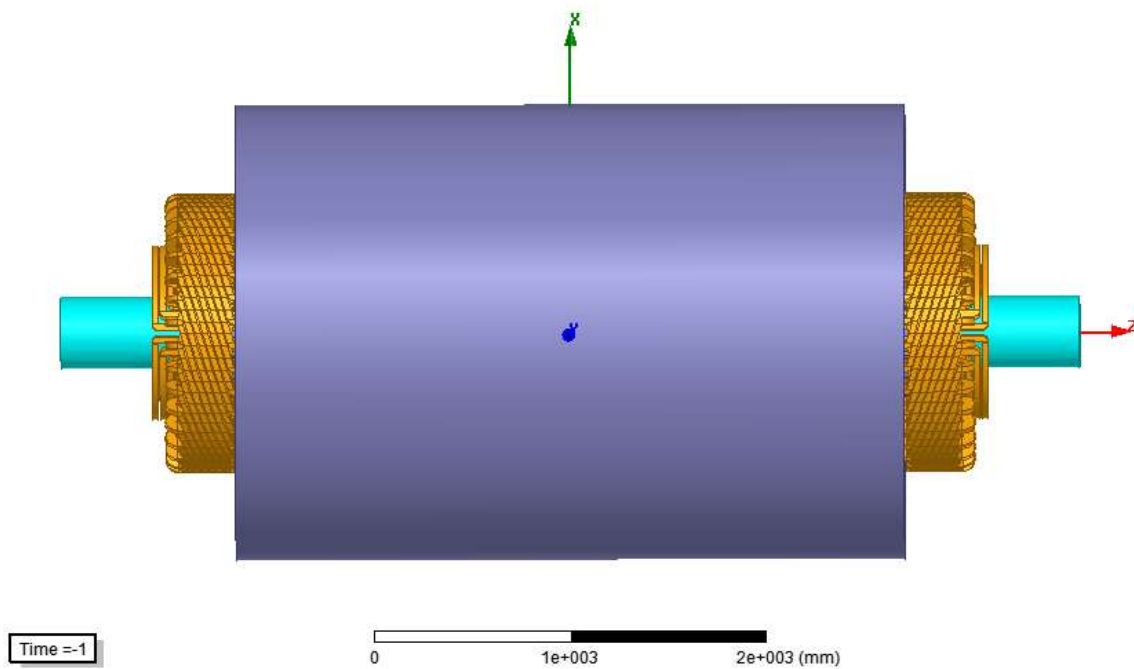


Figura 3-3 – representação, em três dimensões, do motor a ser simulado (Maxwell 3D)

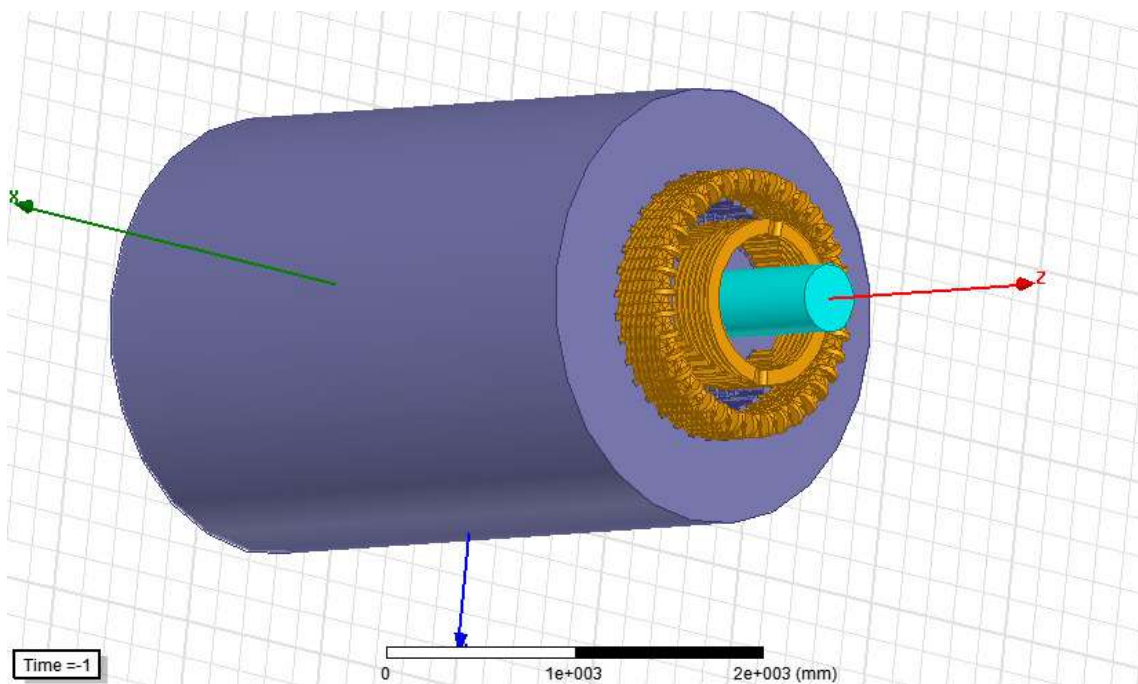


Figura 3-4 - representação, em três dimensões, do motor a ser simulado (Maxwell 3D)

De posse desses dados a simulação foi realizada para obtenção dos dados de corrente de excitação, resistência do circuito de campo e variação do fluxo magnético no entreferro. Para isso foram realizadas simulações em 2 dimensões, no Maxwell 2D.

### 3.3. Simulação da máquina

No RMXprt a máquina foi definida (vide Apêndice A) com valores de parâmetros elétricos, mecânicos e dimensionais, entre outros. Essa máquina “gerada” pelo RMXprt será utilizada para obtenção dos modelos do Maxwell em duas dimensões. Esses modelos do Maxwell serão simulados livres de defeitos neste capítulo e alguns de seus resultados serão utilizados para serem comparados com as simulações que serão realizadas no capítulo quatro, onde os defeitos serão inseridos na máquina a novas simulações serão realizadas. No capítulo quatro, os mesmos modelos utilizados no capítulo três serão modificados, com os defeitos descritos no capítulo quatro, para a obtenção de resultados da máquina com diversos tipos e magnitudes de curtos entre as espiras das bobinas do rotor.

#### 3.3.1. No RMXprt

O RMXprt, que é o módulo de simulação de máquinas elétricas da Ansys e pode ser vinculado ao Maxwell, software da mesma Ansys, que realiza simulações eletromagnéticas utilizando-se do método dos elementos finitos para a obtenção dos resultados. Nesse módulo são inseridos os dados dimensionais, elétricos e de operação e o software retorna as constantes, curvas e alguns dados de saída da máquina.

Com isso a máquina citada no primeiro parágrafo da seção 3.2, e detalhada no Apêndice A, foi simulada no RMXprt. A figura 3-5 mostra um detalhe do estator que mostra a entrada e a saída dos condutores de cada fase nas ranhuras, explicitando as ligações de uma das três fases.

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	1	1T	15B
Coil_2	A	1	2T	16B
Coil_3	A	1	3T	17B
Coil_4	A	1	4T	18B
Coil_5	A	1	5T	19B
Coil_6	A	1	6T	20B
Coil_7	-C	1	7T	21B
Coil_8	-C	1	8T	22B
Coil_9	-C	1	9T	23B
Coil_10	-C	1	10T	24B
Coil_11	-C	1	11T	25B
Coil_12	-C	1	12T	26B
Coil_13	B	1	13T	27B
Coil_14	B	1	14T	28B
Coil_15	B	1	15T	29B
Coil_16	B	1	16T	30B
Coil_17	B	1	17T	31B
Coil_18	B	1	18T	32B

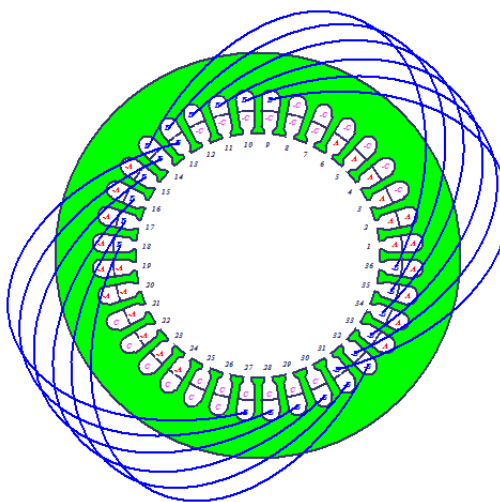


Figura 3-5 - detalhe do estator da máquina simulada

Essa máquina será a utilizada em todo esse estudo. Sendo exportada para o Maxwell 2D para simulações sem defeitos para a obtenção dos valores base, com os quais iremos comparar os valores obtidos nas simulações das máquinas com os defeitos inseridos. Esses defeitos serão

inseridos diretamente no Maxwell, cada um com uma motivação e um método específico que será detalhado oportunamente.

A seguir serão apresentadas algumas curvas da máquina que será usada como base para todo o estudo.

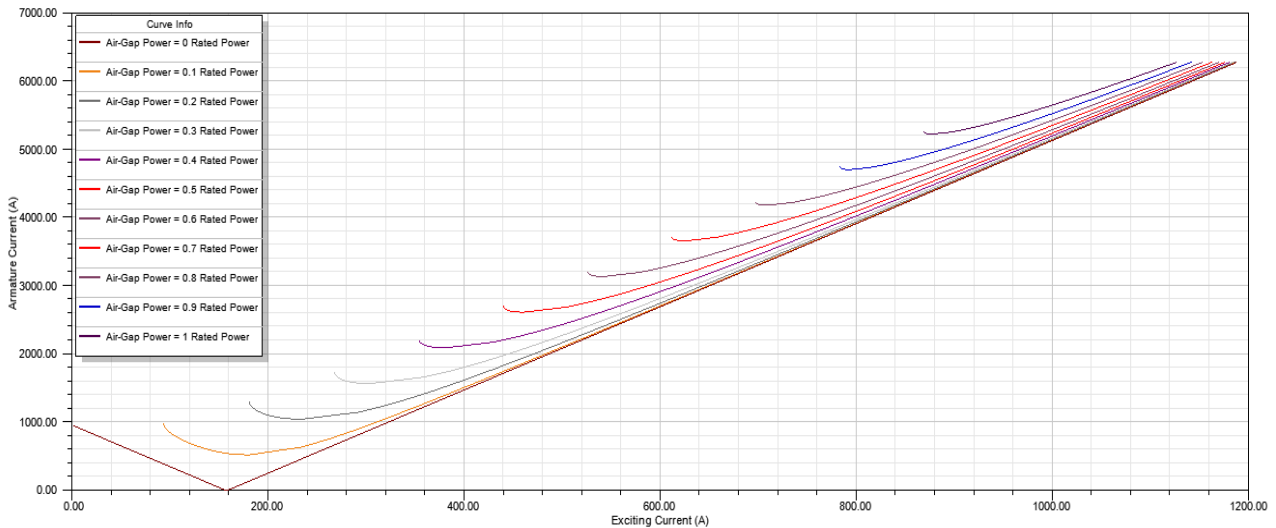


Figura 3-6 - Curvas "V" - relação entre corrente de excitação e da armadura

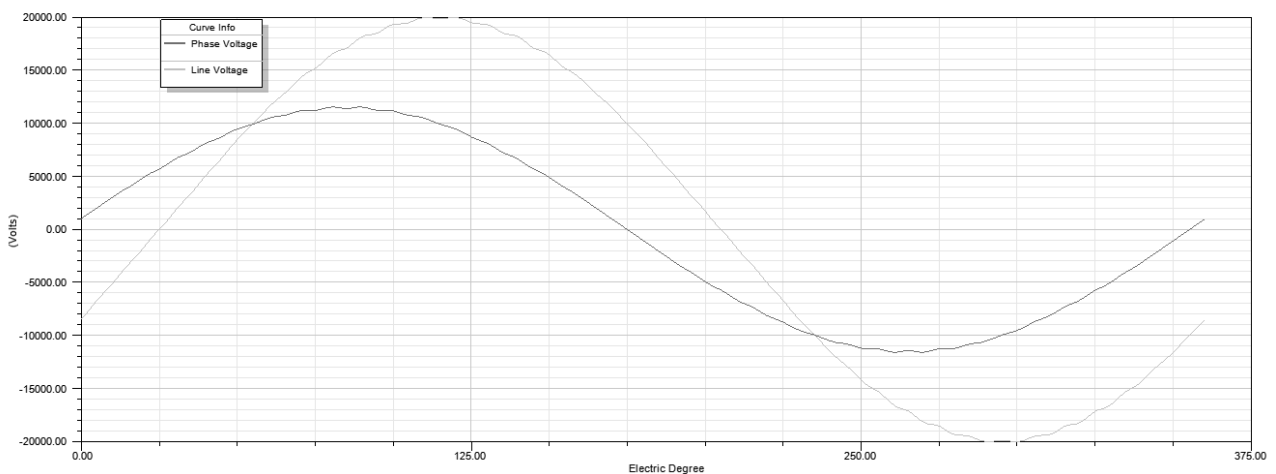


Figura 3-7 - tensões induzidas nos enrolamentos com a máquina sem carga

### 3.3.2. No Maxwell 2D

A máquina originalmente exportada do RMXprt para o Maxwell 2D é exportada com fonte de corrente constante no campo, fornecendo 963,63A fixos para o circuito de campo. Para a observação dos defeitos serão utilizados métodos para medir a variação do fluxo magnético no entreferro com o intuito de localizar as bobinas em curto e identificar a quantidade de espiras em curto.

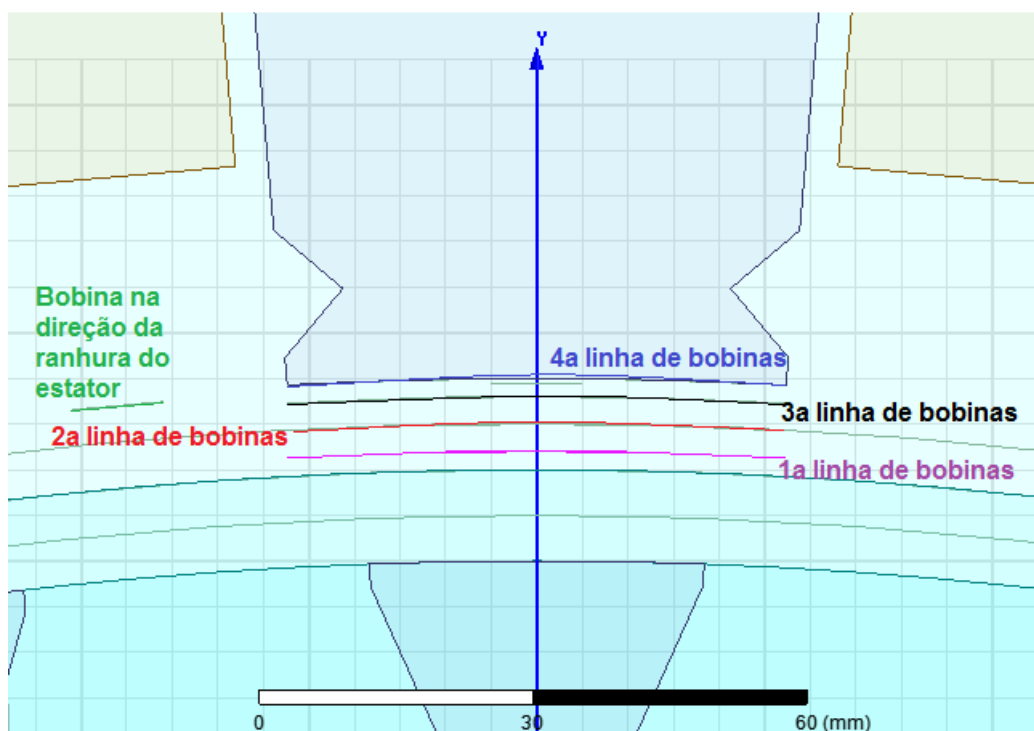
Para essa modelagem serão utilizados métodos e dados encontrados nas referências citadas. As referências [1], [6] e [5], que falam sobre a utilização de bobinas de medição da

variação do fluxo magnético no entreferro e utilizam, em resumo, sua tensão de saída para comparar os valores pré e pós curto para tentar identificar a localização e a quantidade de espiras em curto.

É importante destacar que, como as simulações serão realizadas por um software que utiliza o método dos elementos finitos para chegar às soluções, o usuário deve saber em quais pontos refinar a malha para chegar a um resultado satisfatório sem que expanda demais essa área, evitando assim a realização de processamentos excessivos e desnecessários pela máquina e uma consequente perda de tempo do usuário na realização da simulação desejada.

Para definir como serão modeladas as bobinas de medição utilizadas nas simulações, para a realização das comparações pré e pós curto, serão testados alguns tipos de bobinas, variando seu tamanho, posição e distância da superfície do rotor.

Nos testes realizados, utilizando as 12 diferentes bobinas de medição mostradas na figura 3-8.



*Figura 3-8 - Identificação das bobinas de medição testadas*

Serão inicialmente testadas bobinas de três tamanhos diferentes. Pequenas, com 10mm de largura, médias, com 30mm de largura e grandes com 55mm de largura. Nas três primeiras linhas de bobinas são inseridas três bobinas, uma de cada tamanho, na quarta linha foram inseridas duas bobinas, uma grande e uma pequena e, mais uma bobina será posicionada na direção da ranhura, apenas para demonstrar que o caminho preferencial do fluxo no entreferro é pelo dente

e não pela ranhura e, assim, descartar a possibilidade de instalação da bobina de medição nesse local.

Após a análise dos resultados nos primeiros cenários simulados será definido o tamanho de bobina a ser utilizado e essa configuração, com apenas 3 bobinas a diferentes distâncias do rotor será empregada desse ponto em diante.

Para chegar ao método de medição utilizado diversas tentativas foram realizadas, além disso alguns pontos de atenção foram observados e também serão destacados.

Na prática a observação da variação do fluxo no entreferro se dá pela variação da tensão de saída da bobina de medição instalada no entreferro. Como a tensão induzida nos terminais dessas bobinas de medição é diretamente proporcional à variação do fluxo magnético que passa pela bobina em cada instante de tempo, para fins de simulação essa variação pode ser avaliada sem que seja necessária a construção de uma bobina com diversas espiras e, posteriormente, avaliar a sua tensão de saída. Otimizando assim o tempo que seria necessário para a construção de um modelo da bobina de medição e tempo de processamento computacional, uma vez que muitos cálculos deixaram de ser executados. Com isso o que será medido nas simulações vindouras é a variação do fluxo magnético total percebido pela bobina.

Para simular essa leitura de variação de fluxo, serão calculados os fluxos totais em cada uma das bobinas de medição e posteriormente suas respectivas derivadas no tempo. Os cálculos dos fluxos totais nas bobinas são realizados através da função *Fields Calculator* do Maxwell como a integral da densidade de fluxo em toda a superfície da bobina em cada instante de tempo, obtendo-se o fluxo total na bobina em cada instante de interesse.

Para demonstrar a melhor maneira de realizar o teste, serão realizadas simulações com a máquina em alguns modos operativos distintos para avaliar a sensibilidade da medição em cada um deles e definir o que confere maior sensibilidade, ou seja, que possibilite melhor percepção da existência de curto, sua posição e a quantidade de espiras em curto. O primeiro modo de teste realizado é o teste com a máquina em carga, que é equivalente à máquina operando conectada à rede e com carga motriz. O segundo teste realizado é com a máquina em circuito aberto, que deixa o estator sem correntes circulando e, dessa maneira, a bobina de medição é submetida apenas ao fluxo magnético gerado pelas correntes circulantes no rotor. Na prática esse teste pode ser realizado com a máquina em giro e pronta para ser sincronizada, no momento justamente anterior ao fechamento do disjuntor de sincronismo, quando a máquina está totalmente excitada, mas ainda não está conectada à rede. O terceiro teste realizado é o teste de curto circuito que é obtido após curto-circuitar as três fases da máquina. Em testes práticos [6], sugere-se realizar esse curto-circuito após o transformador elevador (comum na saída de máquinas desse porte), pois além de

ser mais fácil de realizar a conexão com a tensão mais elevada, a corrente circulante no curto é menor, o que torna o teste mais seguro.

Para os valores das grandezas de saída do gerador, tensão e corrente, uma breve análise também será realizada. Como os testes de curto circuito e circuito aberto são realizados em momentos específicos e de curta duração se comparados à máquina operando em carga, essa análise só faz sentido e somente será realizada para essa última condição. Além disso, nesse caso de operação em carga, a máquina está conectada à rede sua tensão de saída é constante e igual à tensão dessa rede, o que torna desnecessária a análise dessa grandeza e, portanto, as análises irão se ater aos valores de corrente de saída do gerador.

### **3.3.3. Valores de referência, da máquina sem defeitos**

Nessa seção serão apresentados os gráficos e valores que serão utilizados ao longo do trabalho para avaliação dos cenários simulados. Para essas apresentações realizadas nessa seção será utilizada uma máquina em carga, conectada à rede, com geração plena e livre de defeitos.

Serão analisadas as variações do fluxo magnético no entreferro e o valor instantâneo da densidade de fluxo radial ao longo de todo o entreferro, ambos em diferentes posições relativas à superfície do rotor, para avaliar os melhores pontos para realização das medições.

O valor da densidade de fluxo radial no entreferro representa uma fotografia instantânea que mostra o valor do fluxo magnético sobre uma circunferência, concêntrica ao eixo, plotada no entreferro. Para efeito de testes serão plotadas três diferentes circunferências a diferentes distâncias da superfície do rotor para analisar a influência dessa distância na sensibilidade da medição. Essas circunferências podem ser vistas por completo na figura 3-9, e em detalhe na figura 3-10.



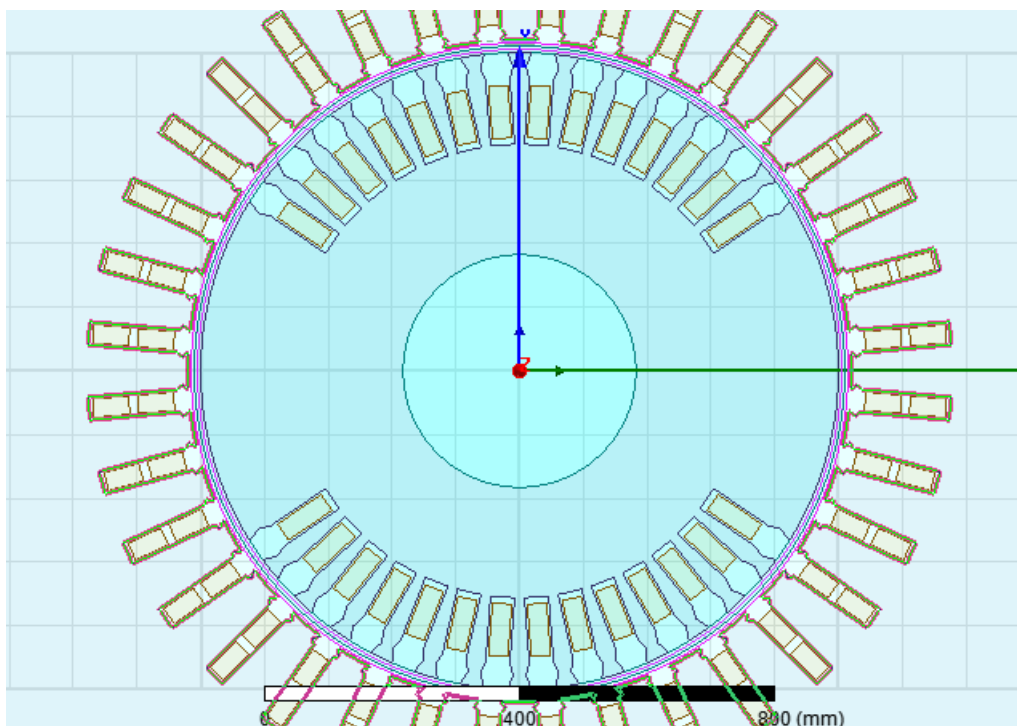


Figura 3-9 - circunferências plotadas para a medição da densidade de fluxo radial no entreferro

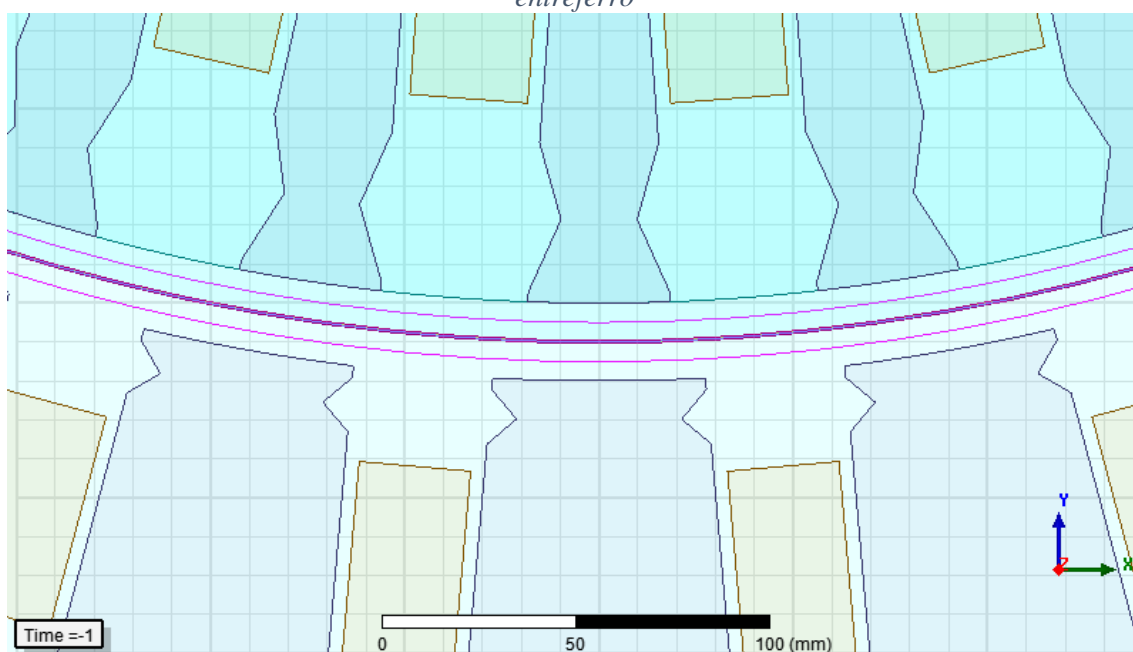


Figura 3-10 - detalhe das circunferências plotadas para a medição da densidade de fluxo radial no entreferro

As medições realizadas nessas circunferências também são formuladas na ferramenta *Fields Calculator* e depois são atribuídas a cada curva para que seja plotado o fluxo radial de todo o modelo em cada uma das circunferências plotadas no entreferro. As próximas 3 figuras, 3-11 a 3-13, mostram o resultado dessa função nas três curvas, no mesmo instante de tempo. Variando-se o instante a curva mostra-se deslocada lateralmente, mas sem alteração em sua forma. Nesses gráficos o eixo das abscissas representa o comprimento do perímetro da circunferência plotada

como referência para a medida, e o eixo das ordenadas mostra os valores de densidade de fluxo. As circunferências criadas ficam a 5,10 e 15mm da superfície do rotor.

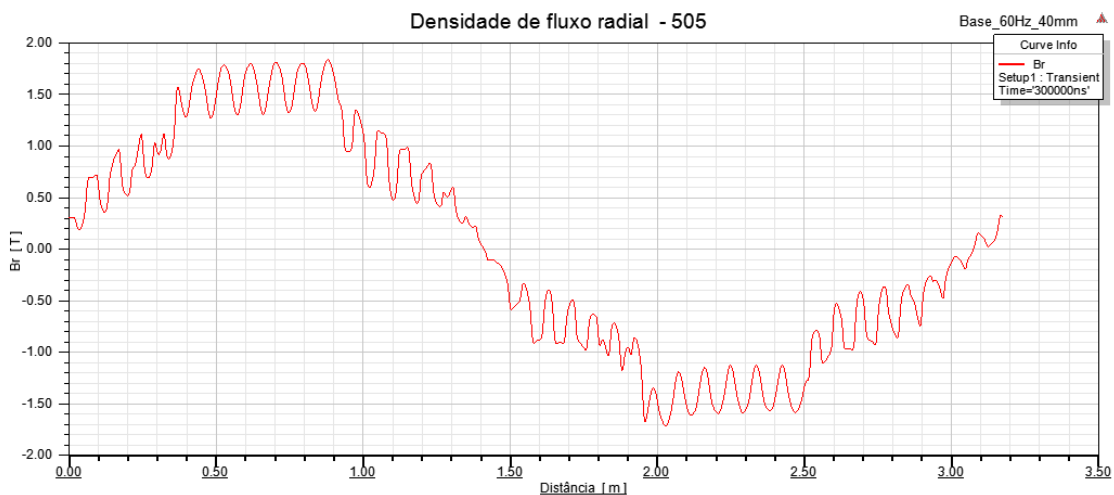


Figura 3-11 - densidade de fluxo radial a 5mm da superfície do rotor

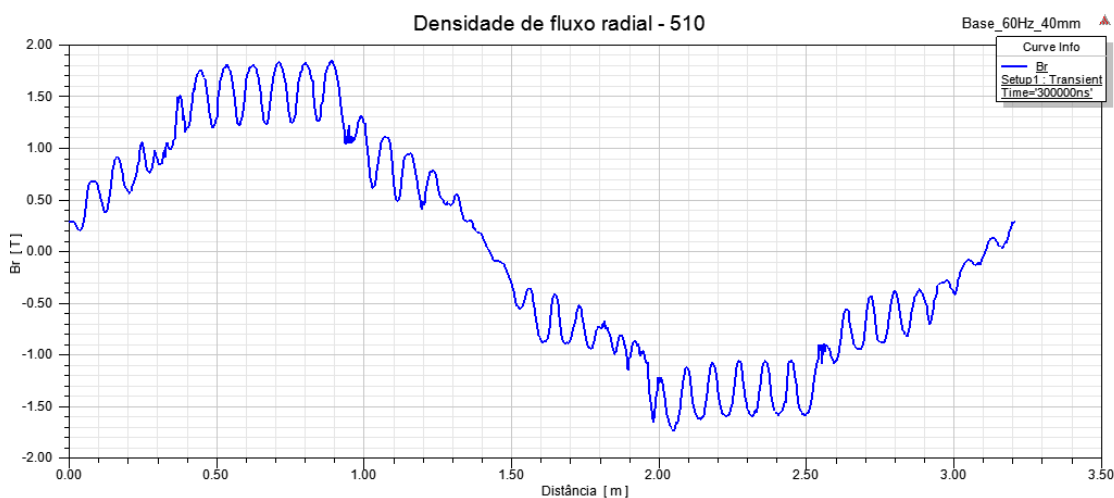


Figura 3-12 - densidade de fluxo radial a 10mm da superfície do rotor

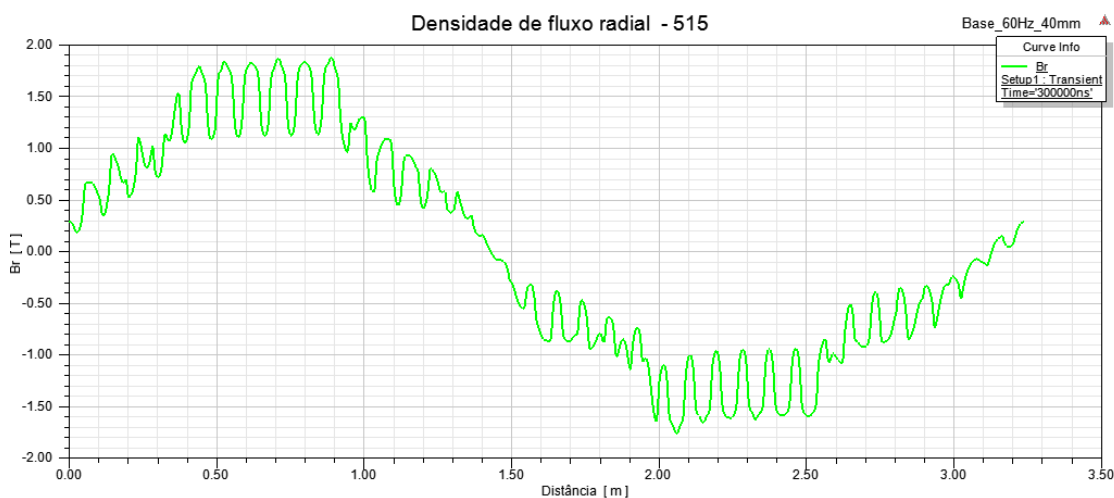


Figura 3-13 - densidade de fluxo radial a 15mm da superfície do rotor

Na figura 3-14 as três curvas serão superpostas para efeitos de comparação entre elas.

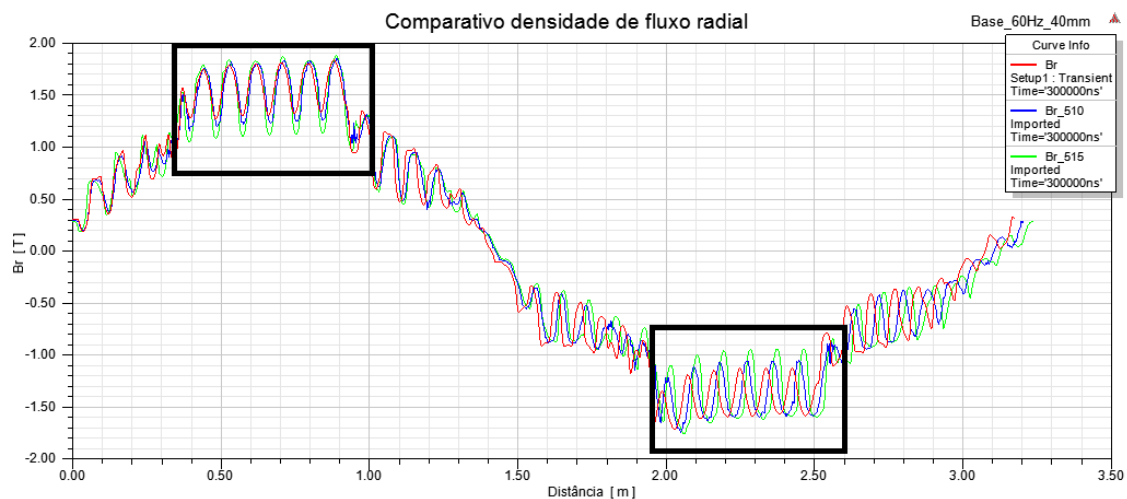


Figura 3-14 - comparativo de densidade de fluxo radial nas três circunferências plotadas

Nos gráficos acima pode-se perceber que cada pico das áreas destacadas se refere a um caminho preferencial do fluxo “saindo” de um polo do rotor, passando pelo entreferro e chegando a um dente do estator. Como explicitado na figura 3-14, que mostra as linhas de fluxo fazendo o referido caminho rotor x estator e vice-versa. Nas curvas apresentadas nas figuras 3-10 a 3-13 pode-se observar que a amplitude dos picos aumenta junto com o aumento da distância da circunferência em relação ao rotor.

As densidades de fluxo radial plotadas em cada uma das circunferências de diferentes raios concêntricos ao eixo, possuem pequenas diferenças entre si para um mesmo cenário simulado. Essa diferença se dá pela diferença de comprimento total entre as curvas, ou seja, quanto maior o raio da circunferência, maior o comprimento total de seu perímetro e, com isso a curva de densidade de fluxo radial é “esticada” proporcionalmente ao aumento do comprimento do perímetro, mas mantendo seu formato. A diferença entre os comprimentos das circunferências pode ser vista na figura 3-14, onde as curvas terminam em pontos distintos, equivalentes a suas diferenças de raio.

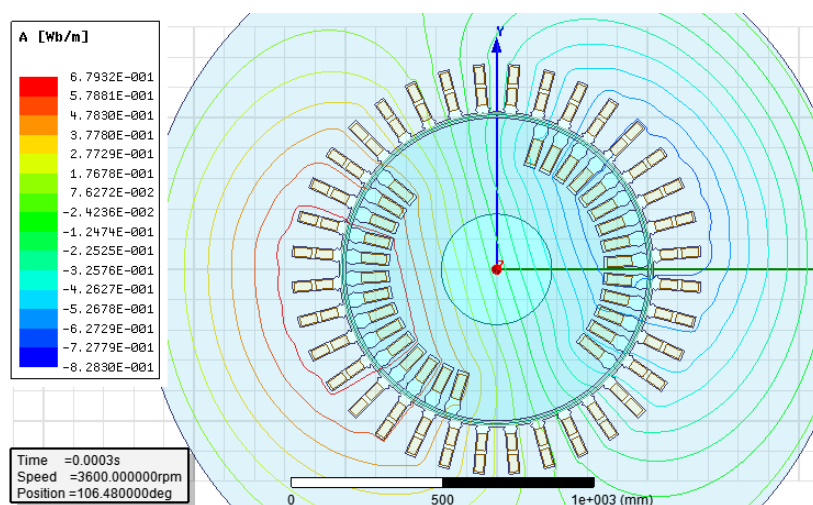
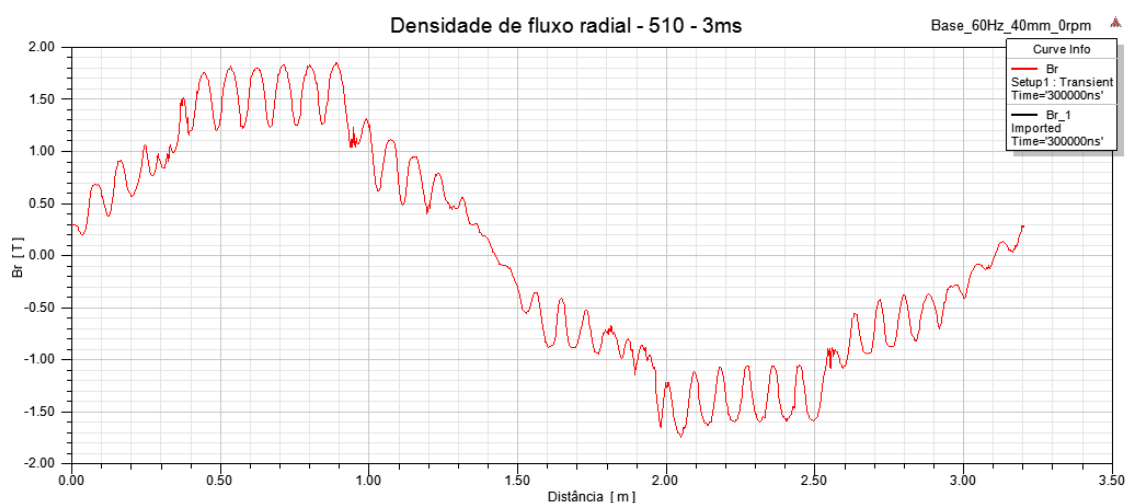


Figura 3-15 - exemplo de linhas de fluxo saindo do polo do rotor e chegando ao estator

Para essa medição, de densidade de fluxo radial no entreferro, foi simulado um cenário adicional da máquina em carga, sem defeitos, mas sem estar em rotação, com velocidade ajustada em zero rpm, para garantir que o rotor esteja parado exatamente na mesma posição para todas as medidas realizadas. E, para esse novo cenário, não houveram alterações na curva de densidade de fluxo radial, como pode ser observado na figura 3-16, que compara a máquina estática (0 rpm), na curva vermelha e a da máquina em giro (3600 rpm), na curva preta. Nesse caso as curvas totalmente superpostas, que indicam o fluxo entre rotor e estator não alteram nem sua posição nem sua amplitude, mostrando que as simulações da máquina em giro representam bem essa medição e que poderá ser utilizada nos demais cenários simulados.



*Figura 3-16 - comparativo de densidade de fluxo radial - 3600 x 0 rpm*

Já para a avaliação da variação do fluxo magnético no entreferro serão testadas diversas bobinas conforme já explanado anteriormente nessa seção. Essas bobinas são estacionárias em relação ao estator e “captam” todo o fluxo que passa por elas em cada instante de tempo, sendo afetadas tanto por fluxos provenientes das bobinas do rotor quanto das bobinas do estator. Por isso os diferentes testes são realizados, buscando cenários que tenham melhor resposta quando da inserção de defeitos na máquina, sendo que nesse caso a melhor resposta pode ser considerada a melhor sensibilidade da bobina às alterações da densidade de fluxo no entreferro.

Todos os resultados apresentados nessa seção, inclusive os já exibidos, são referentes a uma máquina em carga, conectada à rede, com cargas balanceadas entre as fases e livre de defeitos, como pode ser visto na figura 3-17.

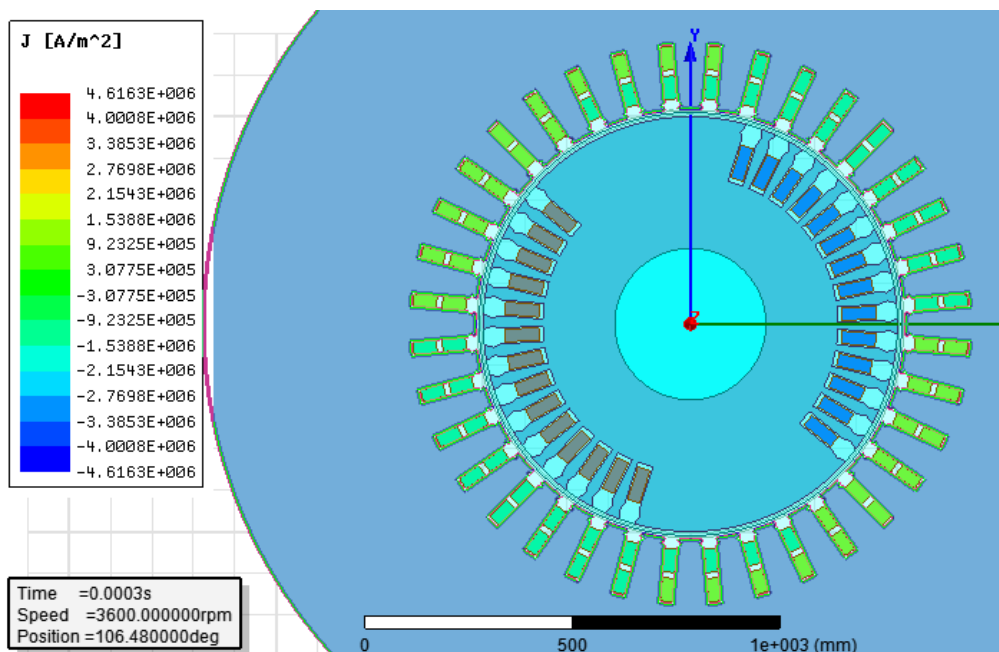


Figura 3-17 - distribuição de correntes pelos condutores da máquina livre de defeitos

Na primeira linha de bobinas de medição, mostrada na figura 3-18, os gráficos de fluxo total na bobina, figura 3-19, e sua respectiva variação (derivada) no tempo, figura 3-20, são mostrados na sequência.

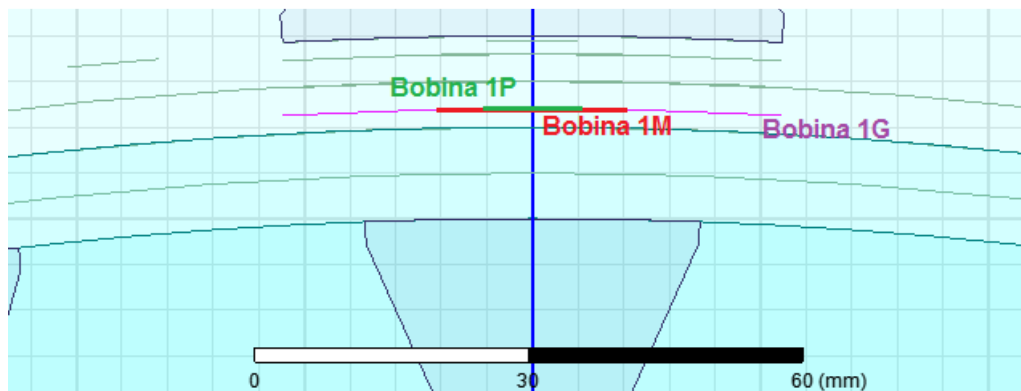


Figura 3-18 - Detalhe das bobinas de medição da 1ª linha a 12mm de distância do rotor

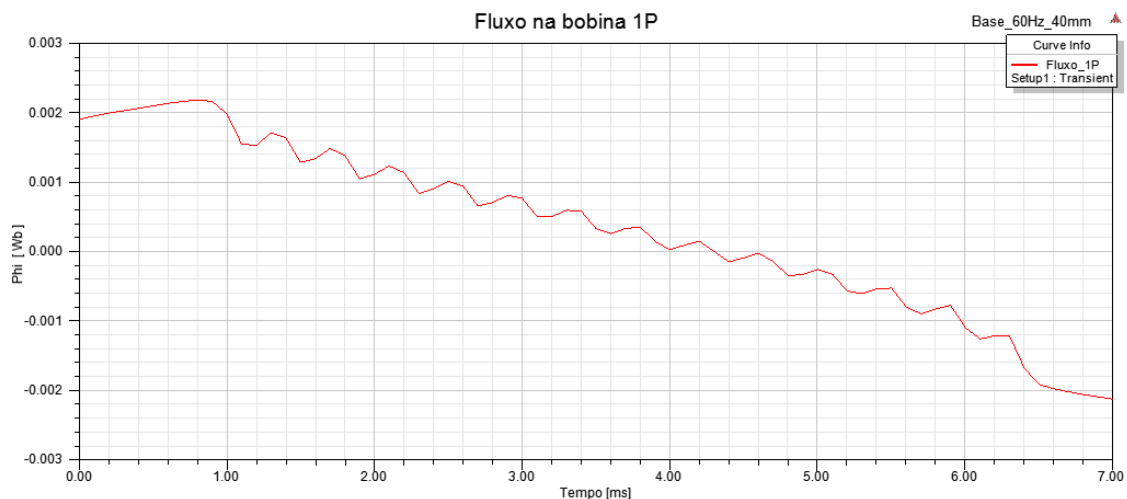


Figura 3-19 - fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos

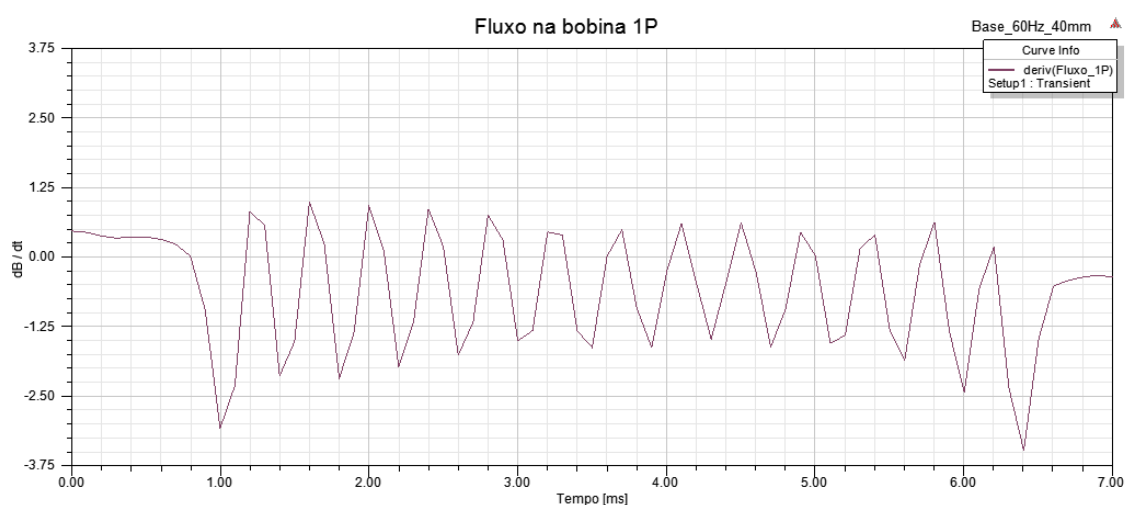


Figura 3-20 -derivada do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos

Como já dito, os gráficos das figuras 3-19 a 3-21, mostram separadamente tanto o fluxo total na bobina quanto a sua respectiva derivada. Os demais resultados serão apresentados com essas duas grandezas representadas conjuntamente e, como a amplitude da derivada é bastante superior à do fluxo o valor do fluxo pode parecer uma linha reta, mas isso é devido a essa diferença de amplitude.

Os resultados da simulação para as bobinas da primeira linha de bobinas são apresentados, nas figuras 3-21 a 3-23.

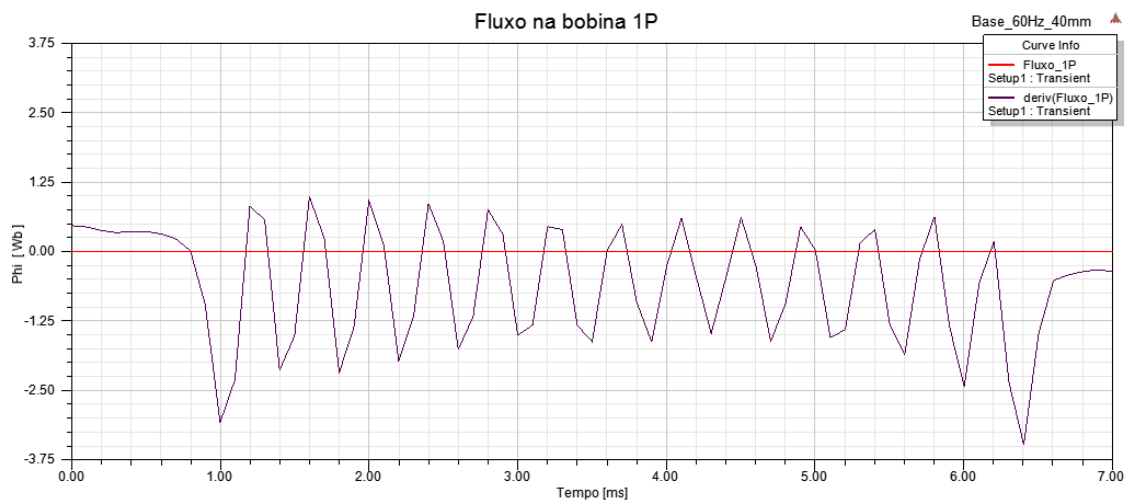


Figura 3-21 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga e sem defeitos

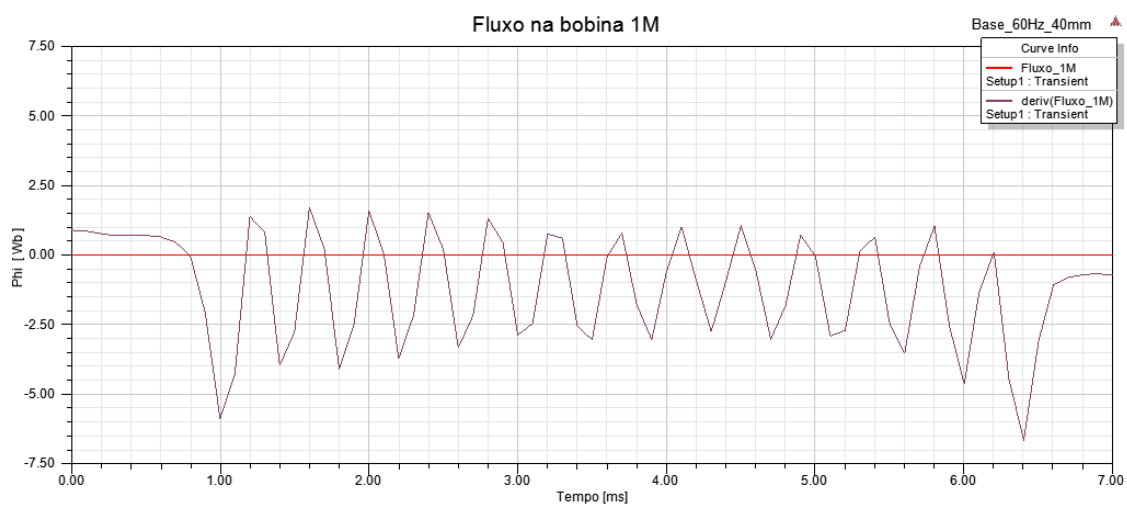


Figura 3-22 - variação do fluxo na bobina 1M, para a máquina em carga e sem defeitos

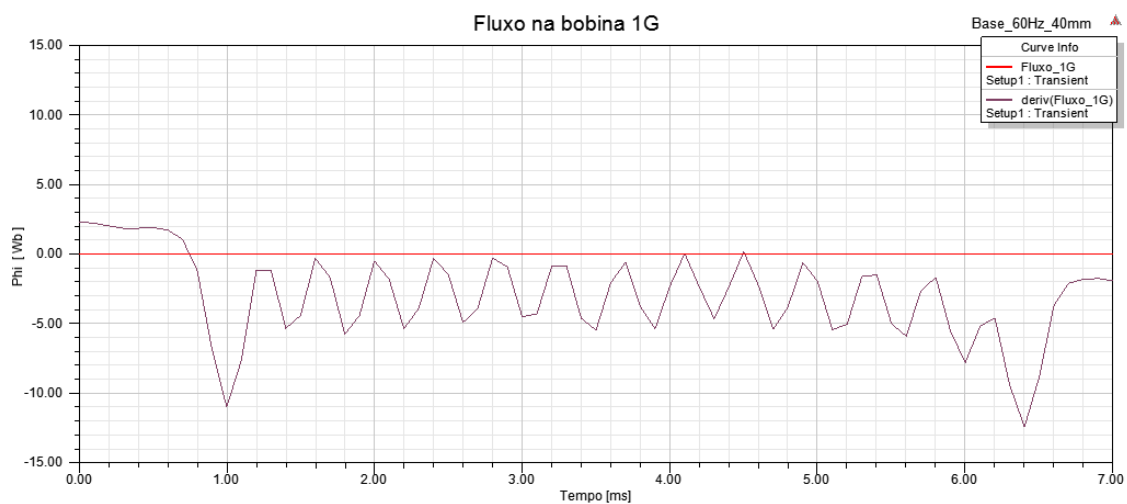


Figura 3-23 - variação do fluxo na bobina 1G, para a máquina em carga e sem defeitos

De maneira similar, são mostrados nas figuras 3-24 a 3-26 os resultados de medição das bobinas da 2ª linha.

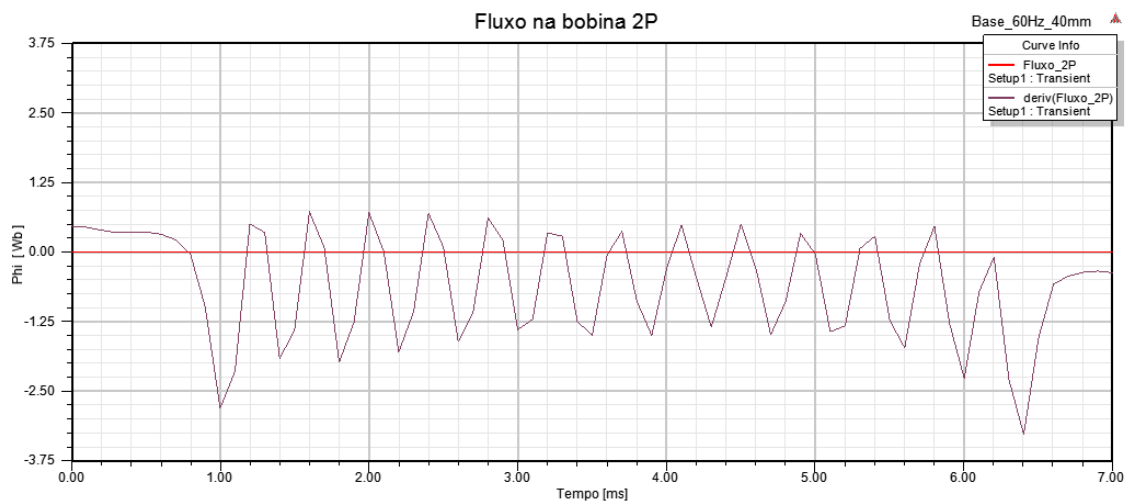


Figura 3-24 - variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga e sem defeitos

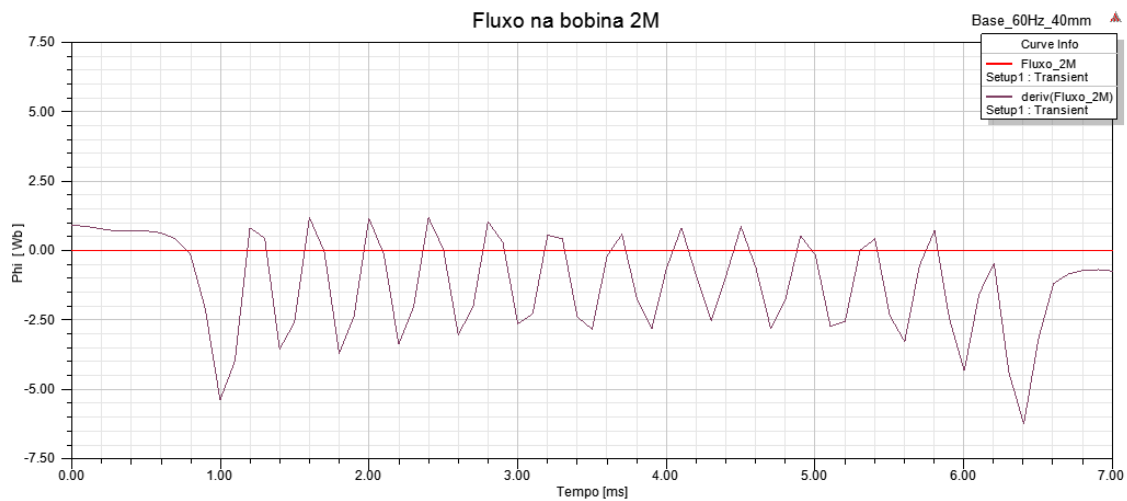


Figura 3-25 - variação do fluxo na bobina 2M, para a máquina em carga e sem defeitos

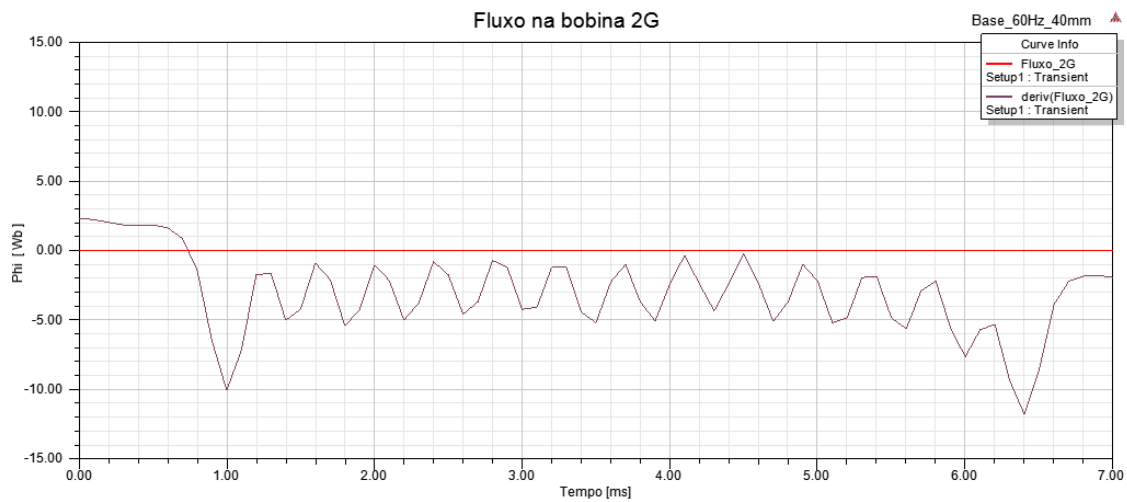


Figura 3-26 - variação do fluxo na bobina 2G, para a máquina em carga e sem defeitos



Analogamente ao realizado para as duas linhas de bobinas simuladas no entreferro da máquina, a 3ª linha de bobinas tem como resultado os gráficos mostrados nas figuras 3-27 a 3-29.

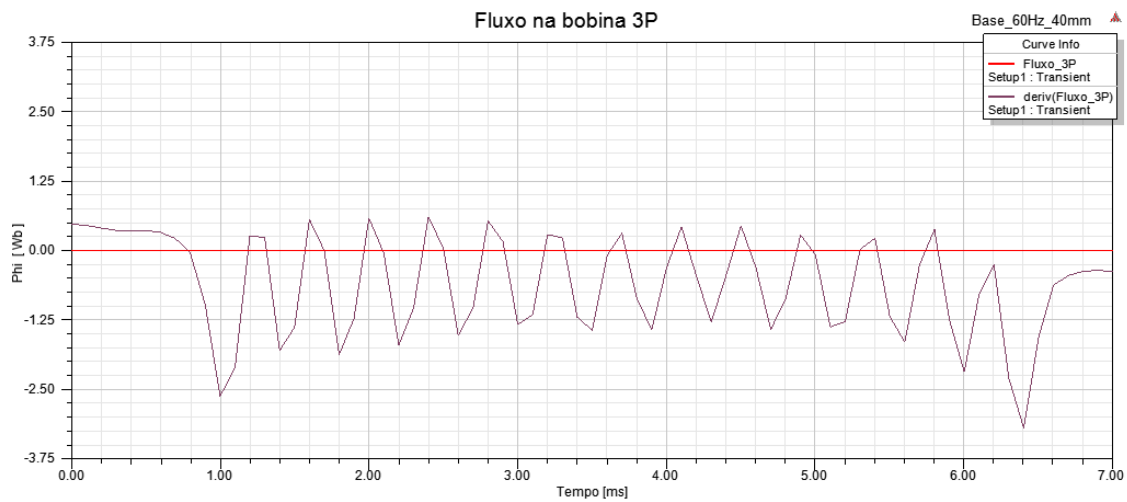


Figura 3-27 - variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga e sem defeitos

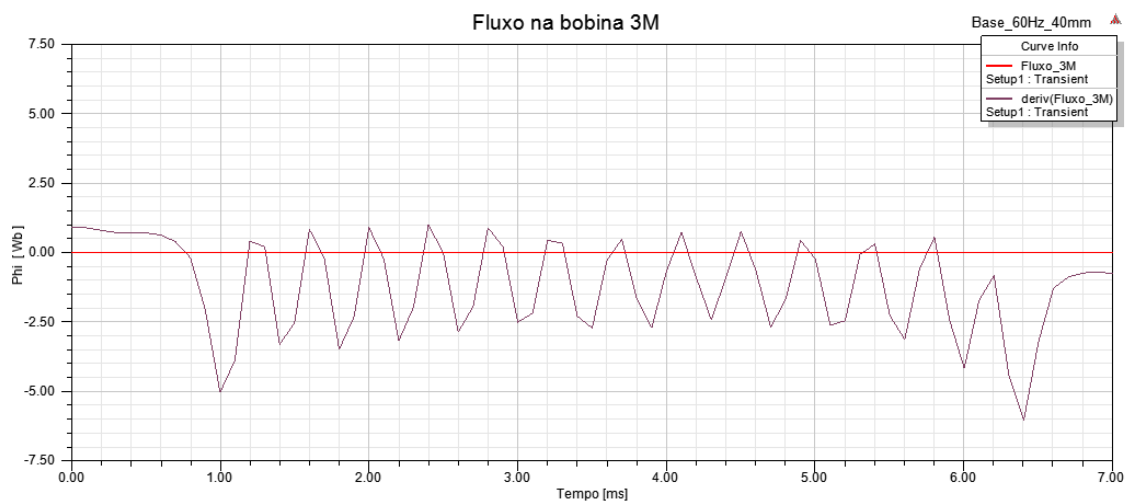


Figura 3-28 - variação do fluxo na bobina 3M, para a máquina em carga e sem defeitos

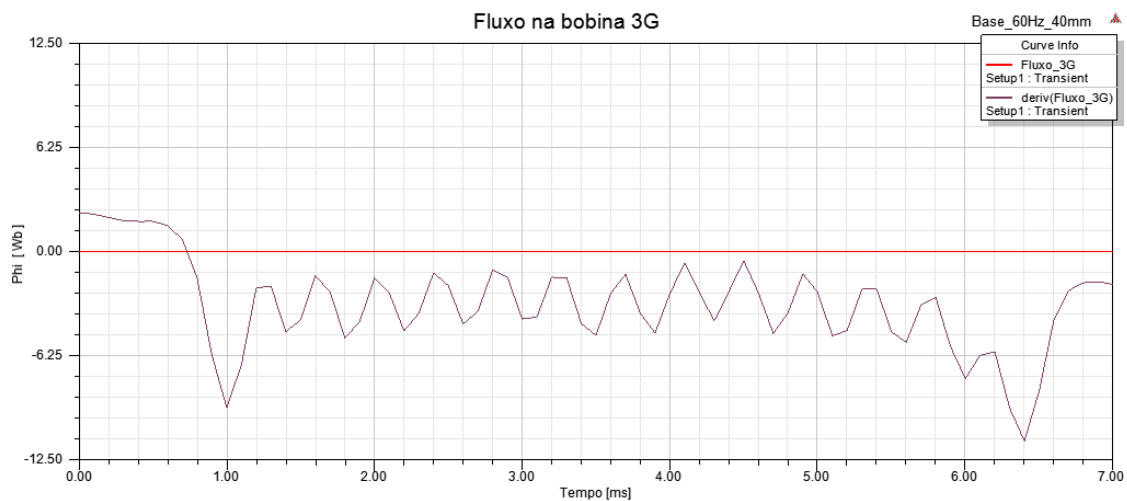


Figura 3-29 - variação do fluxo na bobina 3G, para a máquina em carga e sem defeitos

Ainda foram inseridas outras duas bobinas na 4ª linha, cujos resultados são mostrados nos gráficos das figuras 3-30 e 3-31.

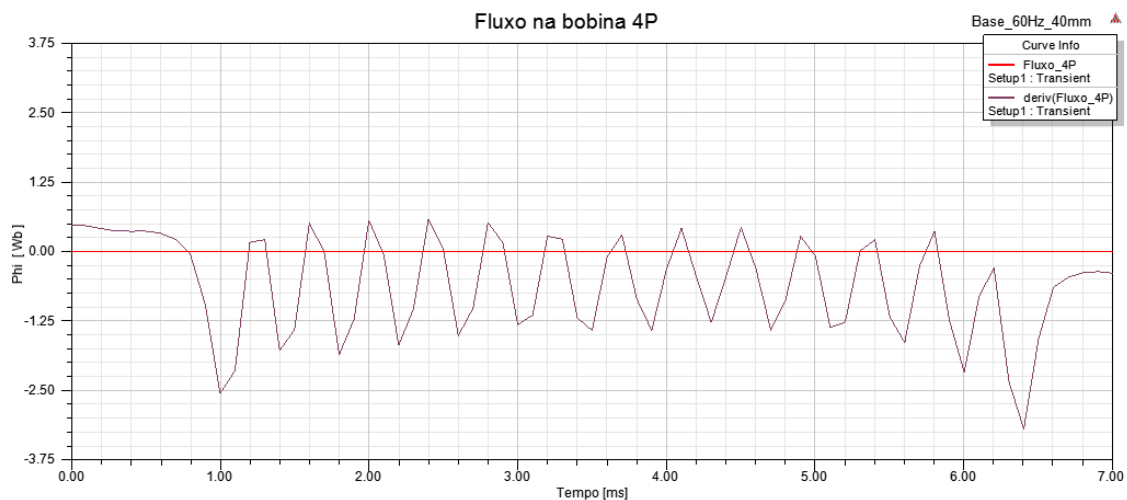


Figura 3-30 - variação do fluxo na bobina 4P, para a máquina em carga e sem defeitos

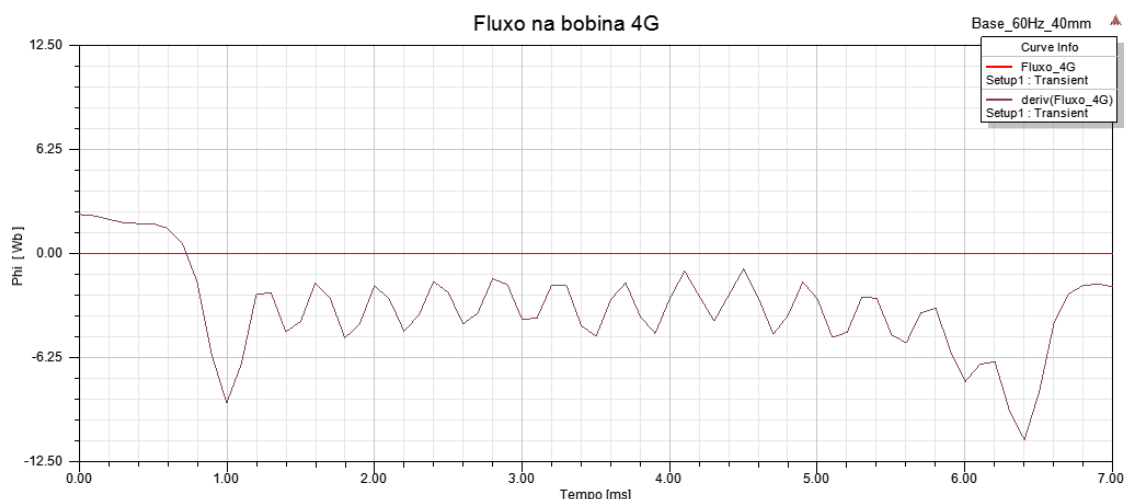


Figura 3-31 - variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga e sem defeitos

Por último, foi inserida uma bobina de medição na direção de uma ranhura, conforme já mostrado na figura 3-8, à mesma distância do rotor e do mesmo tamanho da bobina pequena da 4ª linha de bobinas. Essa bobina foi instalada apenas com o intuito de demonstrar que como o fluxo passa preferencialmente pelo dente do estator e, dessa maneira, a instalação de uma bobina de medição na ranhura traria baixa sensibilidade à medição.

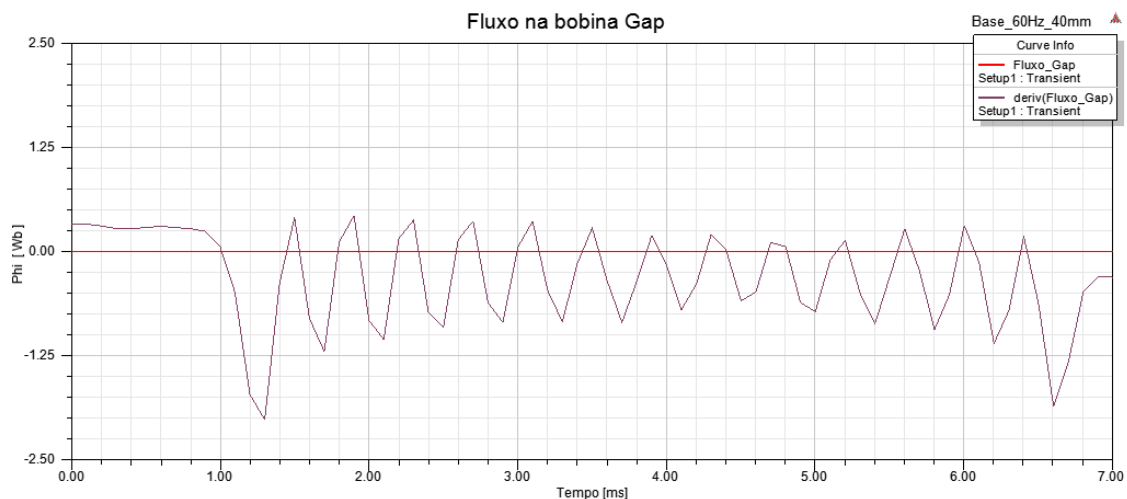


Figura 3-32 - variação do fluxo na bobina alinhada com a ranhura, para a máquina em carga e sem defeitos

Analisando os gráficos 3-19 a 3-32, é possível perceber que as maiores bobinas recebem uma quantidade maior de fluxo magnético, porém, apesar disso, podemos concluir que as menores bobinas têm melhor sensibilidade frente às demais bobinas posicionadas na mesma linha, pois os picos referentes a cada bobina do rotor são maiores em relação às demais.

Na sequência é apresentado o gráfico de corrente nos terminais para a máquina em carga e sem defeitos, com valor de pico de 7,02kA.

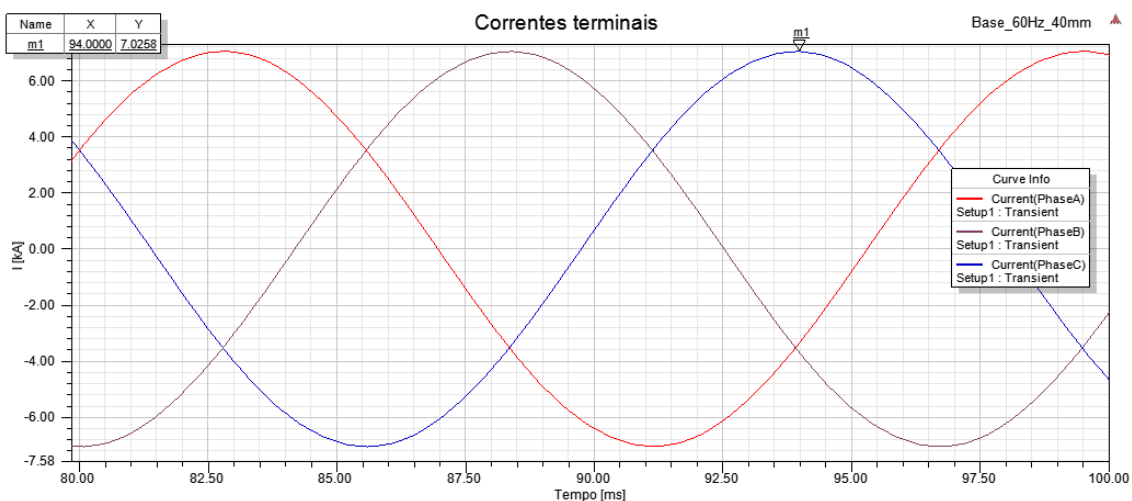


Figura 3-33 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga e sem defeitos



## 4. SIMULAÇÕES DAS MÁQUINAS COM OS DEFEITOS PROPOSTOS

### 4.1. Introdução

Neste capítulo serão definidos os defeitos a serem inseridos, serão simuladas as máquinas com os defeitos propostos e seus resultados serão analisados em comparação com a máquina base, livre de defeitos, simulada no capítulo 3

Como a máquina que está sendo simulada possui 14 bobinas e há simetria no eixo de quadratura, serão simulados curtos na metade das bobinas, conforme indicado na figura 4-3. Em cada caso de curto aplicado a máquina será simulada em três diferentes cenários, máquina em carga, ensaio de circuito aberto e ensaio de curto circuito, conforme já citado na seção 3.3.2.

Para as simulações com a máquina em carga serão mantidos os parâmetros nos enrolamentos do estator, para os testes de circuito aberto os enrolamentos do estator serão ajustados como uma fonte de corrente com valor de corrente igual a zero e para os testes de curto circuito os enrolamentos do estator serão ajustados como fontes de tensão, com os mesmos valores de resistência e indutância originais, mas com valor de tensão igual a zero. Alternativamente foi simulado esse último teste, o de curto circuito, com o auxílio de um circuito externo, como o mostrado na figura 5-1, mas os resultados obtidos foram exatamente os mesmos da simulação realizada alterando-se a configuração do enrolamento do estator, portanto apenas um dos resultados será apresentado nesse capítulo, referente à alteração na configuração do enrolamento do estator.

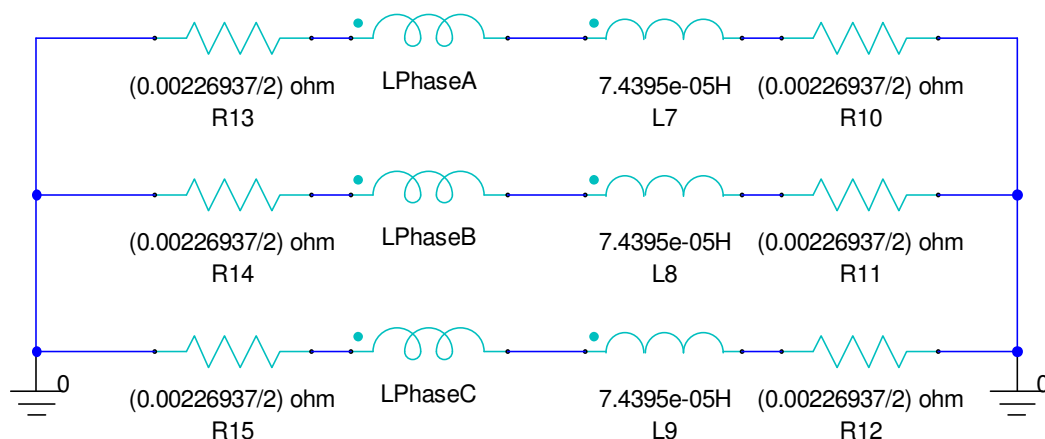


Figura 4-1 - circuito externo utilizado para realizar a simulação do teste de curto circuito

Ainda nesse capítulo serão apresentados, um a um, os cenários de curto em metade das espiras de cada bobina conforme explicitado na figura 5-4. Para cada um deles serão apresentados e analisados os gráficos das bobinas pequenas (de maior sensibilidade) instaladas nas 3 primeiras linhas de bobinas, o gráfico da bobina grande instalada na quarta linha de bobinas, que apesar de

não ter a melhor sensibilidade em indicar a quantidade de espiras em curto fornece boa indicação da existência do curto e sua localização e um gráfico de fluxo radial. Em todos os gráficos os resultados das simulações serão comparados aos valores da máquina, na mesma condição operativa (em carga, circuito aberto ou curto circuito) da máquina sem defeitos que, na legenda do gráfico será indicada como dado importado (virá indicado como *Imported*).

#### **4.2. Definição dos defeitos a serem inseridos**

Aqui serão descritos os defeitos que serão inseridos na máquina livre de defeitos simulada no capítulo 3 e, assim, serão definidos os cenários que serão simulados. Após essa definição os cenários propostos serão modelados de forma a proporcionar a inserção dos defeitos e, então serão simulados para validar as modelagens em comparação às máquinas sem defeitos simuladas no capítulo 3.

Para facilitar a visualização do defeito inserido, será tomado como padrão a inserção de curto em metade das espiras de uma bobina, uma de cada vez. Assim, 6 das 12 espiras da bobina afetada estarão em curto e, conseqüentemente, haverá apenas metade da corrente circulando na bobina que tiver o curto inserido.

Cenários específicos, com todas as espiras de uma bobina em curto, máquina excitada e parada (0 rpm) serão utilizados ao longo do trabalho para demonstrar algum ponto forte, fraco ou particularidade das simulações, mas serão sempre devidamente informados junto da exibição do resultado.

No Maxwell 2D cada bobina de campo contém 12 condutores (espiras). Essa quantidade de espiras será alterada em uma bobina, de forma a simular um curto, vide figuras 5-2 e 5-3. A alteração resulta numa menor corrente circulando na bobina afetada, o que irá ser percebido nas medições realizadas pelas bobinas de medição inseridas no entreferro. Os diferentes valores de corrente nas bobinas com e sem curto podem ser verificados plotando-se a densidade de corrente nos condutores em um dado momento da simulação ou calculado através do *Fields Calculator* integrando o valor da densidade de corrente pela área da seção transversal do condutor que essa densidade atravessa.

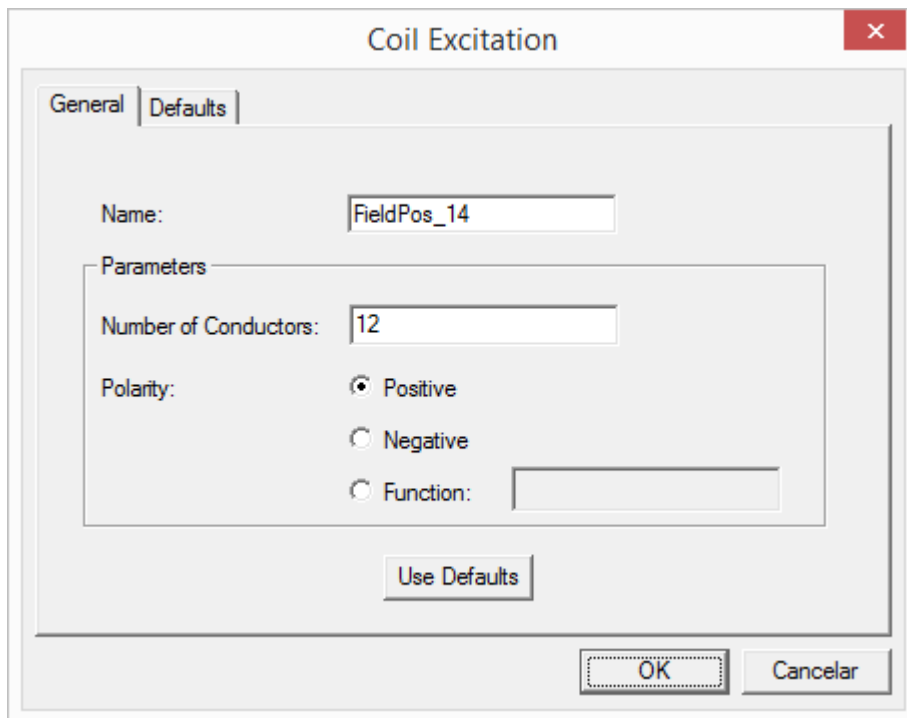


Figura 4-2 - configuração da bobina no Maxwell 2D

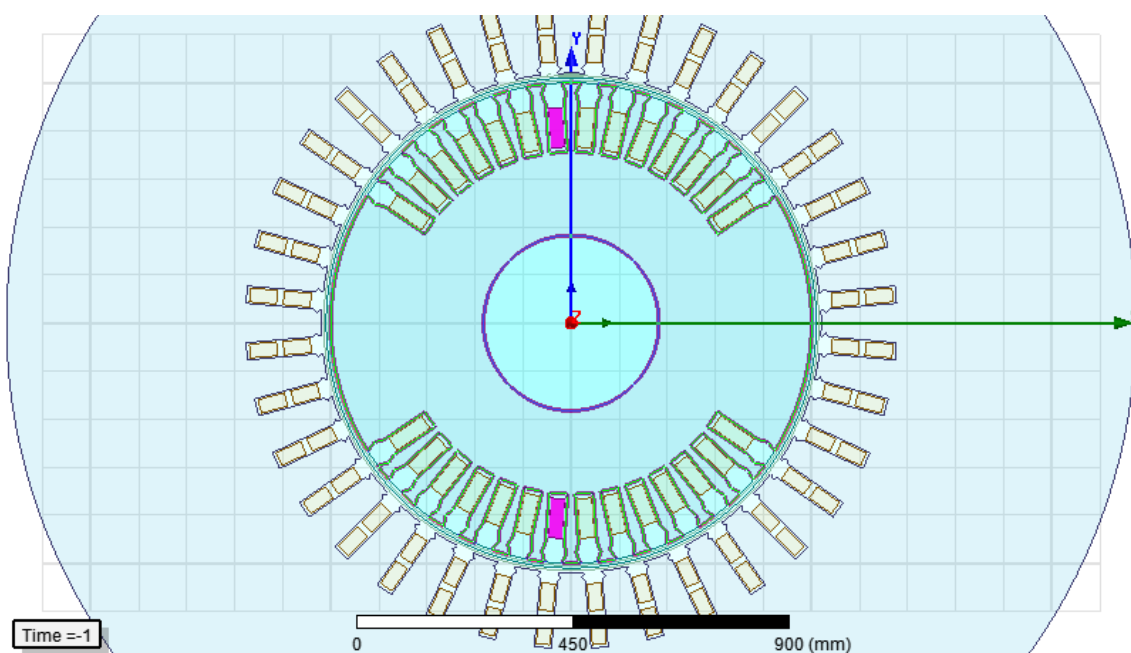


Figura 4-3- exemplo de posição dos condutores de uma mesma bobina do circuito de campo

Para facilitar a identificação das bobinas em curto, a figura 5-4 mostra a identificação de cada bobina que terá algum defeito inserido. Deixando claro que os curtos serão aplicados em cada bobina individualmente, para que o efeito de cada um possa ser percebido de maneira separada.

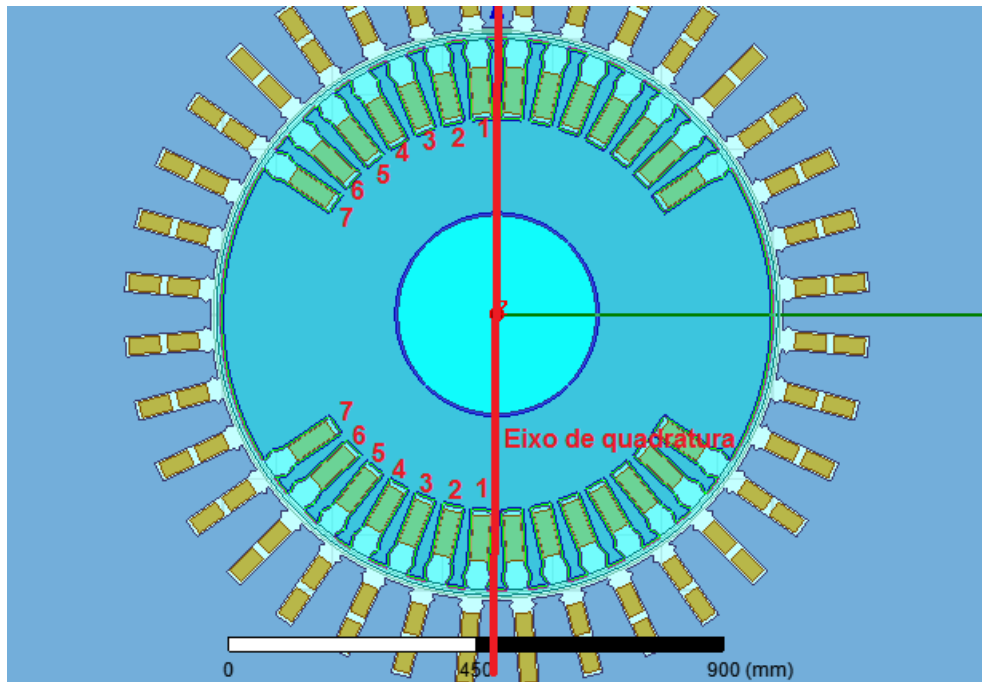


Figura 4-4 – identificação das bobinas que terão curtos inseridos

E, como já falado ao longo da seção, os resultados obtidos na simulação da máquina originalmente livre de defeitos e da máquina preparada para receber os defeitos foi satisfatória, validando a modelagem que será utilizada no próximo capítulo, no qual os defeitos serão inseridos e os resultados serão apresentados.

### 4.3. Máquina com curto na bobina #1

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #1. Conforme a figura 5-5, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

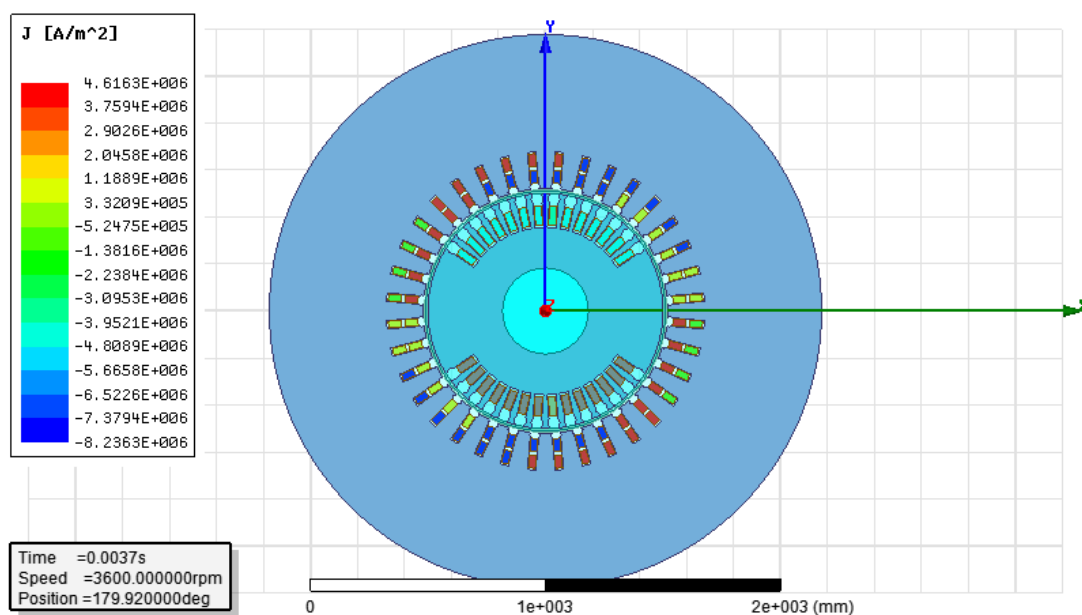


Figura 4-5 - posição da bobina #1, na qual o curto foi aplicado



➤ **TESTE EM CARGA:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

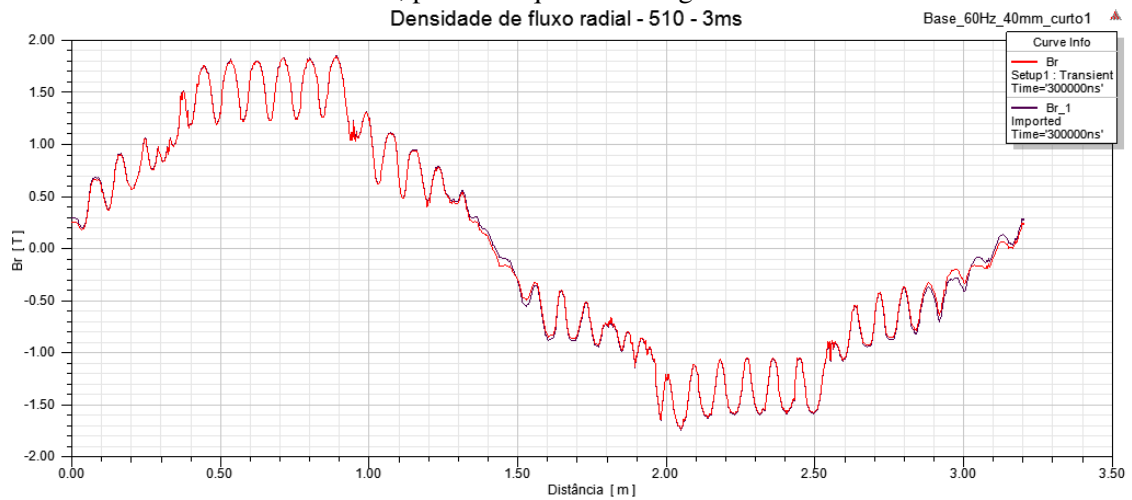


Figura 4-6 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

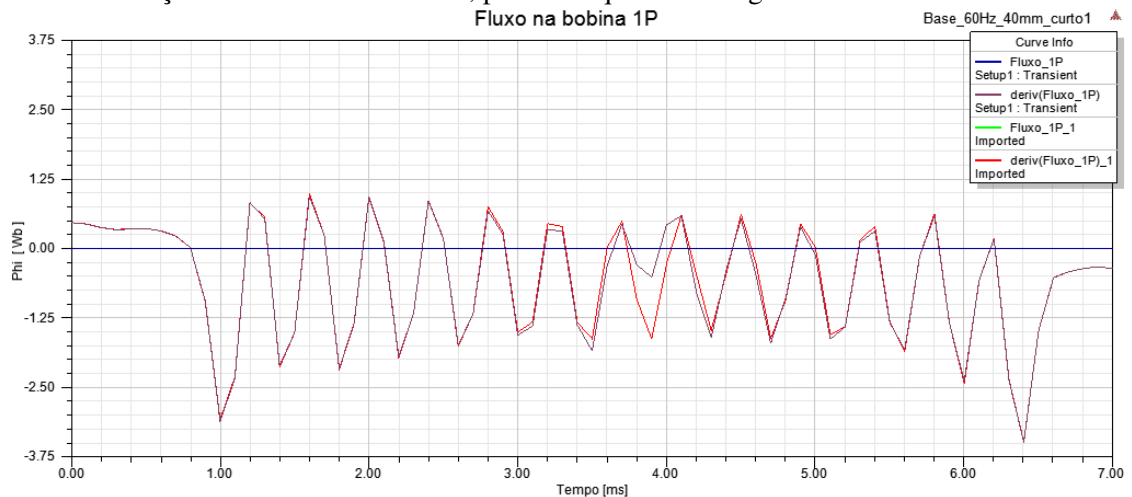


Figura 4-7 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

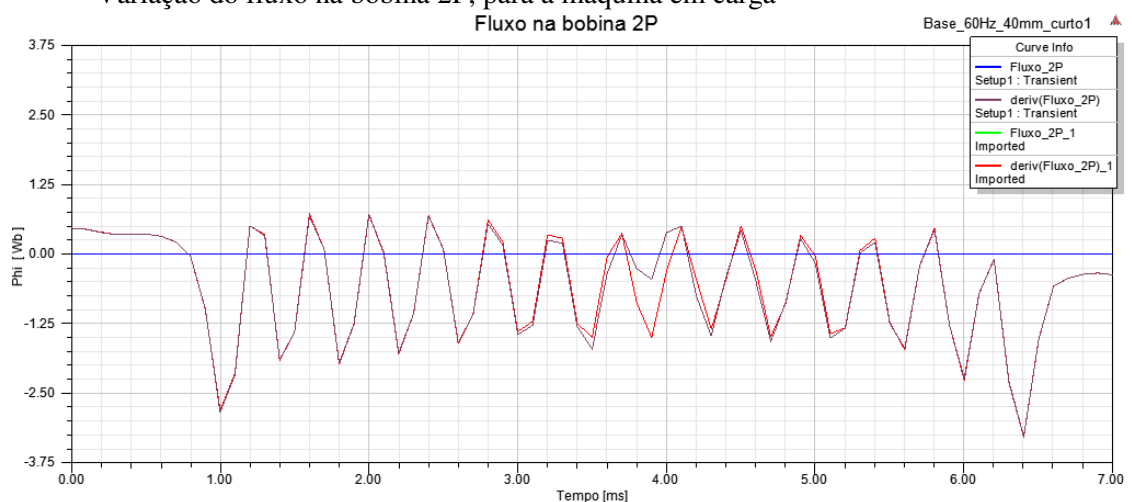


Figura 4-8 - variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

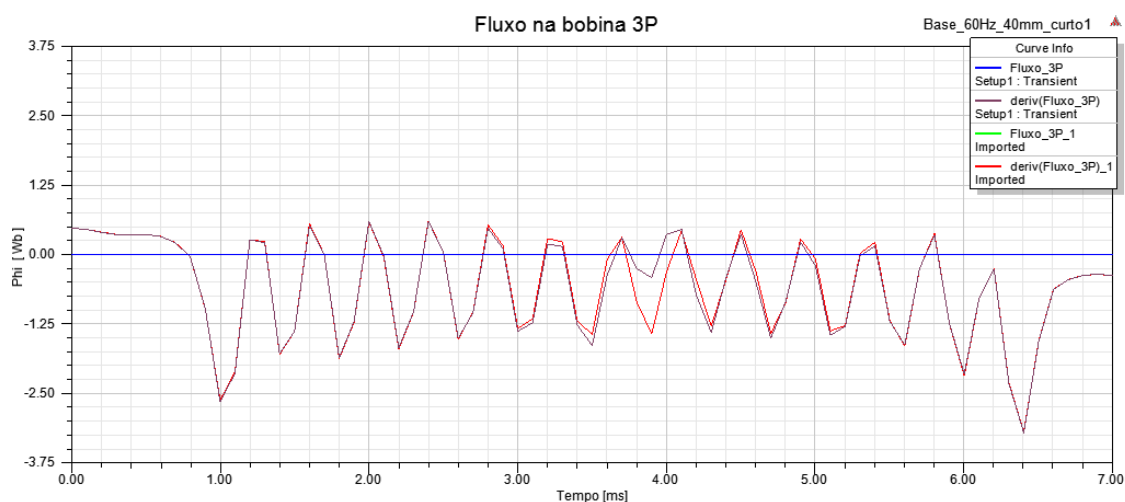


Figura 4-9 - variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

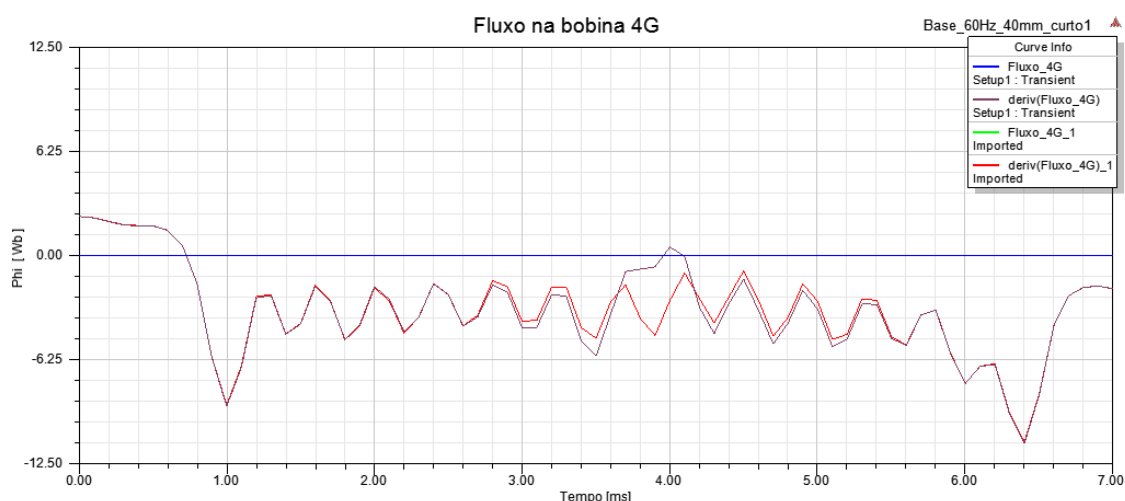


Figura 4-10 - variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto na bobina #1

Para os resultados da máquina em carga é possível perceber o que a bobina mais próxima da superfície do rotor tem maior sensibilidade para indicar a quantidade de espiras em curto que os demais e que a bobina de maior tamanho tem boa sensibilidade para indicar o local do curto sem indicar a quantidade de espiras em curto. A observação da quantidade de espiras em curto se dá pela comparação proporcional da amplitude dos picos de medição da variação do fluxo magnético, ou seja, metade das espiras em curto implica em metade da amplitude do pico, uma espira em curto implica na redução de 1/12 (um doze avos) da amplitude, e segue assim para todos os possíveis cenários.

#### ➤ **TESTE DE CURTO CIRCUITO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

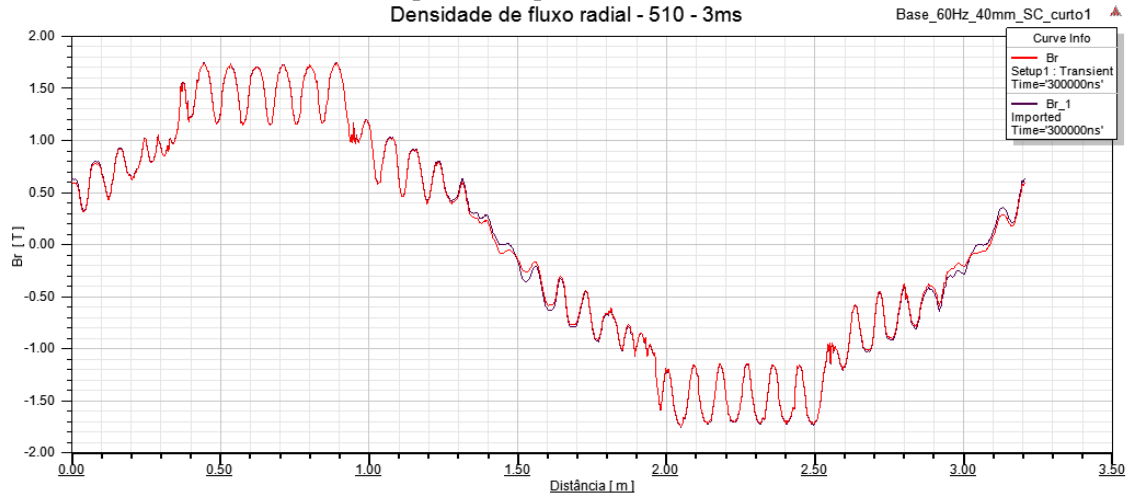


Figura 4-11 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

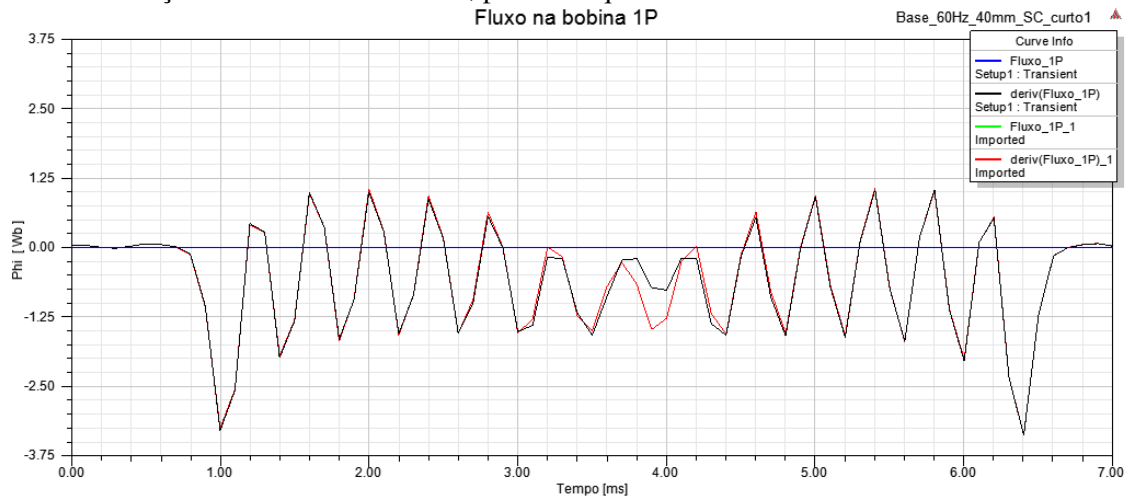


Figura 4-12 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

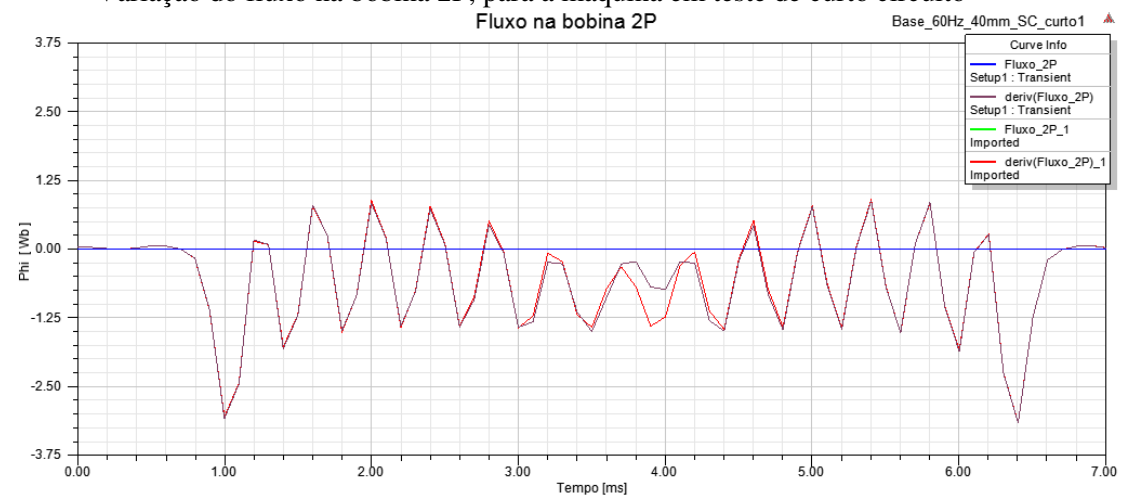


Figura 4-13 - variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

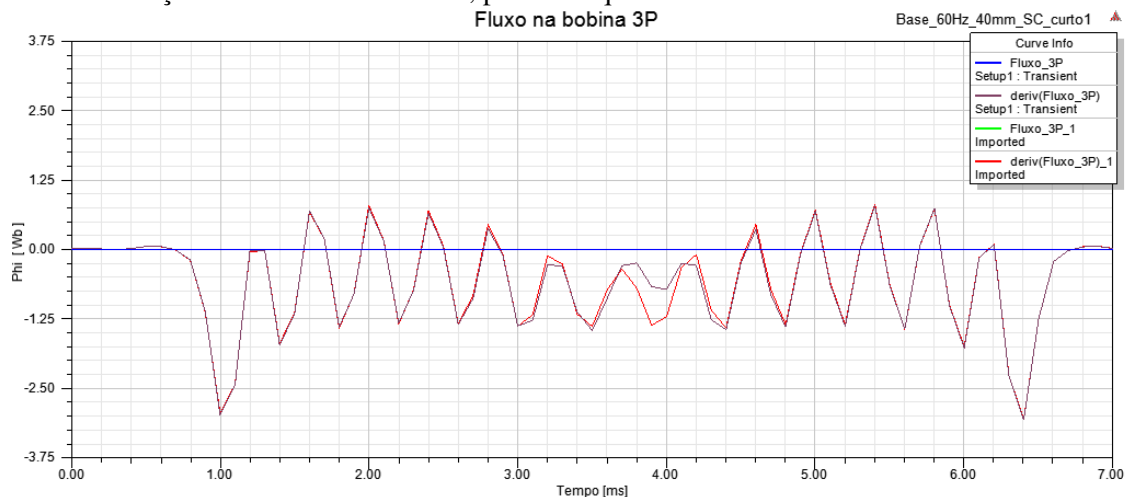


Figura 4-14-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

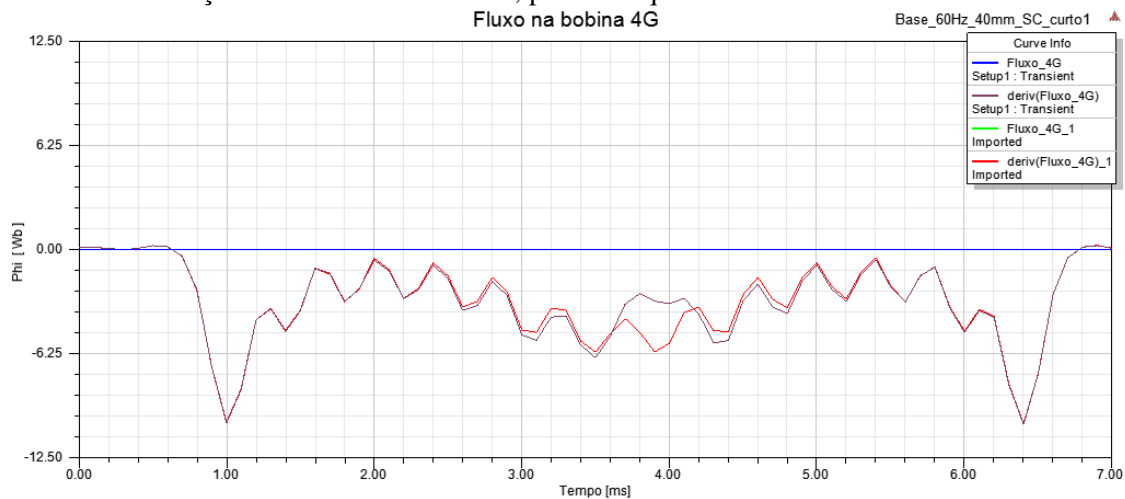


Figura 4-15-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #1

Para os resultados da máquina em teste de curto circuito é possível ter percepções similares às obtidas com a máquina em carga, porém com uma menor sensibilidade em todos os cenários simulados.

#### ➤ **TESTE DE CIRCUITO ABERTO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

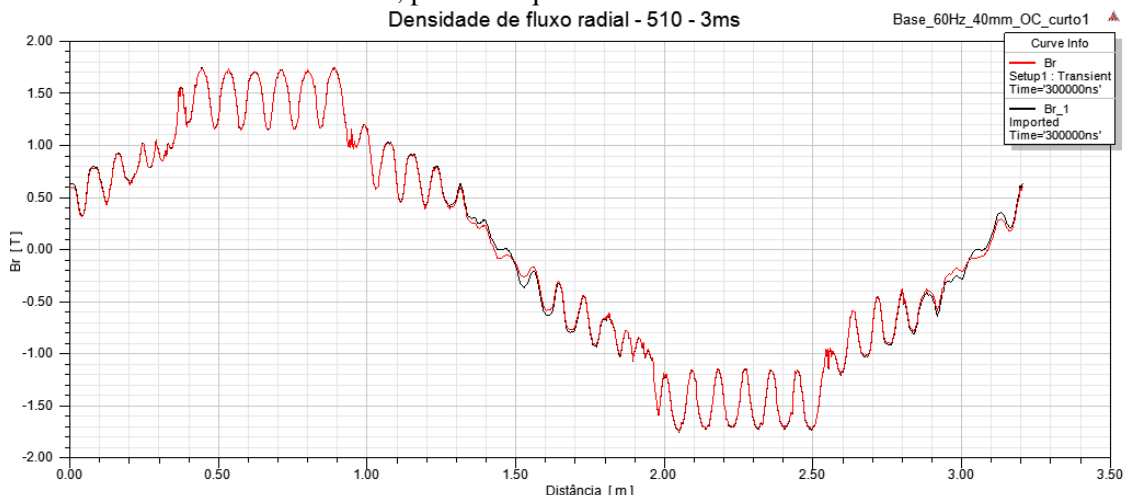


Figura 4-16 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

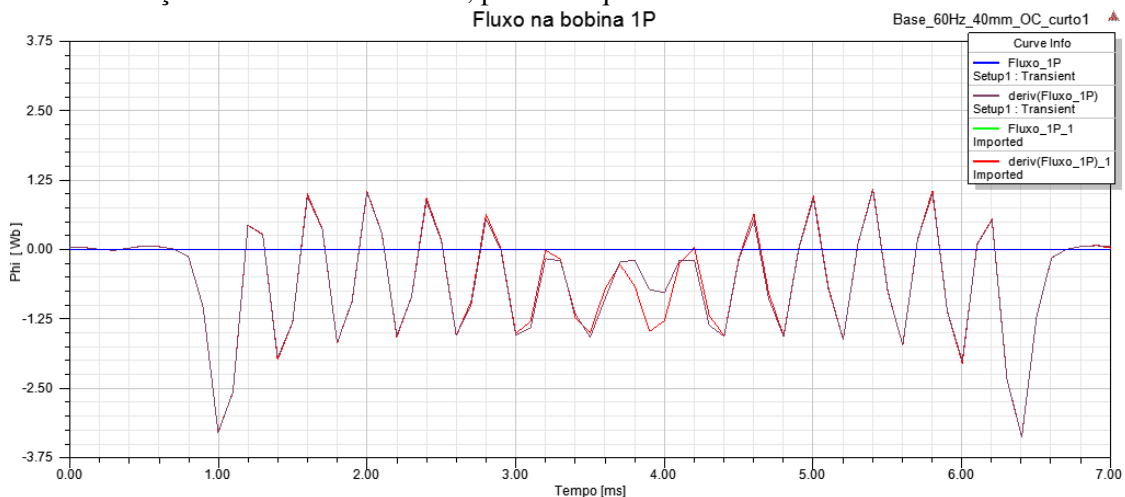


Figura 4-17-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

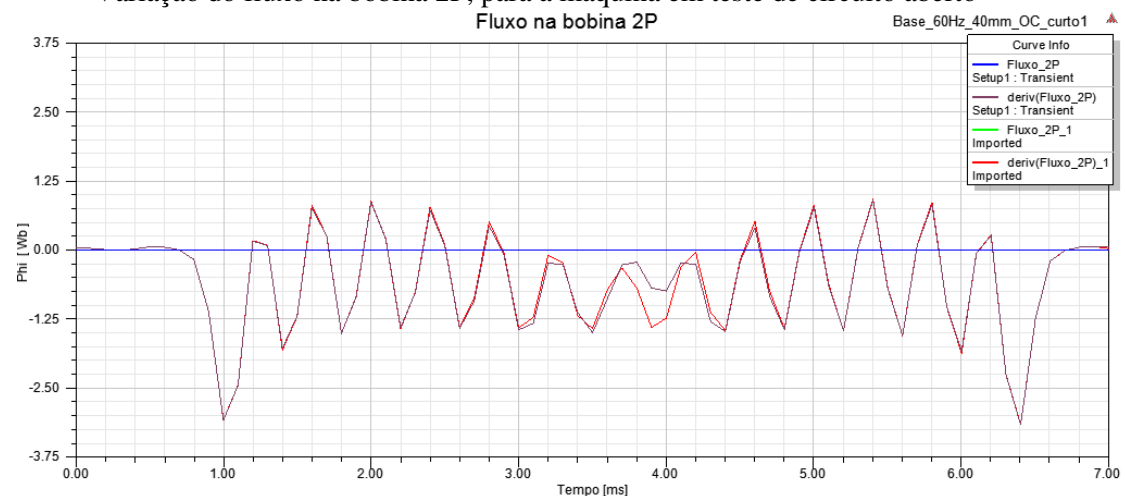


Figura 4-18-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

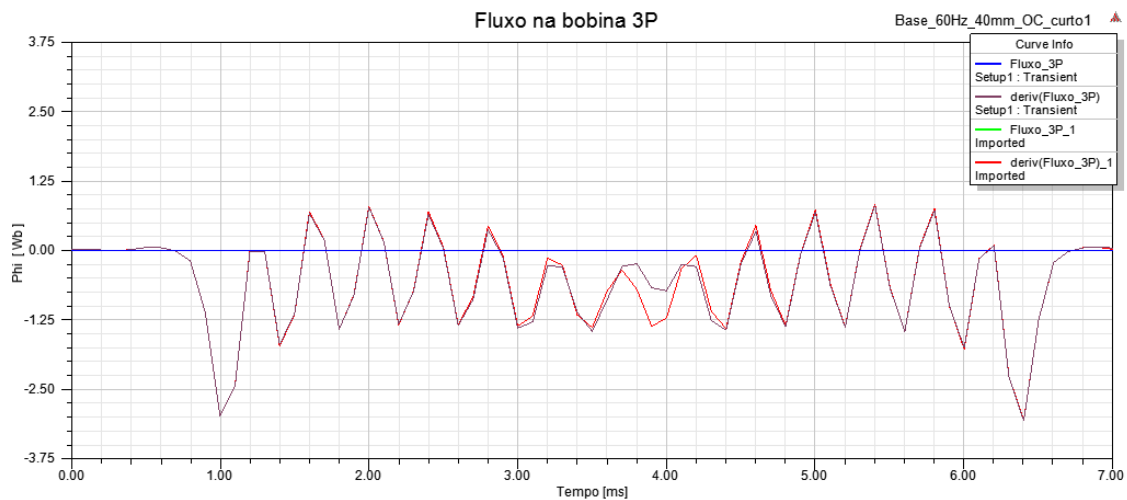


Figura 4-19-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

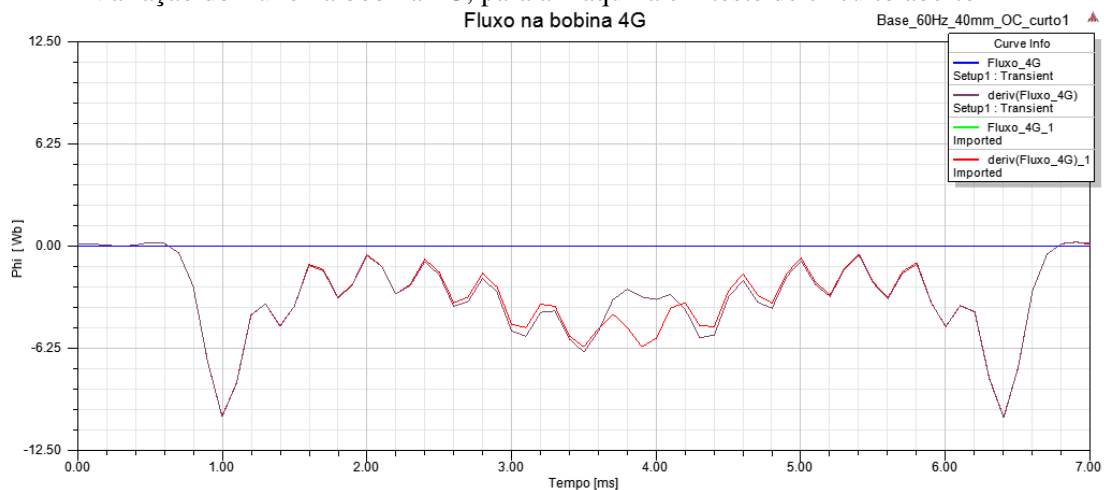


Figura 4-20-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #1

Para os resultados da máquina em teste de circuito aberto os resultados são bastante similares aos do teste de curto circuito, com uma menor sensibilidade em todos os cenários simulados em relação ao teste realizado com a máquina em carga.

As correntes terminais são apresentadas no gráfico da figura 5-18, e têm valor de pico de 6,7 kA, um valor 4,6% menor que os 7,02 kA da máquina sem defeitos. Em uma situação real essa variação deve ser atenuada, pois o sistema de excitação, que trabalha em malha fechada com os valores terminais da máquina, altera automaticamente os valores de corrente de excitação (que nesse estudo é fixo) para atingir os valores nele ajustados. Além do curto entre espiras do rotor há diversas outras causas, tais quais temperatura, ventilação, e outros que não são necessariamente defeitos, mas que podem afetar os valores terminais e, com isso, o sistema de excitação age para ficar dentro das tolerâncias dos ajustes operacionais da máquina.

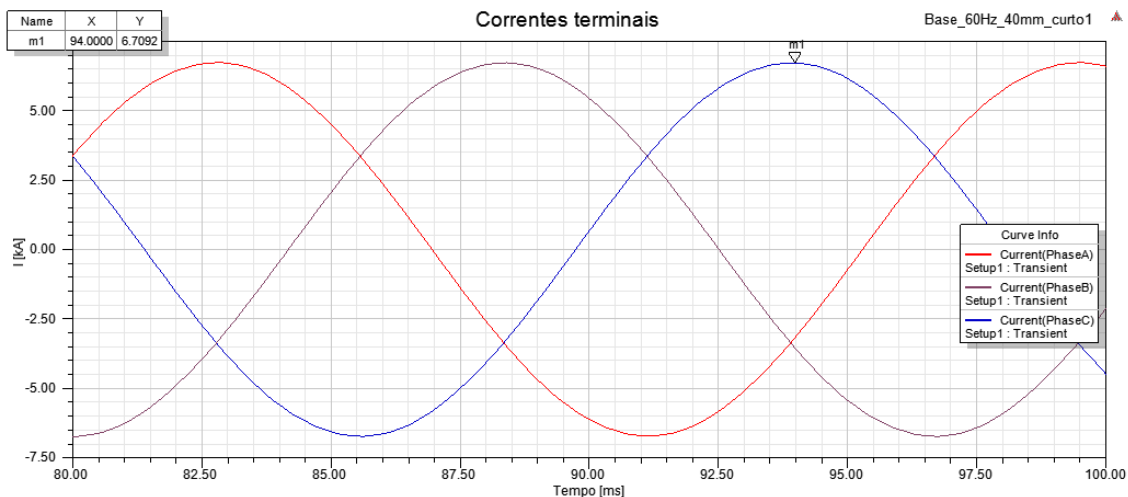


Figura 4-21 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto na bobina #1

#### 4.4. Máquina com curto na bobina #1 (todas as espiras em curto)

Nesse cenário o curto é aplicado em todas as espiras (em 12 das 12) da bobina #1. Conforme a figura 5-22, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

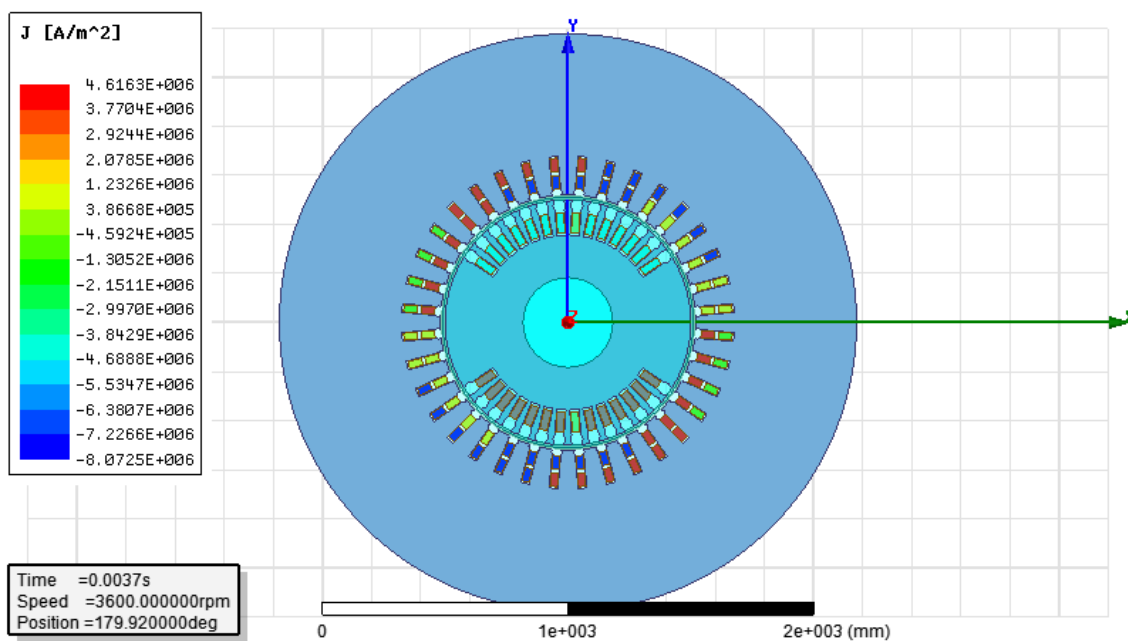


Figura 4-22 - posição da bobina #1, na qual o curto total foi aplicado

➤ **TESTE EM CARGA:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

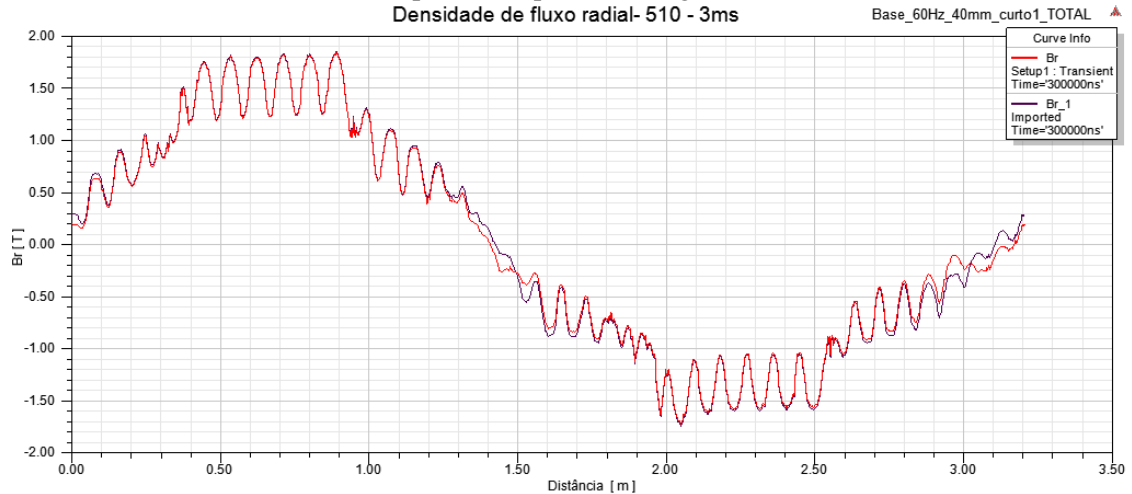


Figura 4-23 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

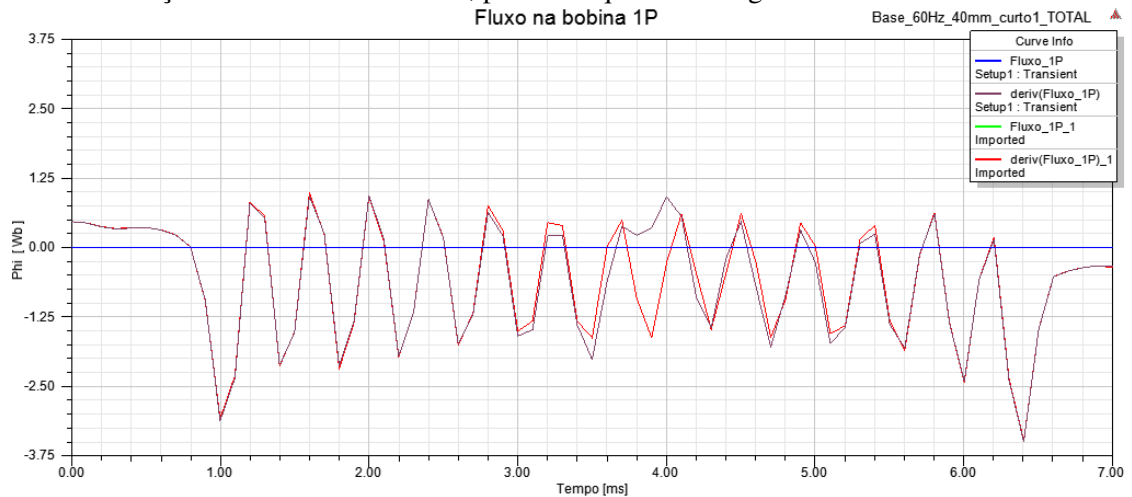


Figura 4-24-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

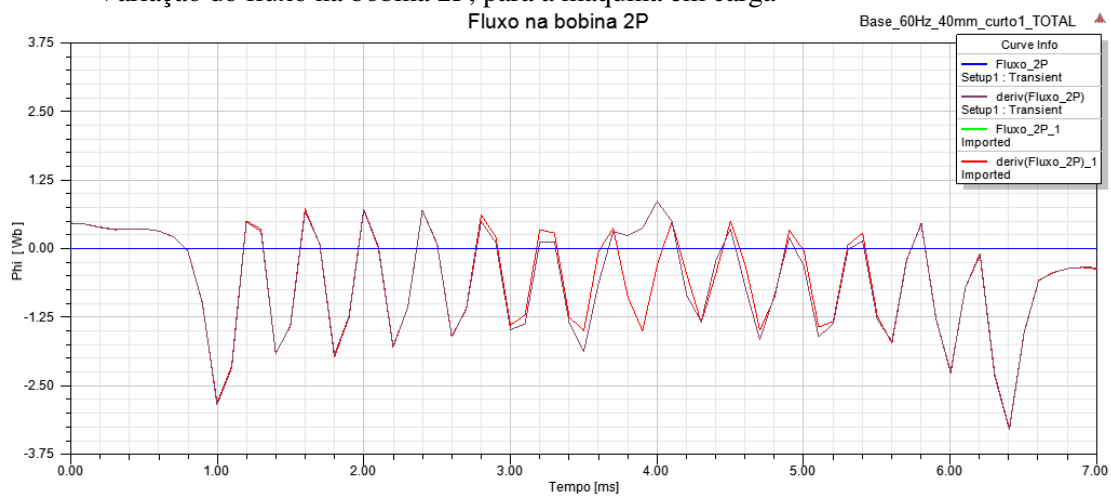


Figura 4-25-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1



- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

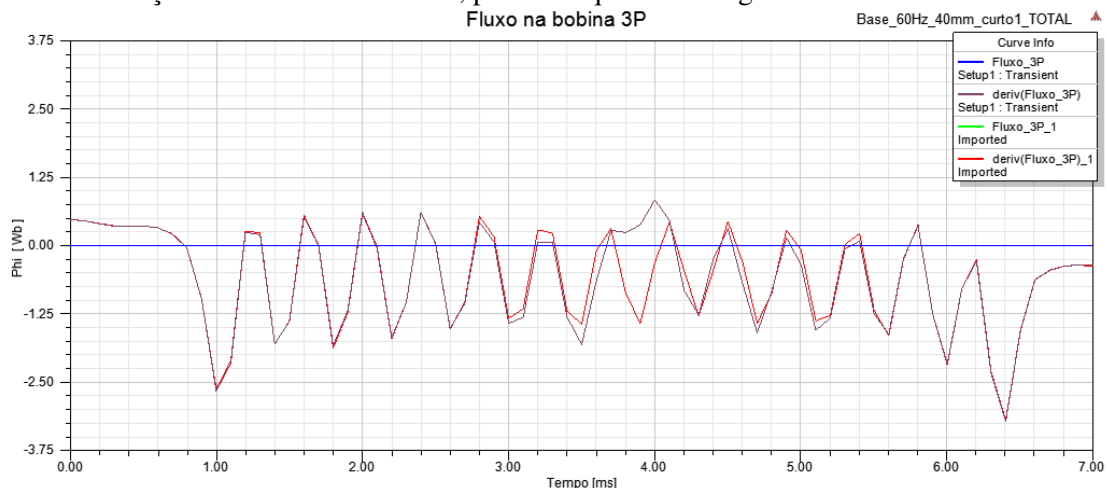


Figura 4-26-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

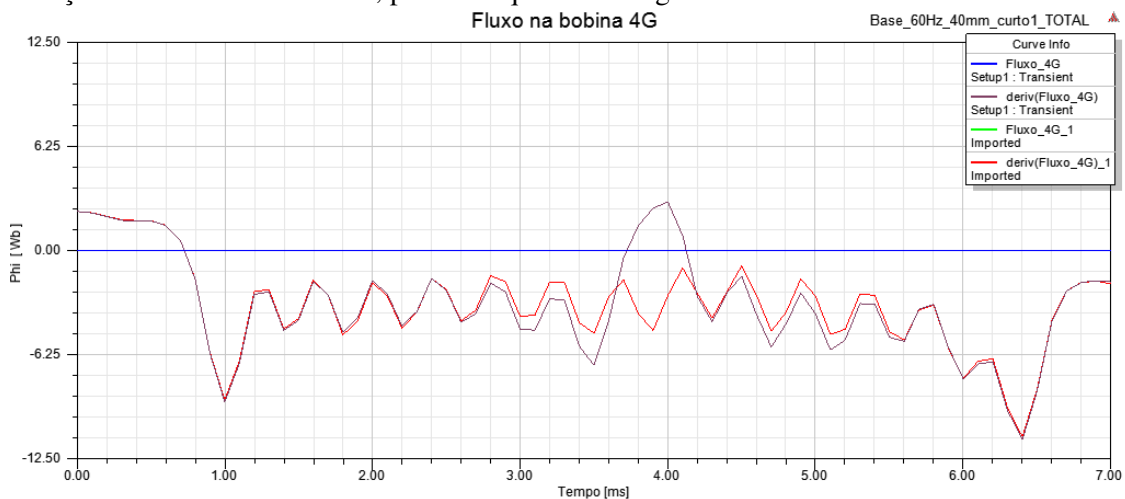


Figura 4-27-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto total na bobina #1

➤ **TESTE DE CURTO CIRCUITO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

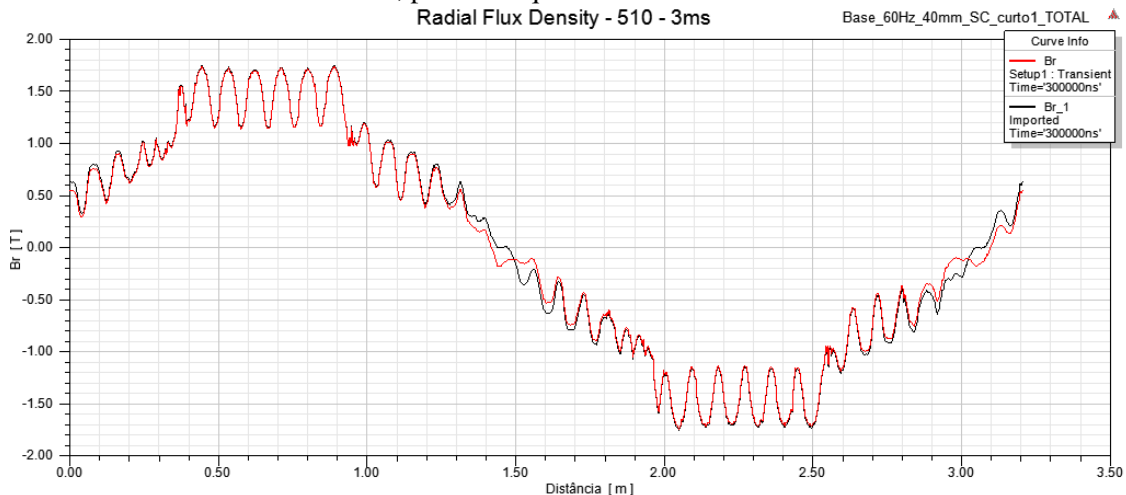


Figura 4-28 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

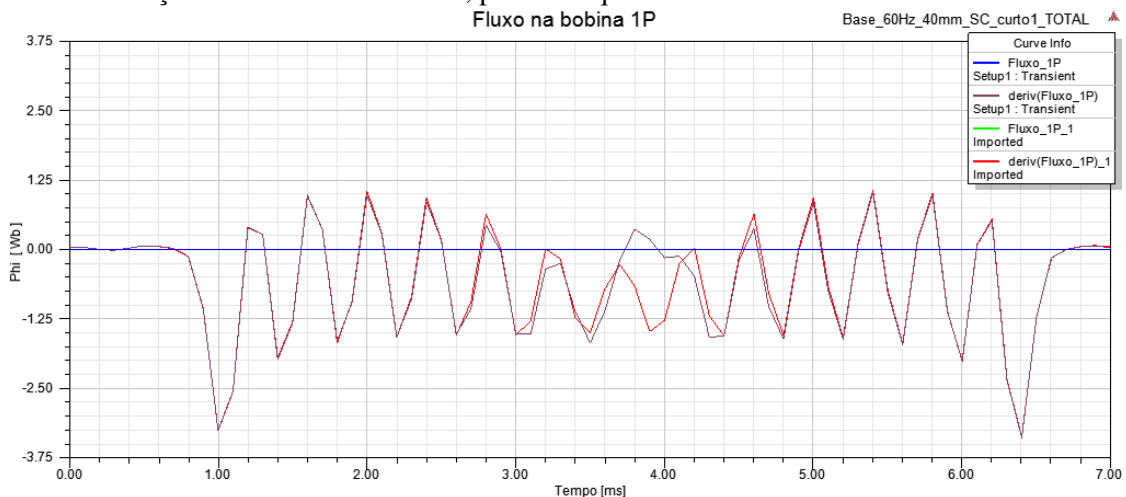


Figura 4-29 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

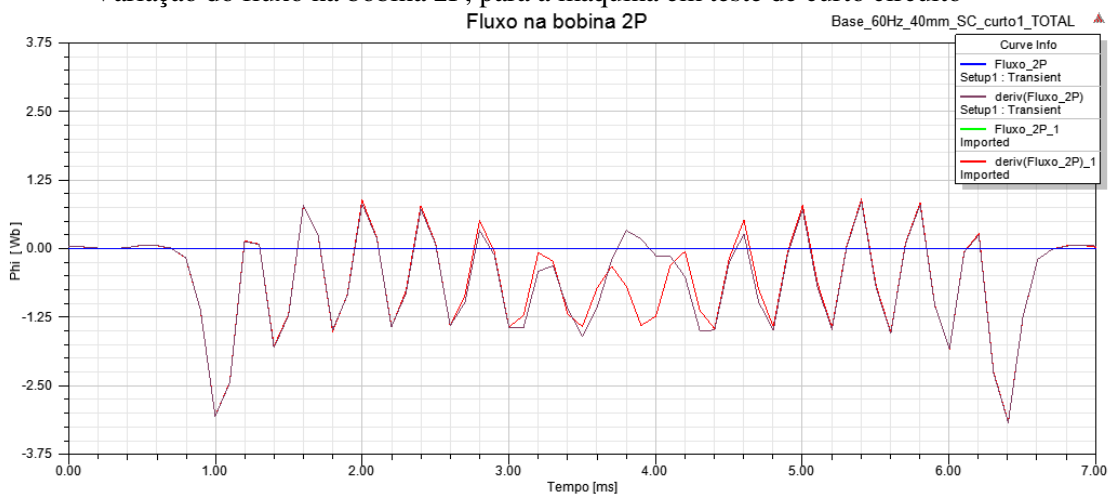


Figura 4-30-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

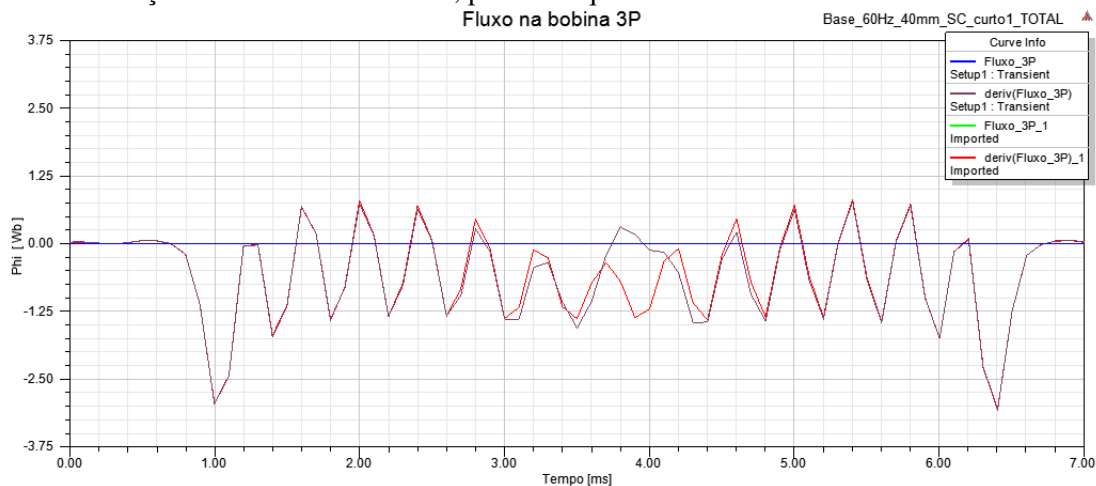


Figura 4-31-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

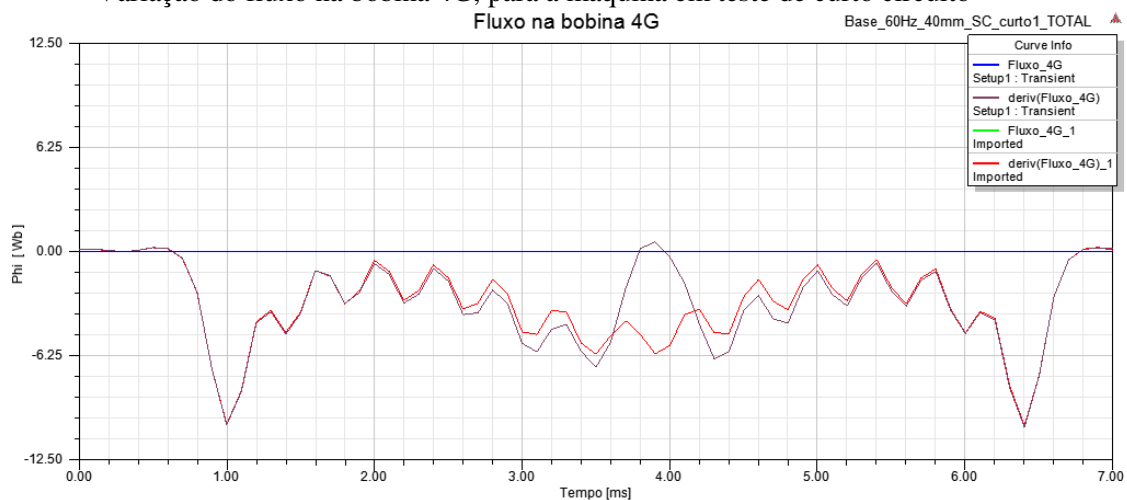


Figura 4-32-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto total na bobina #1

➤ **TESTE DE CIRCUITO ABERTO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

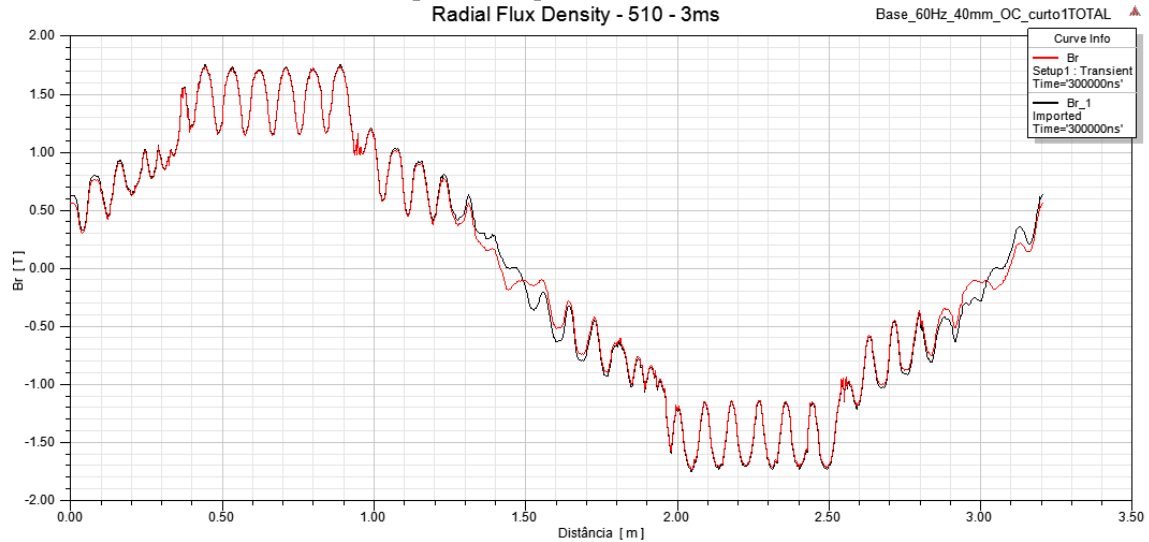


Figura 4-33 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

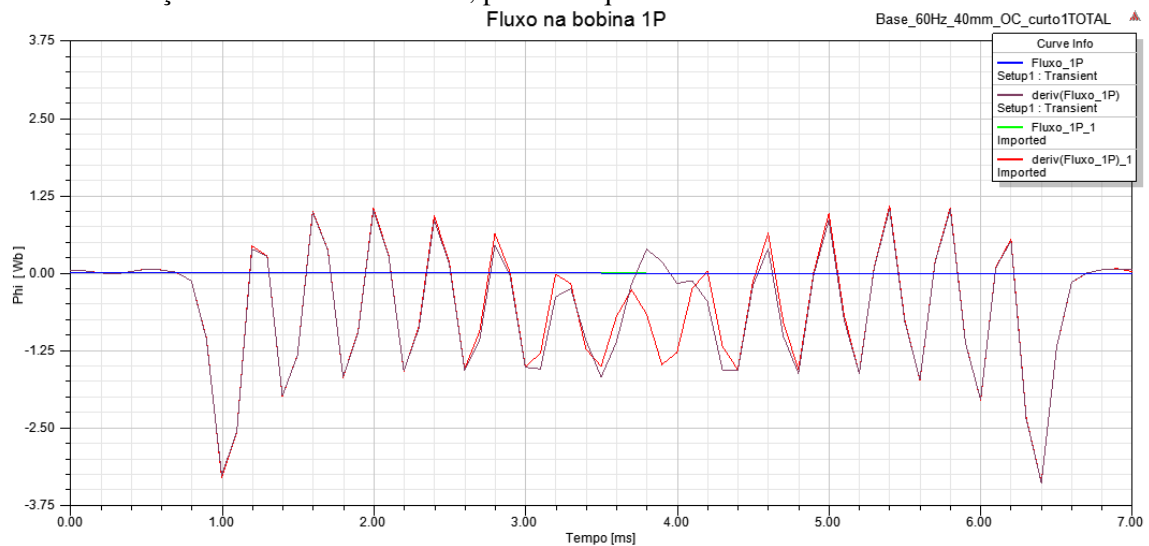
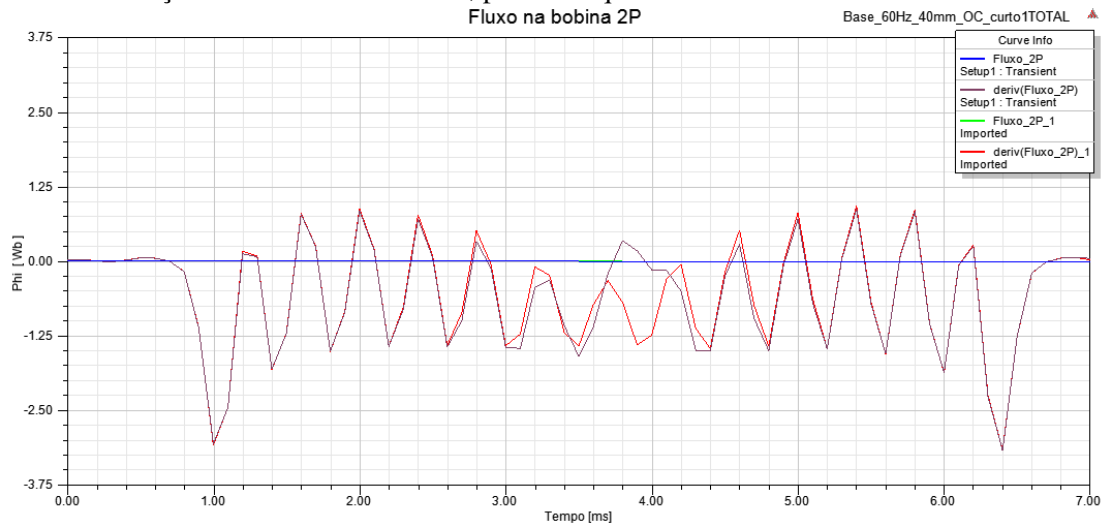


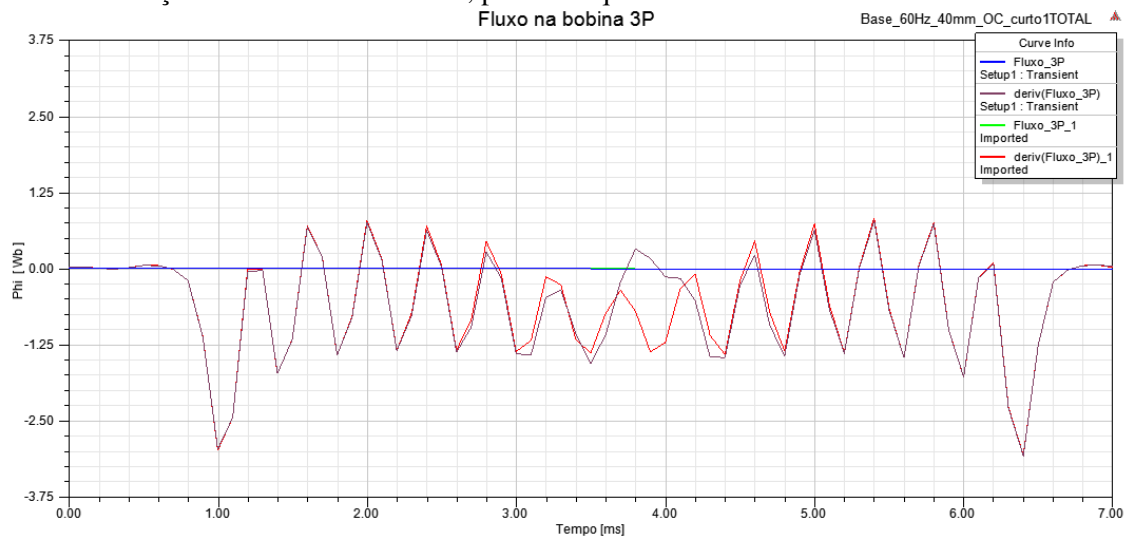
Figura 4-34- variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto



*Figura 4-35-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1*

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto



*Figura 4-36-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1*

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

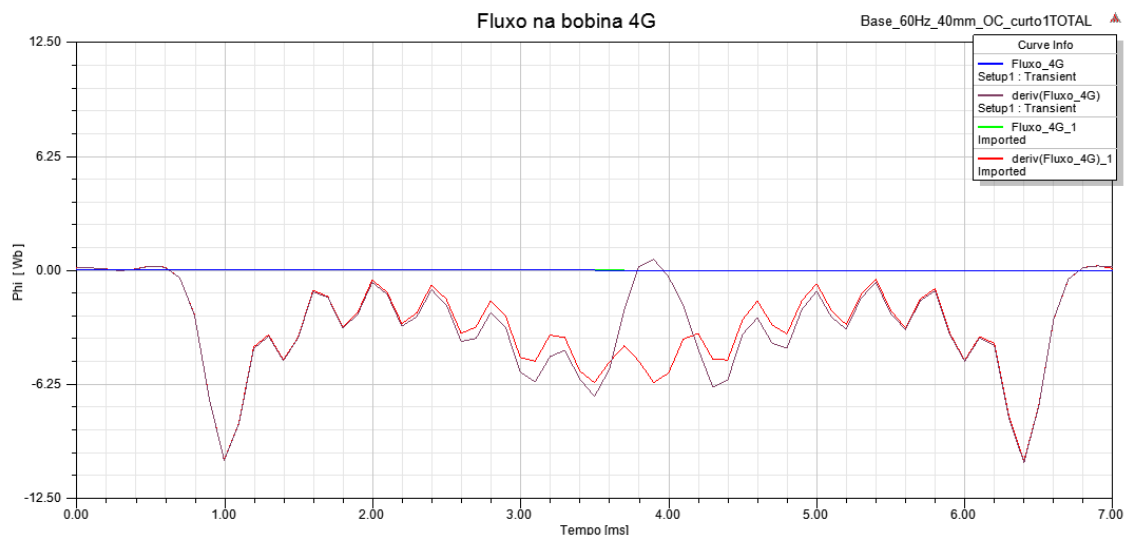


Figura 4-37-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto total na bobina #1

Mais uma vez as simulações da máquina em carga mostram melhor sensibilidade para a bobina mais próxima do rotor, e a bobina maior mostra bom resultado para indicar a existência e a posição do curto, sem estimar a quantidade de espiras em curto.

Para esse cenário de toda uma bobina em curto, que é um caso extraordinário realizado apenas para fins de estudo, o gráfico da figura 5-35, tem valor de pico de 6,50 kA, um valor 7,4% menor que os 7,02 kA da máquina sem defeitos.

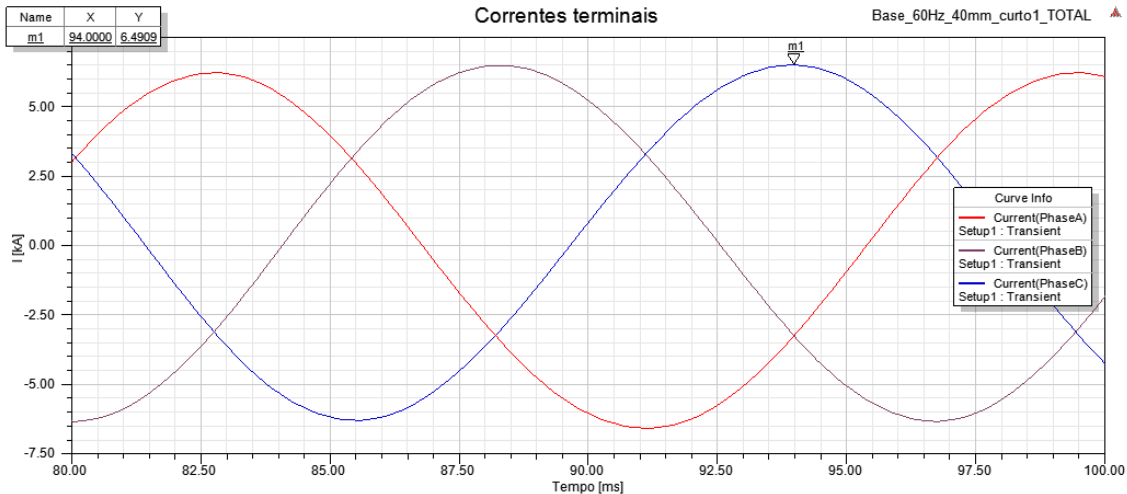


Figura 4-38 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto total na bobina #1

#### 4.5. Máquina com curto na bobina #2

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #2. Conforme a figura 5-39, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

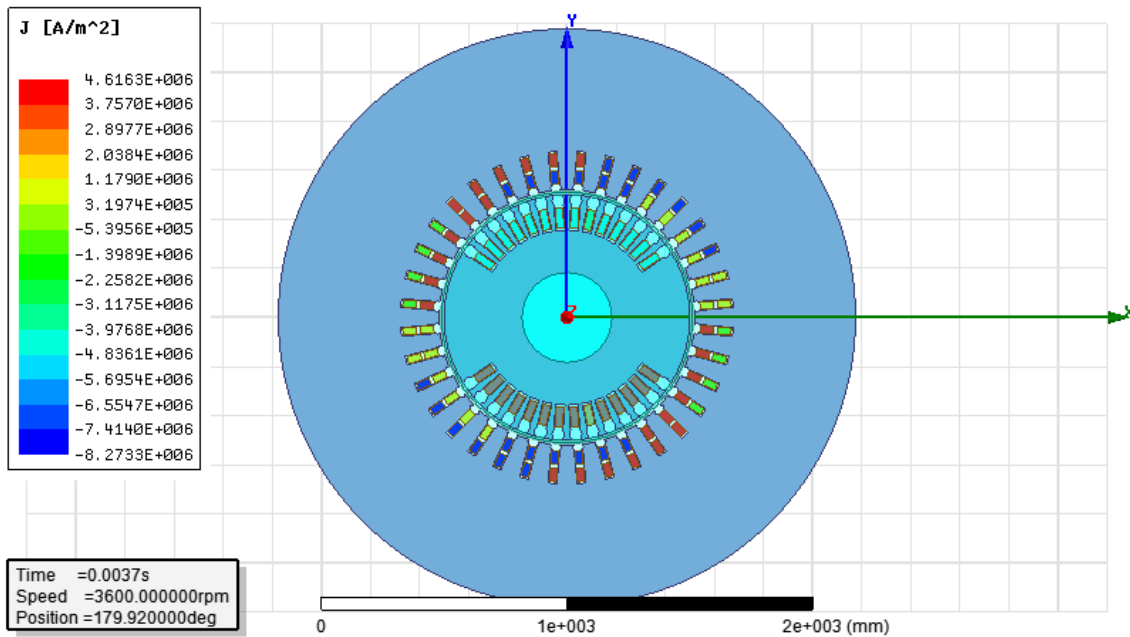


Figura 4-39 - posição da bobina #2, na qual o curto foi aplicado

➤ **TESTE EM CARGA:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

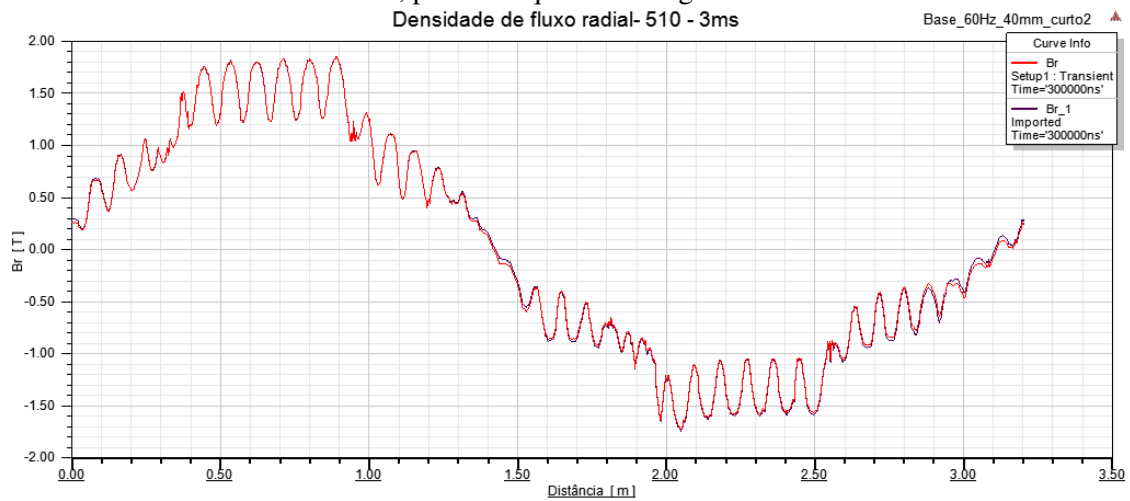


Figura 4-40 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

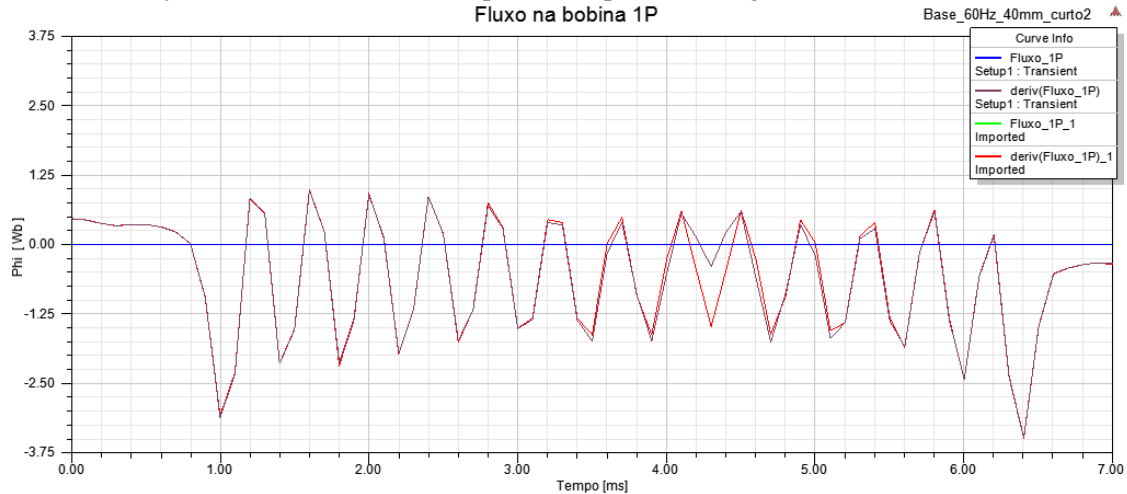


Figura 4-41-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

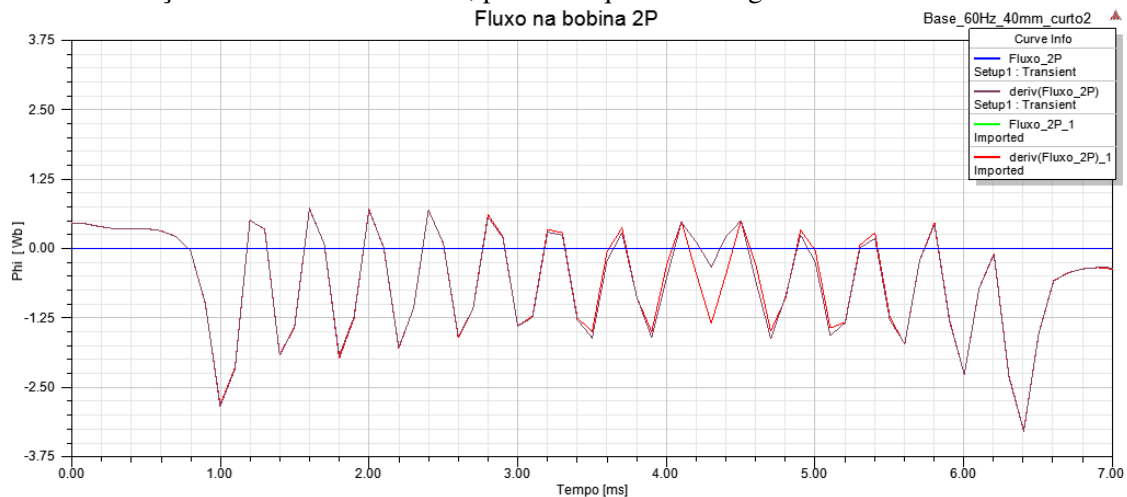


Figura 4-42-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

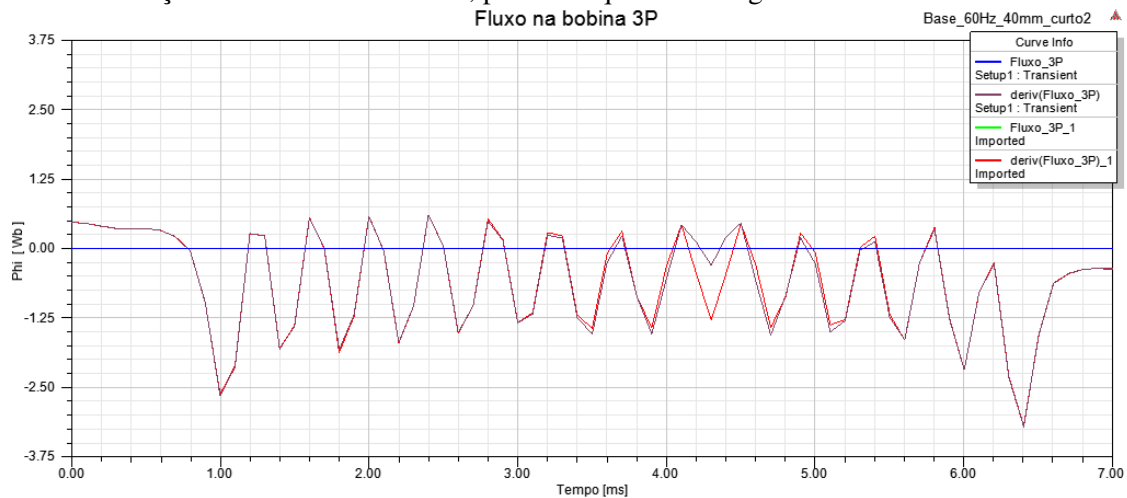


Figura 4-43-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #2



- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

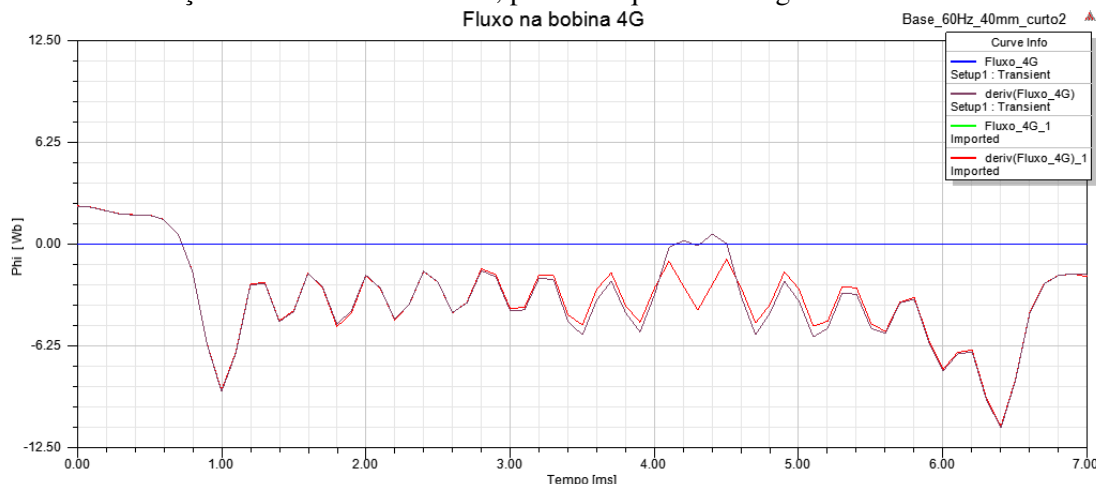


Figura 4-44- variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga com curto na bobina #2

### ➤ TESTE DE CURTO CIRCUITO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

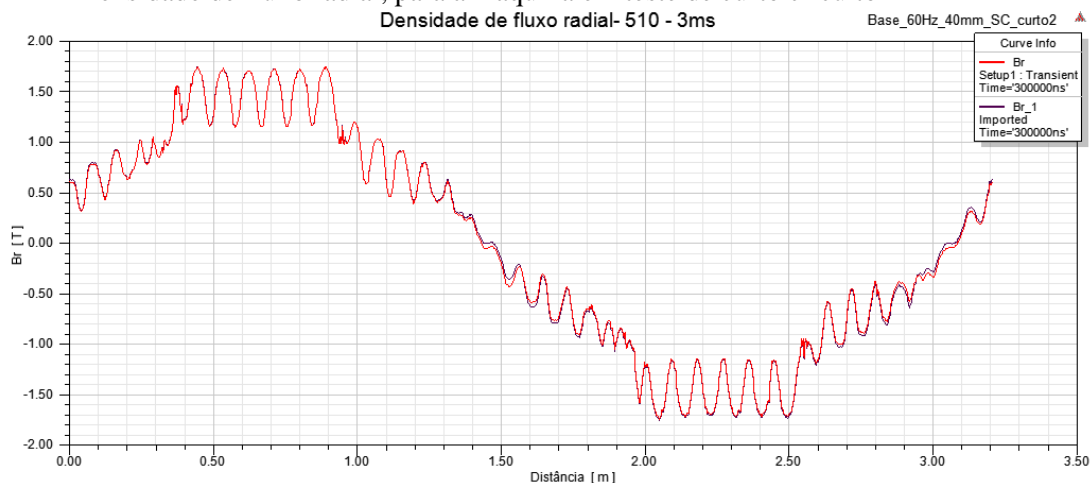


Figura 4-45 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

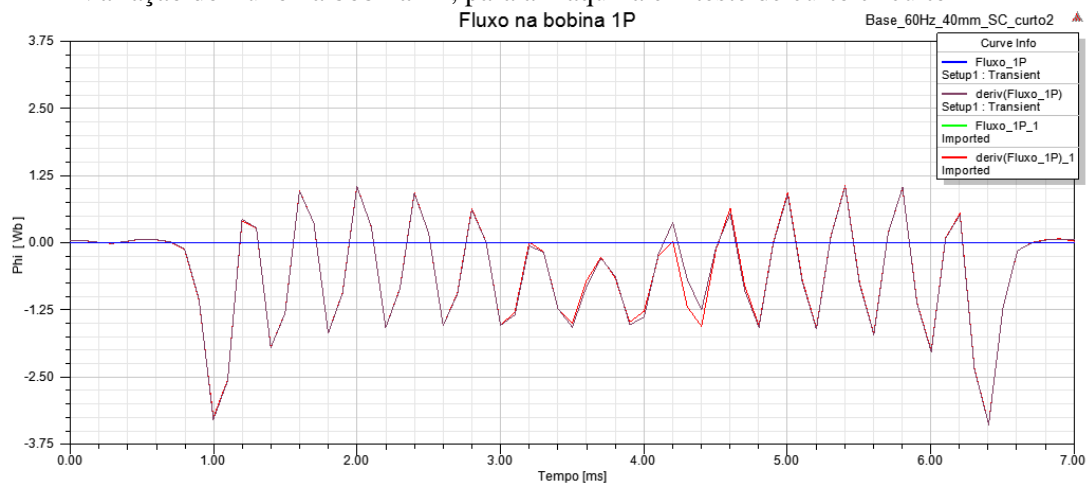


Figura 4-46 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

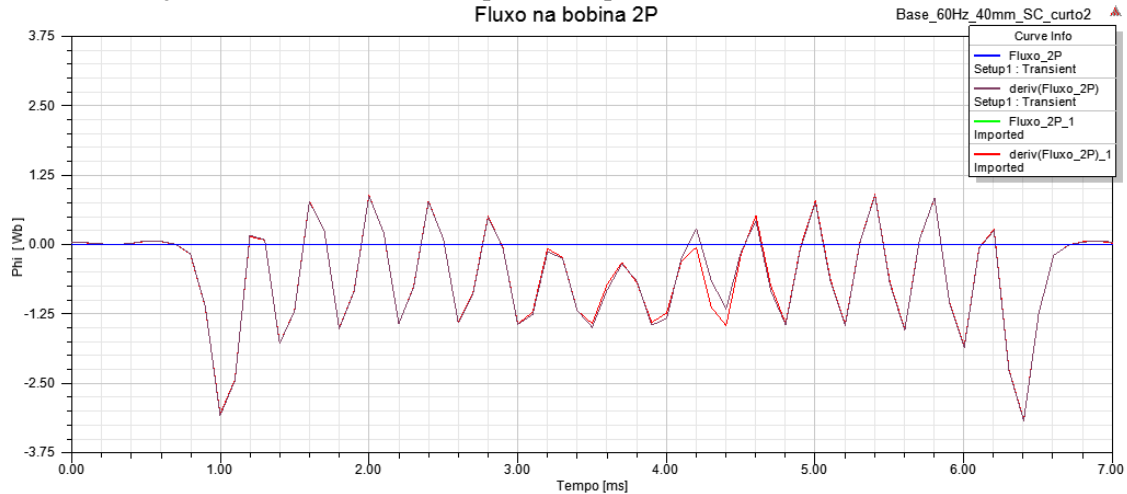


Figura 4-47-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

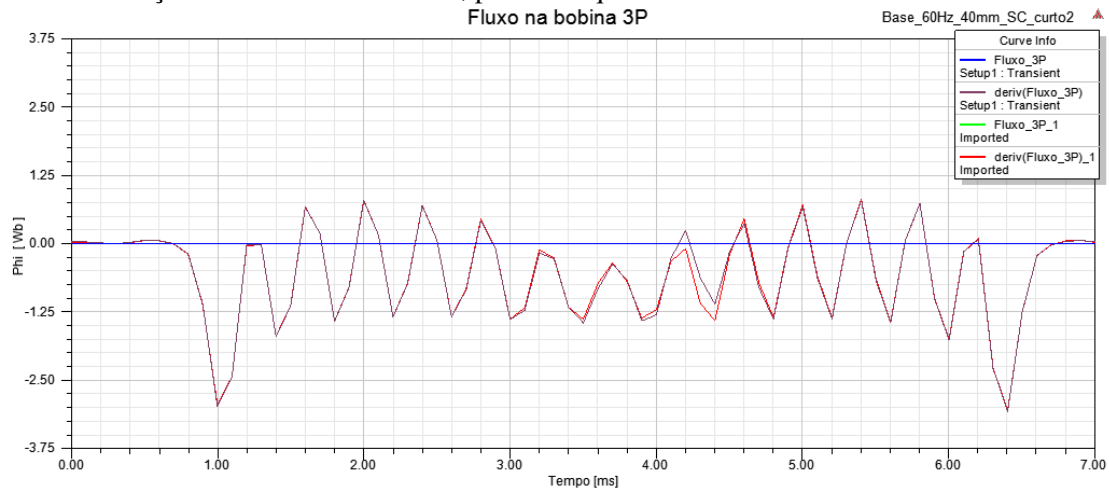


Figura 4-48-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

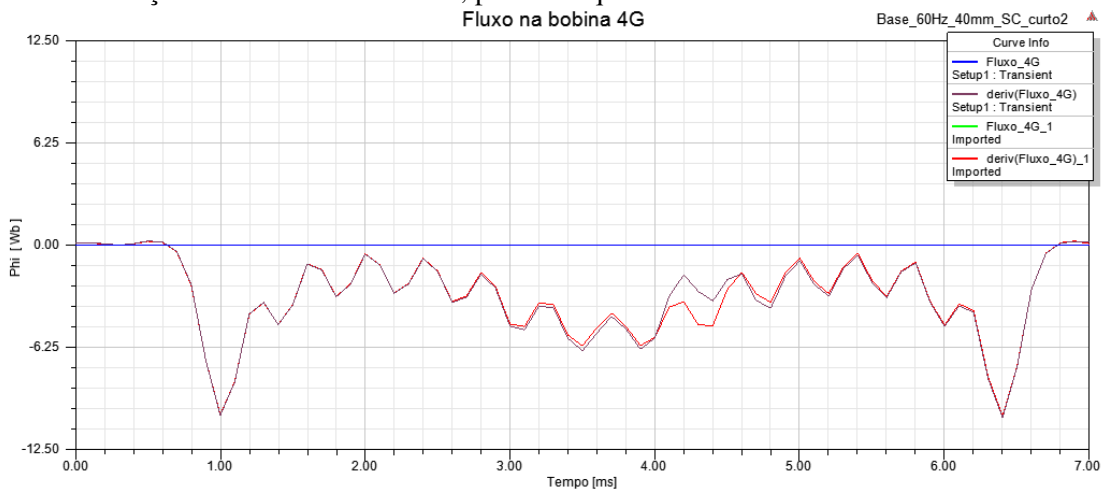


Figura 4-49-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #2

➤ **TESTE DE CIRCUITO ABERTO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

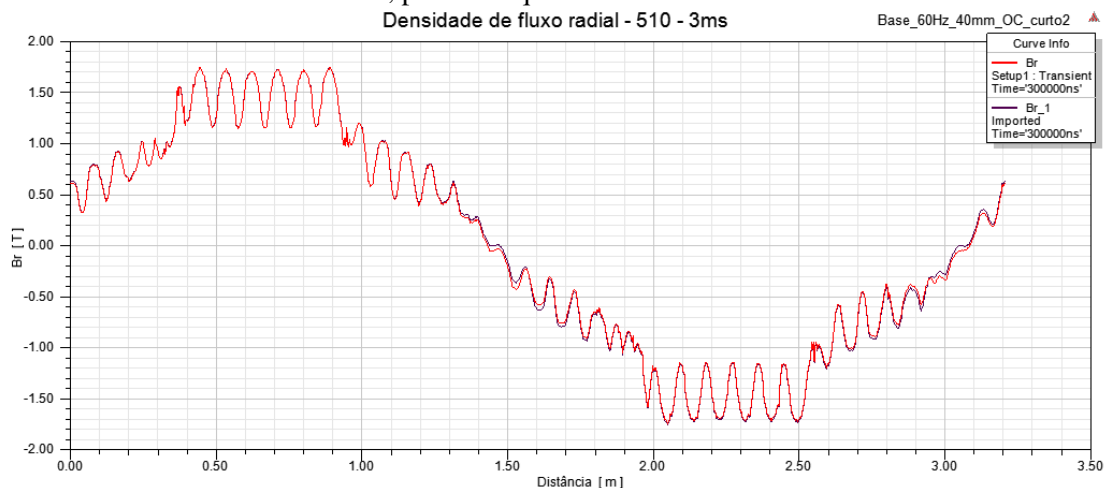


Figura 4-50 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

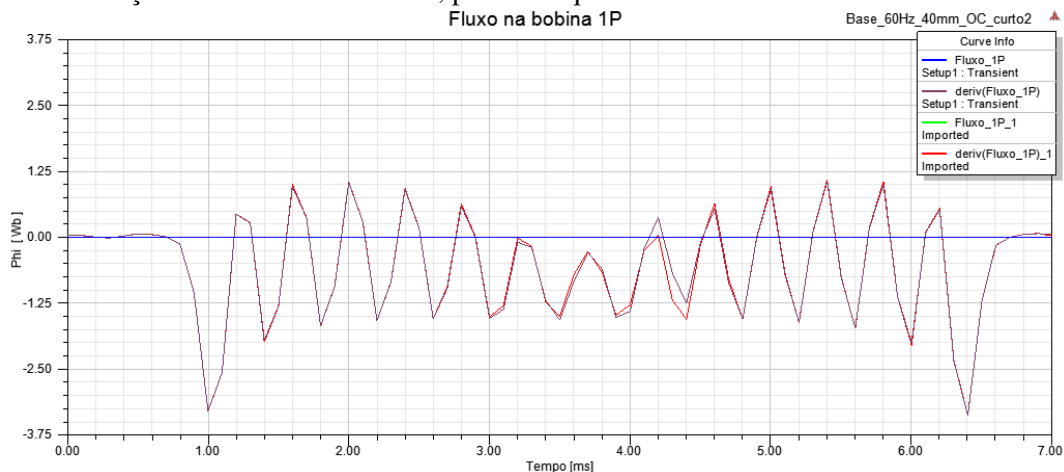


Figura 4-51-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

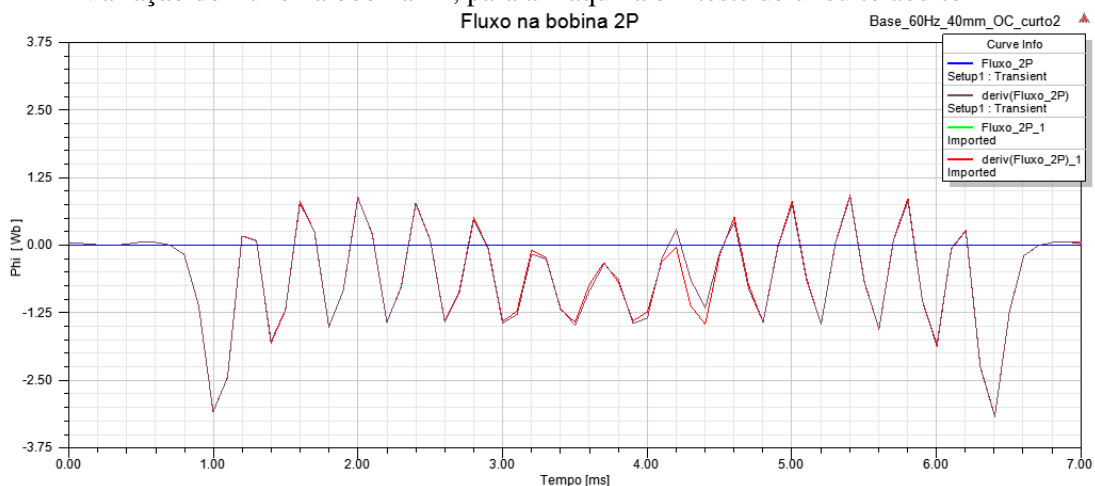


Figura 4-52-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

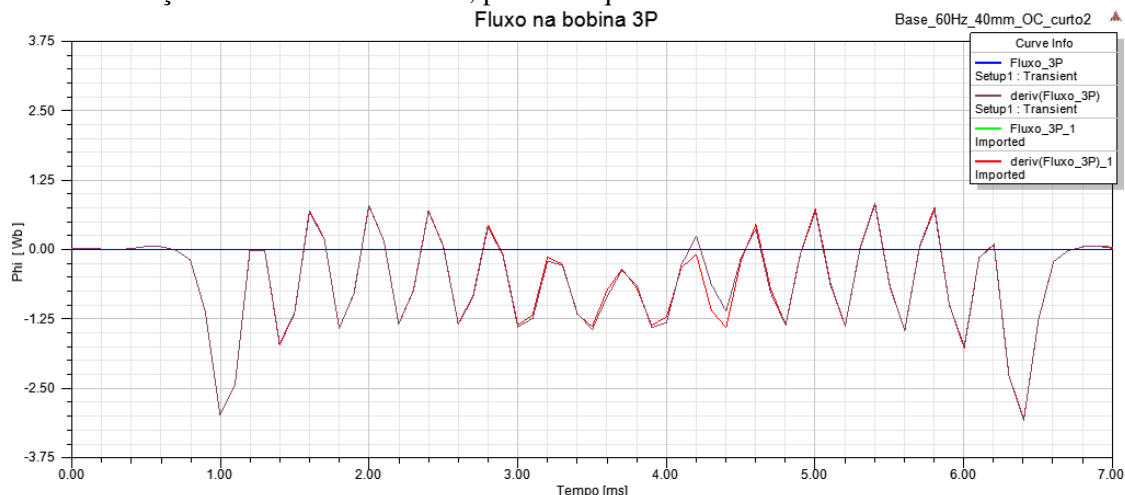


Figura 4-53-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

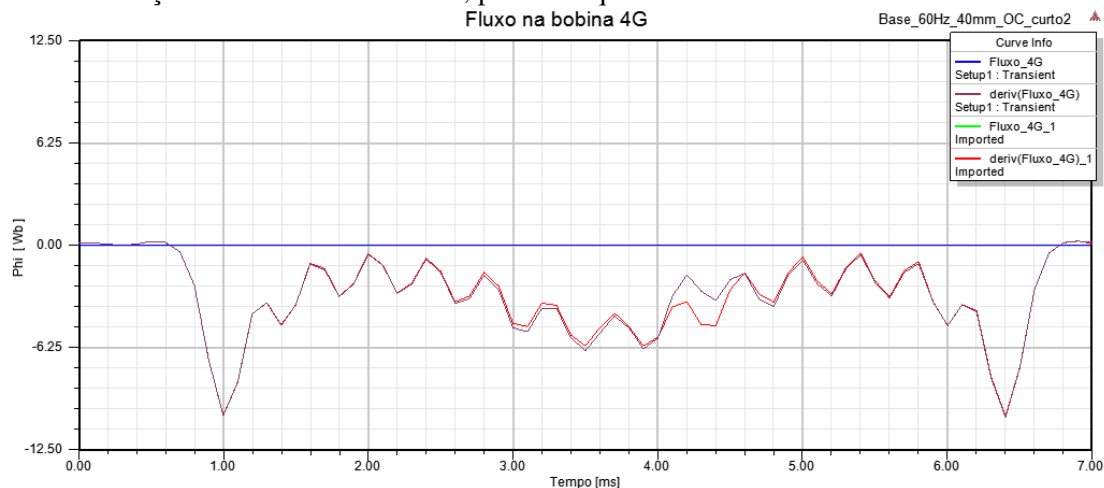


Figura 4-54-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #2

Os resultados e suas respectivas análises para o curto na segunda bobina em relação ao eixo de quadratura são similares aos obtidos para o curto na primeira bobina.

Nesse cenário o resultado, figura 5-52, foi o mesmo do cenário apresentado na seção 5.2 e mostrado na figura 5-18, com valor de pico de 6,50 kA, que é 7,4% menor que os 7,02 kA da máquina sem defeitos.

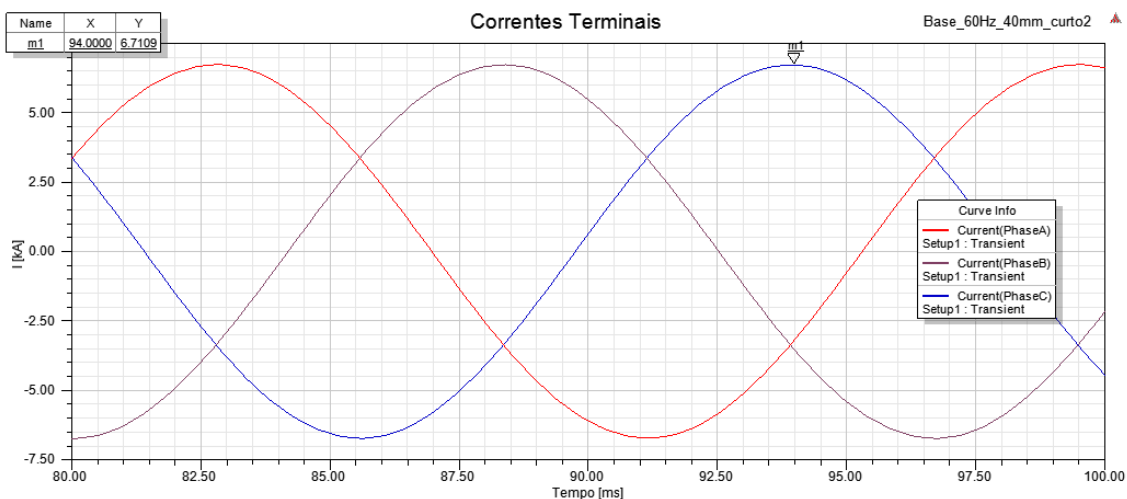


Figura 4-55 - valores de corrente terminal, para a máquina em carga com curto na bobina #2

Essa repetição de resultado ocorrida nos cenários simulados nas seções 5.2 e 5.4 também acontece nos demais cenários que serão apresentados nesse capítulo e não serão apresentados repetidamente. Também é interessante não esquecer a análise feita sobre a relação entre essa variação de corrente terminal percebida e a atuação do sistema de excitação, pois a ocorrência de curto entre espiras do rotor de uma máquina não significa que sua corrente terminal irá variar, uma vez que o sistema de excitação poderá compensar de alguma forma para corrigi-lo.

#### 4.6. Máquina com curto na bobina #3

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #3. Conforme a figura 5-56, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

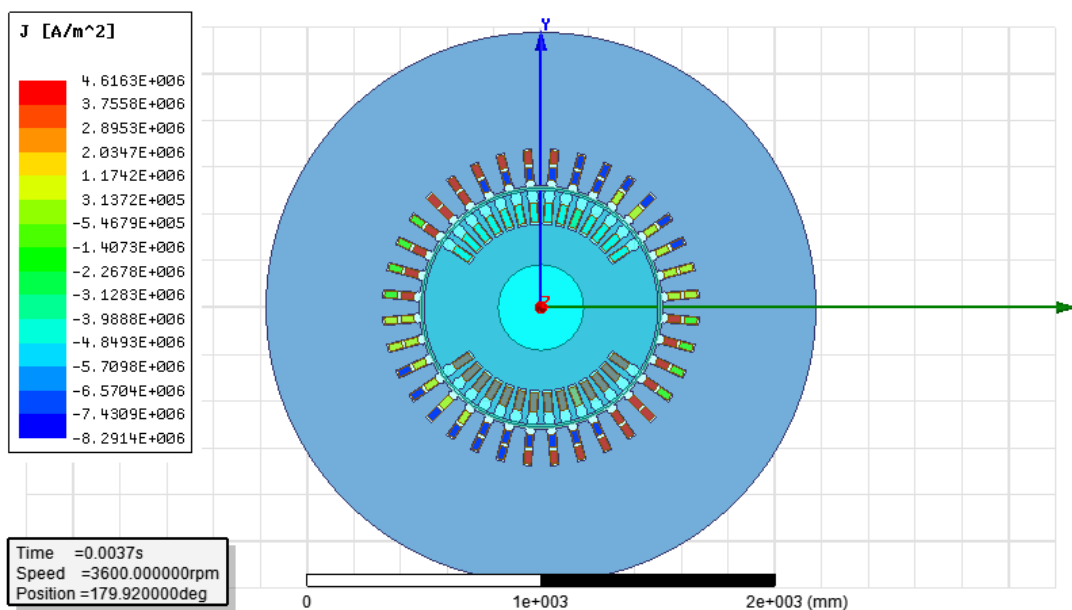


Figura 4-56 - posição da bobina #3, na qual o curto foi aplicado

➤ **TESTE EM CARGA:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

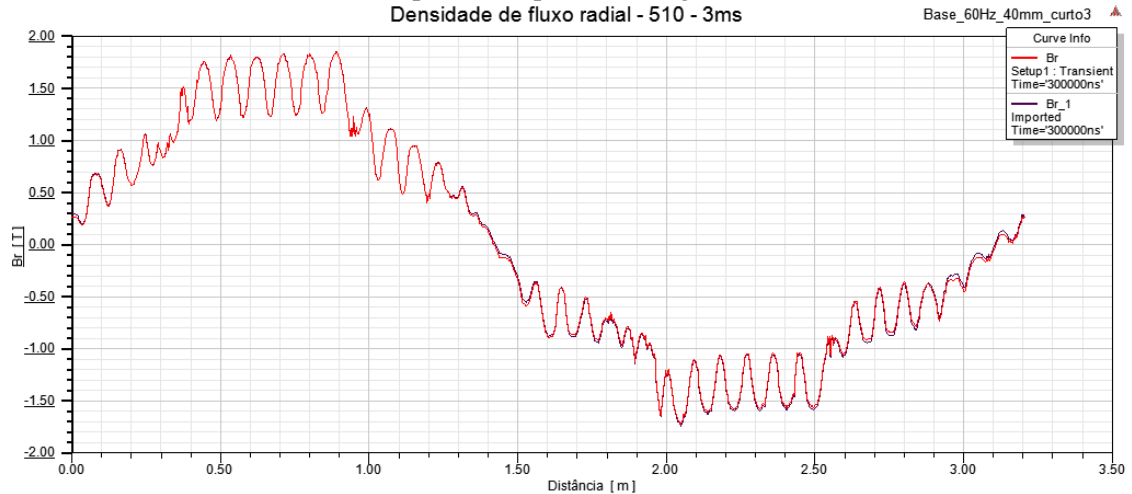


Figura 4-57 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

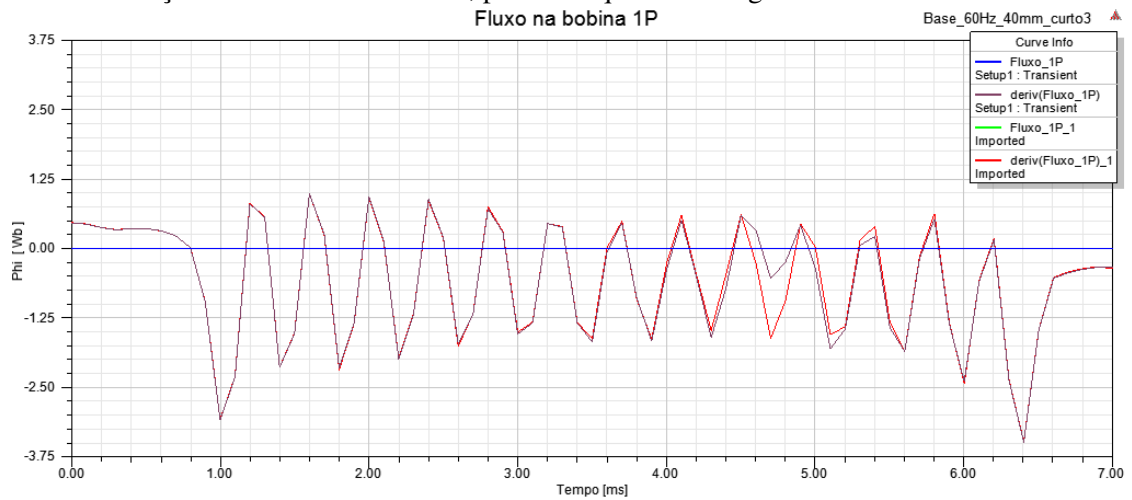


Figura 4-58-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

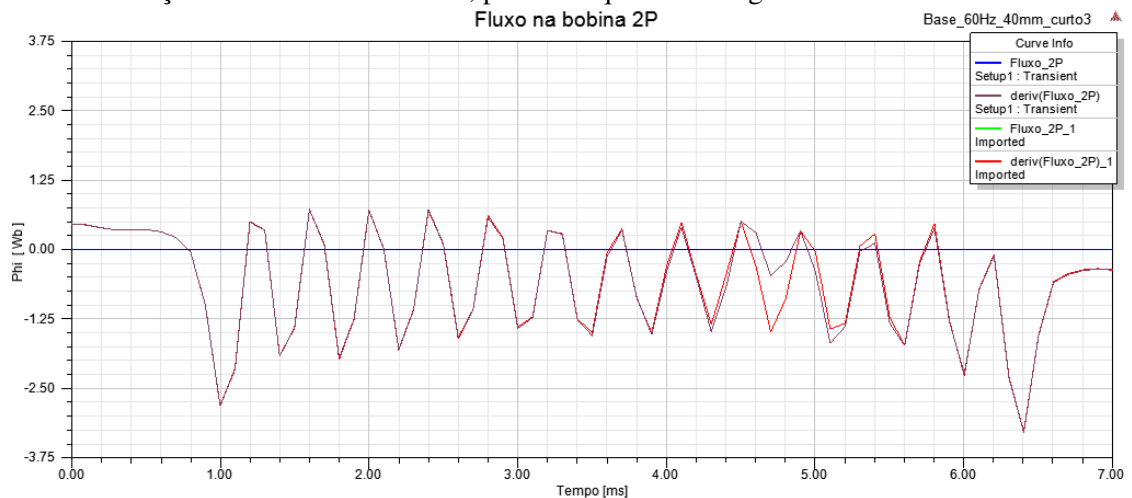


Figura 4-59-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

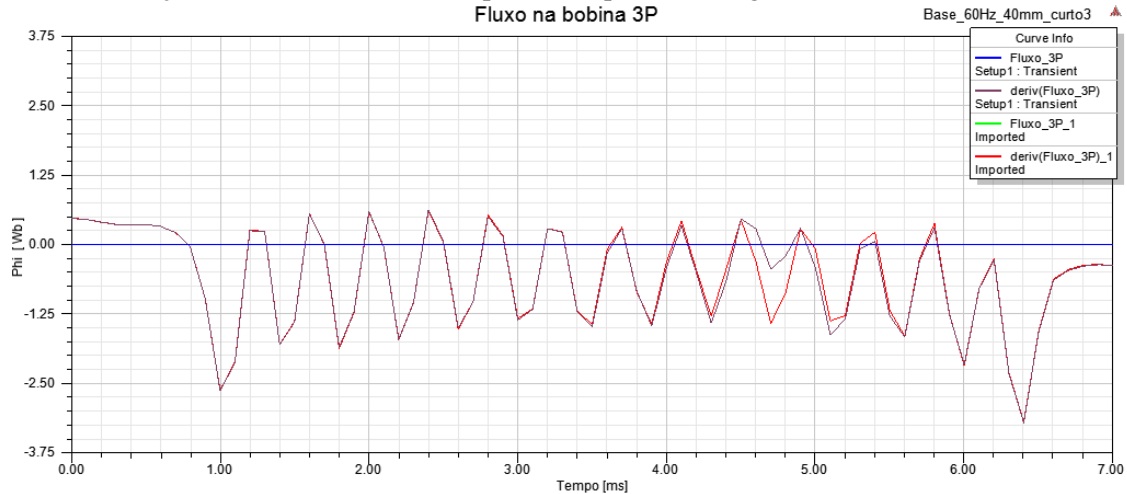


Figura 4-60-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

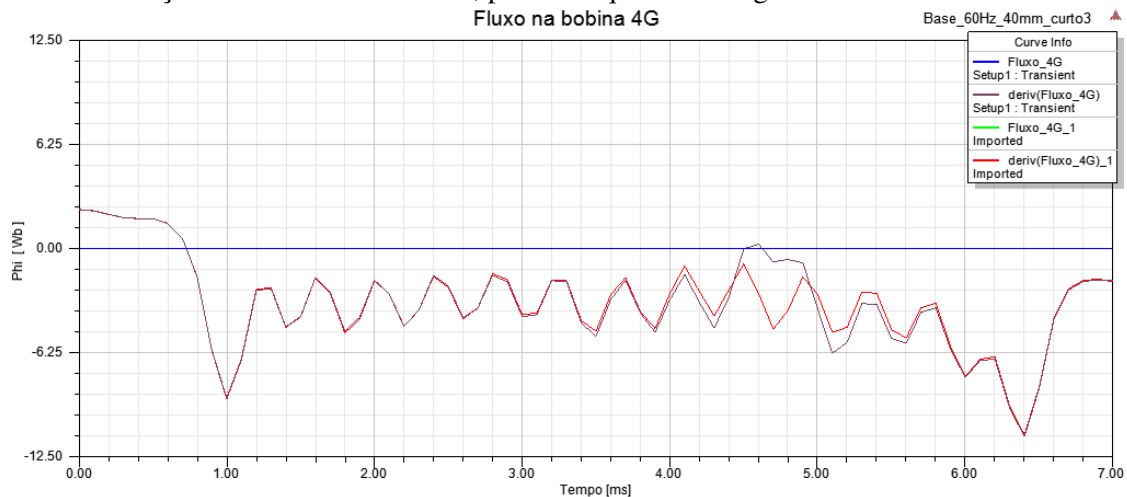


Figura 4-61-variação do fluxo na bobina 4G para a máquina em carga com curto na bobina #3

### ➤ TESTE DE CURTO CIRCUITO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

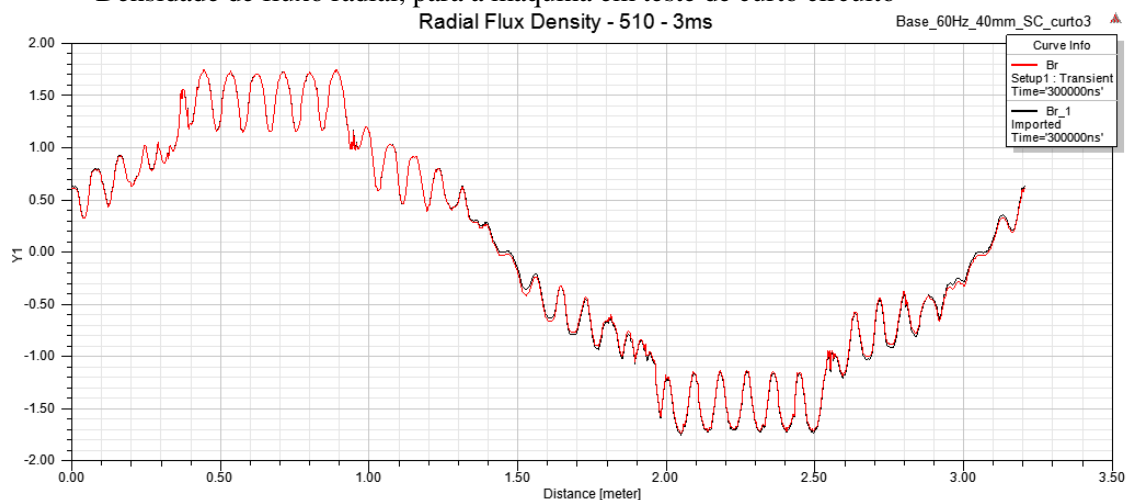


Figura 4-62 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

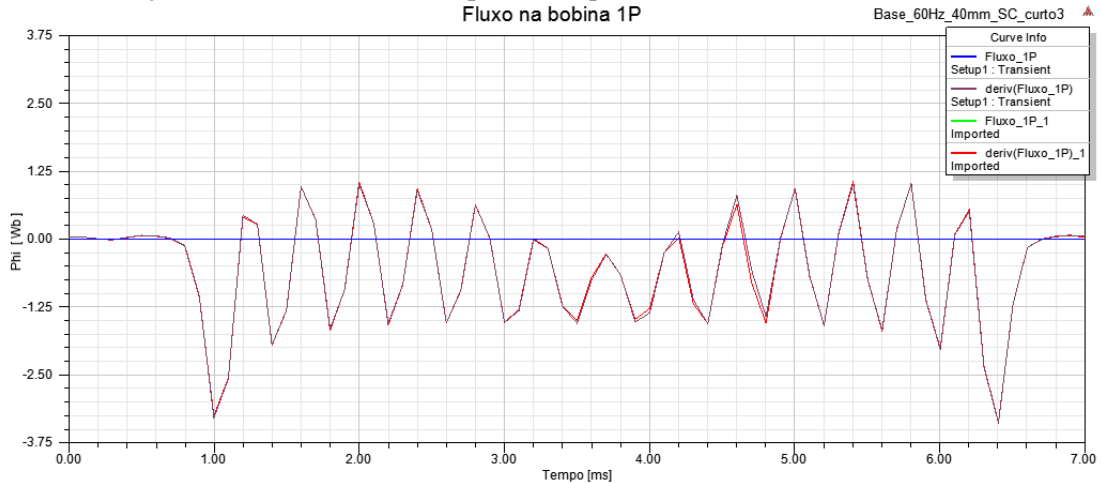


Figura 4-63 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

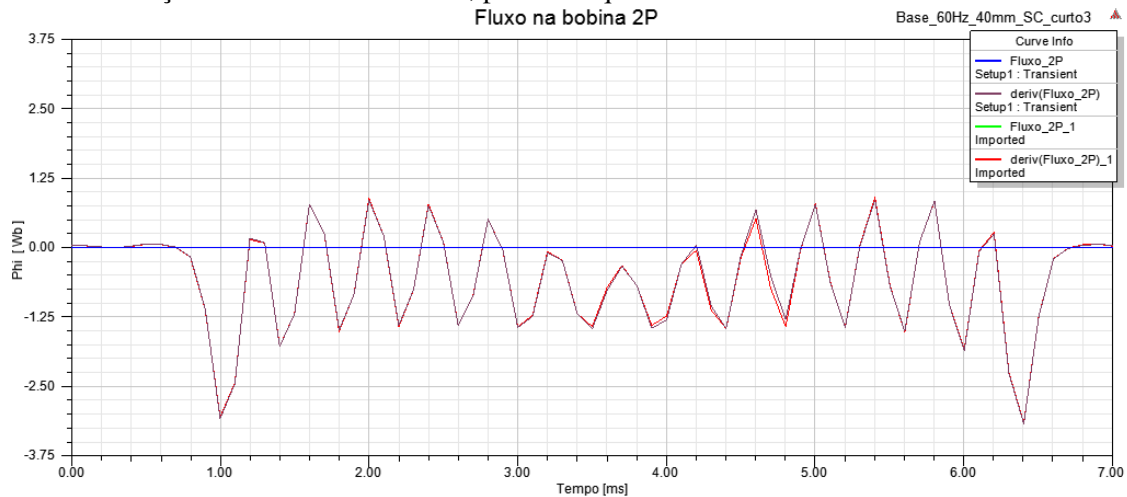


Figura 4-64-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

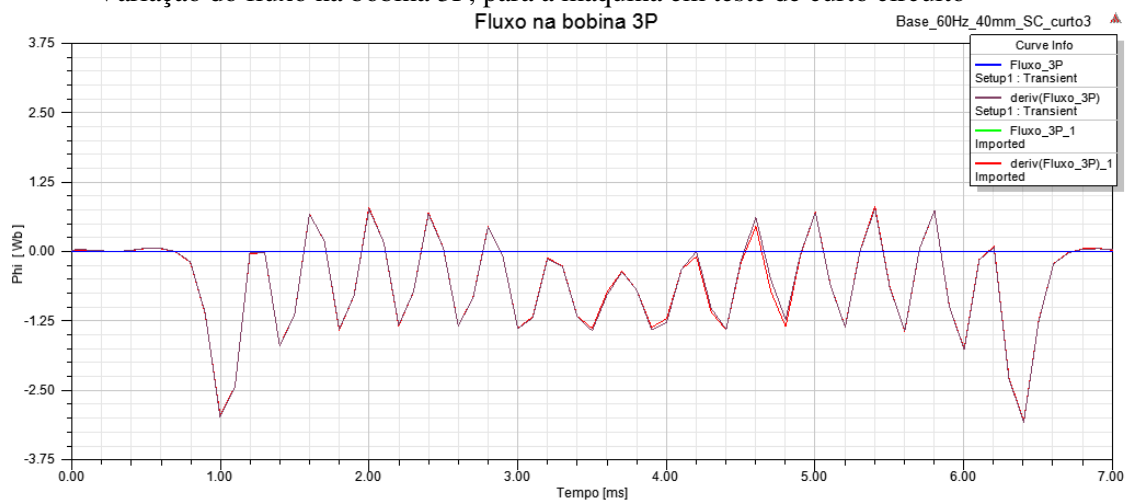


Figura 4-65-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3



- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

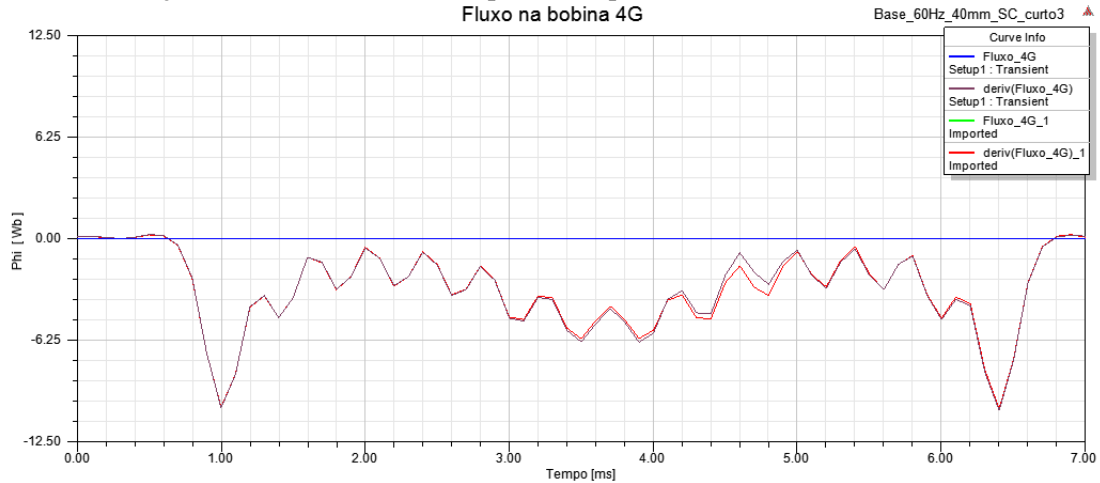


Figura 4-66-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #3

### ➤ TESTE DE CIRCUITO ABERTO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

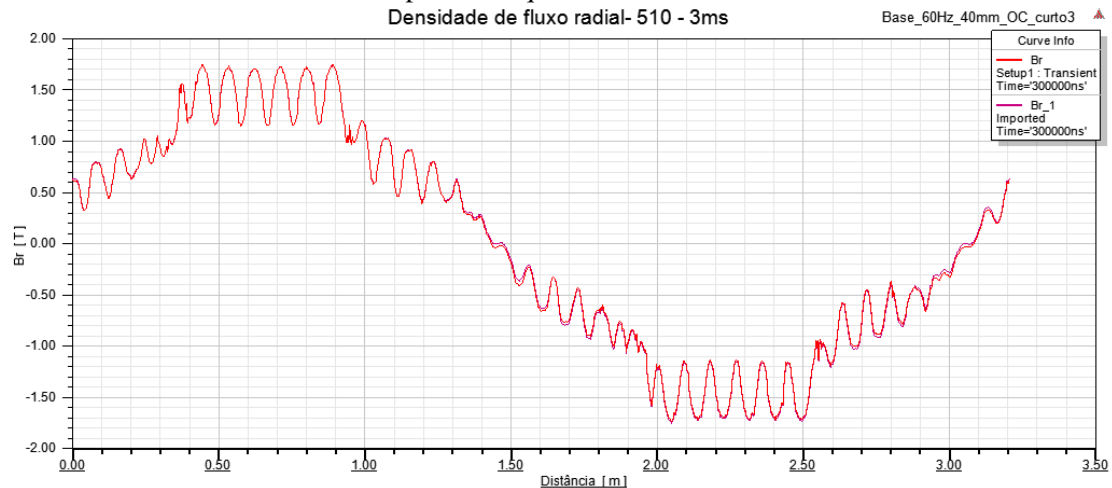


Figura 4-67 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

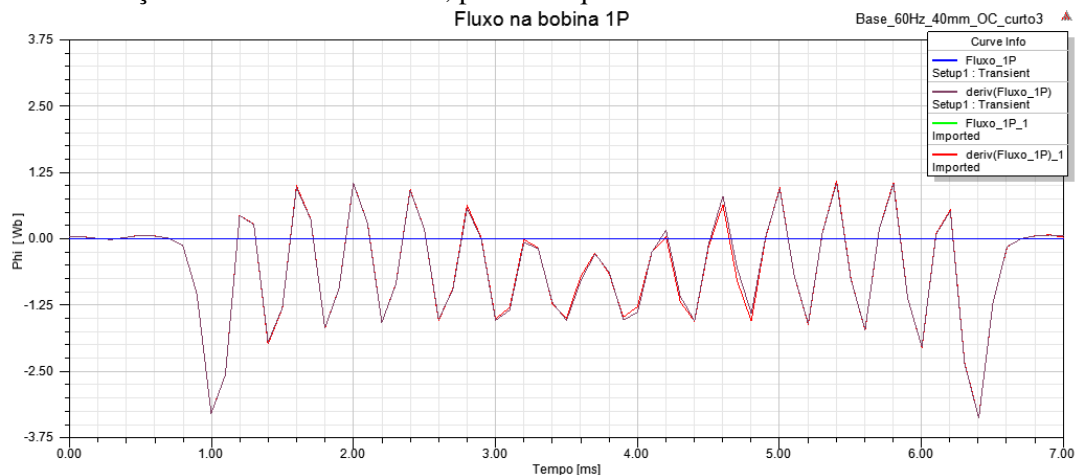


Figura 4-68-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

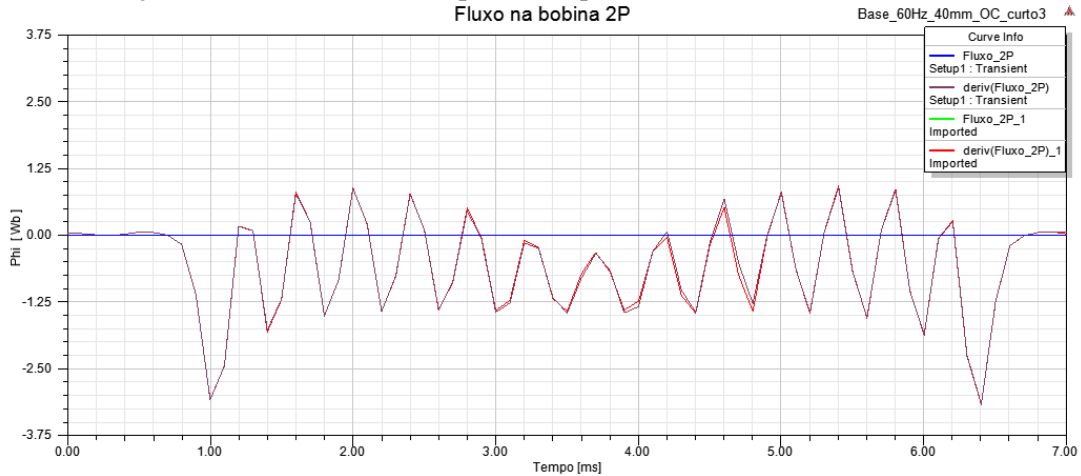


Figura 4-69-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

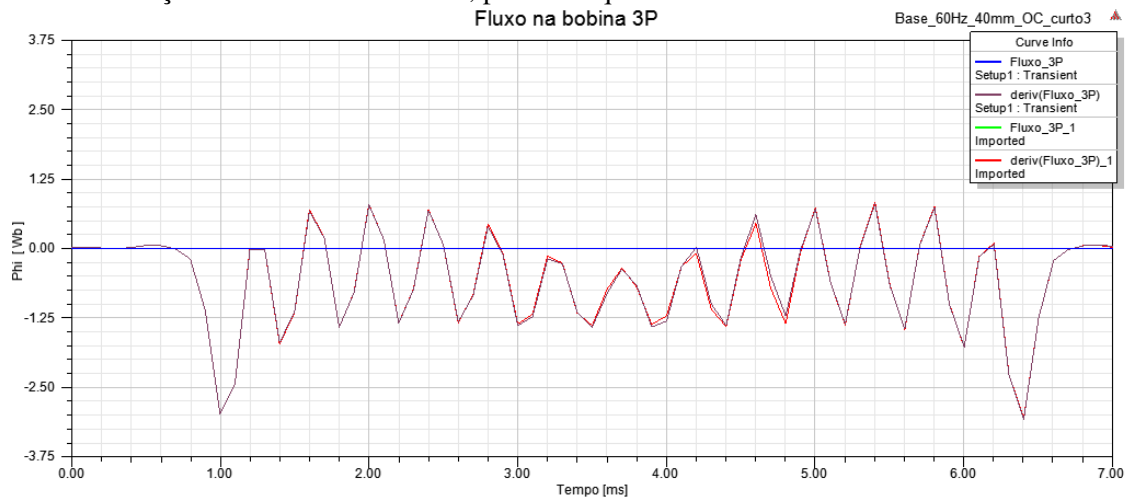


Figura 4-70-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

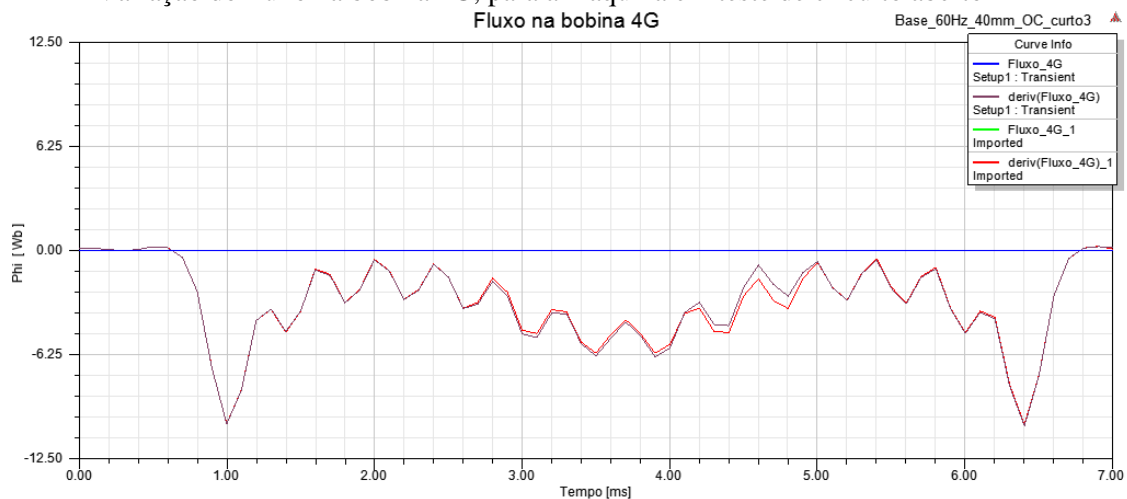
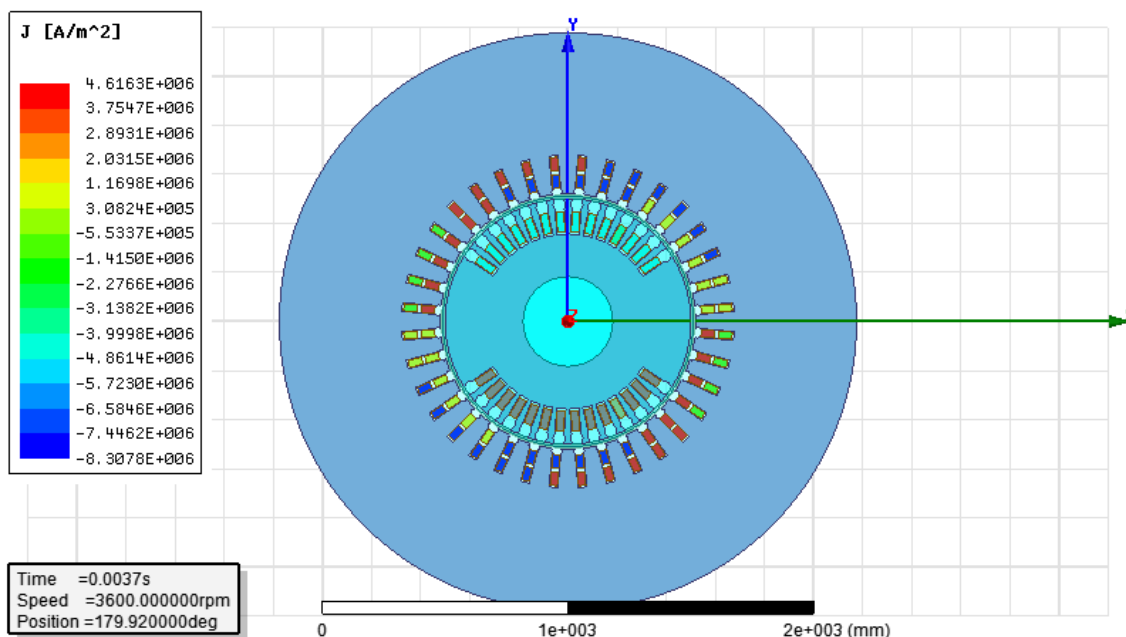


Figura 4-71-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #3

Nos resultados apresentados nessa seção percebe-se uma queda de sensibilidade nos cenários de teste de curto circuito e circuito aberto.

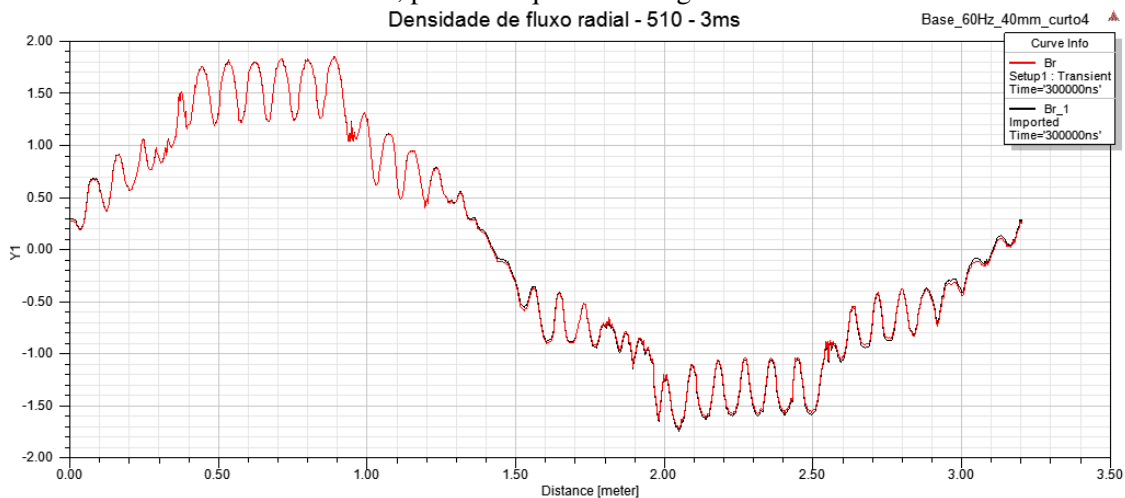
#### 4.7. Máquina com curto na bobina #4

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #4. Conforme a figura 5-72, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.



#### ➤ TESTE EM CARGA:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga



- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

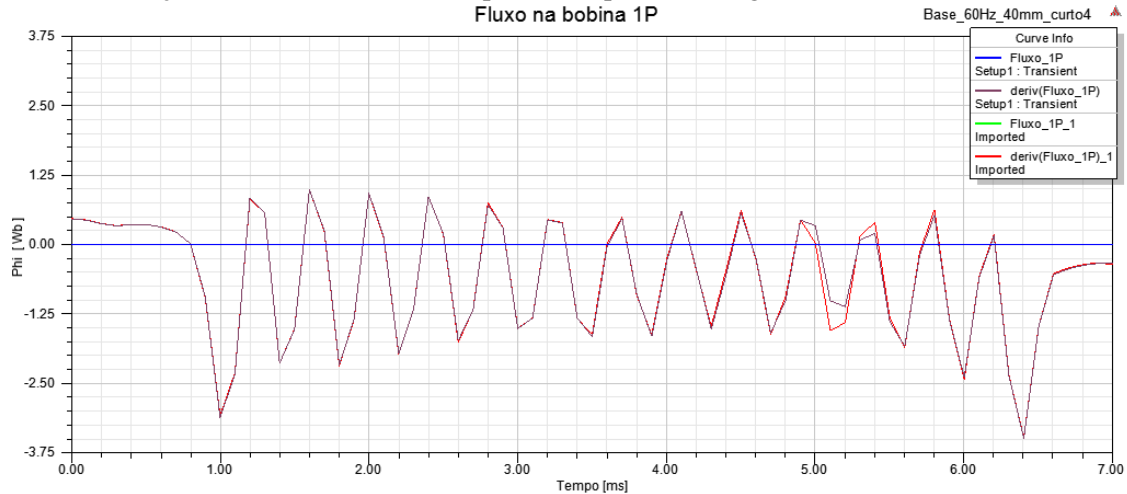


Figura 4-74-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

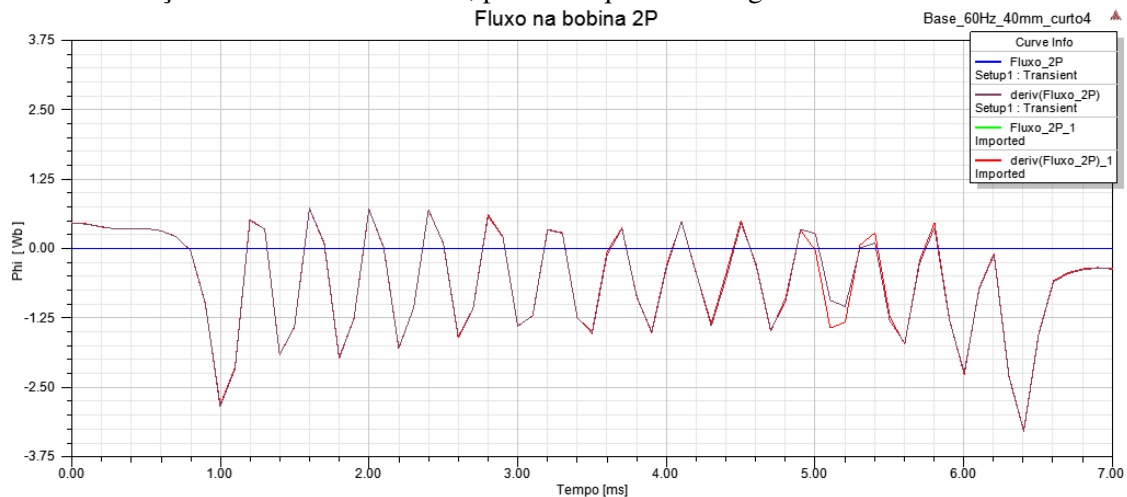


Figura 4-75-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

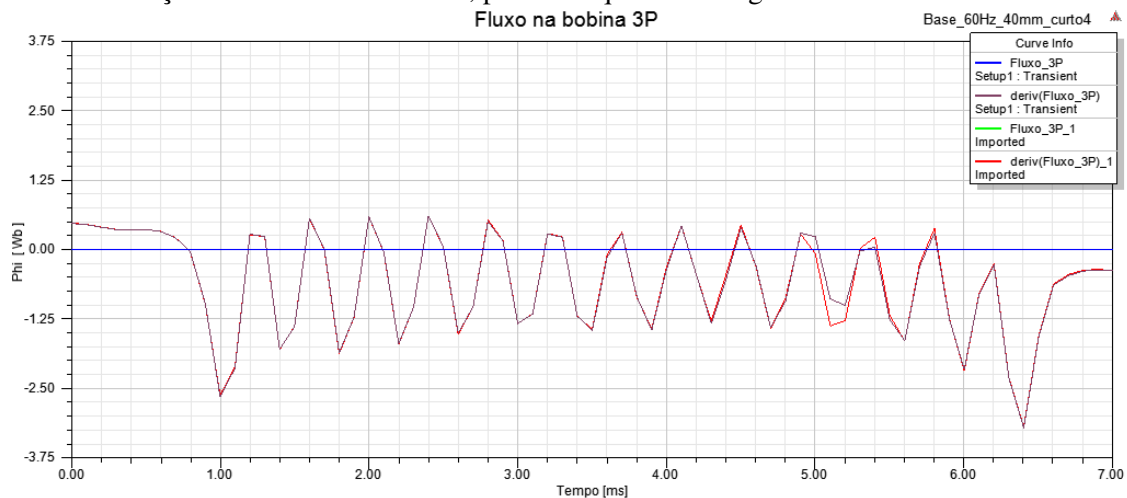


Figura 4-76-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

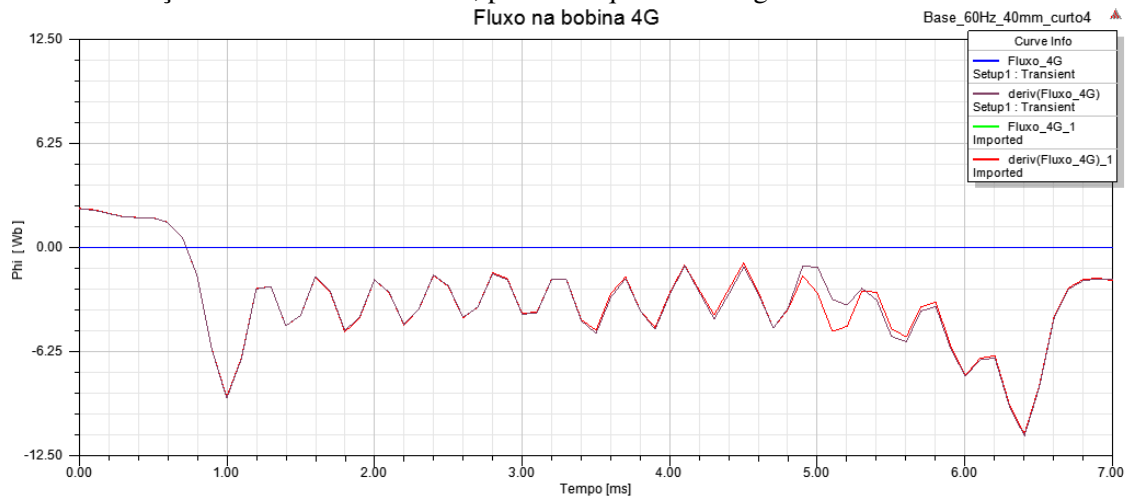


Figura 4-77-variação do fluxo na bobina 4G,para a máquina em carga com curto na bobina #4

### ➤ TESTE DE CURTO CIRCUITO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

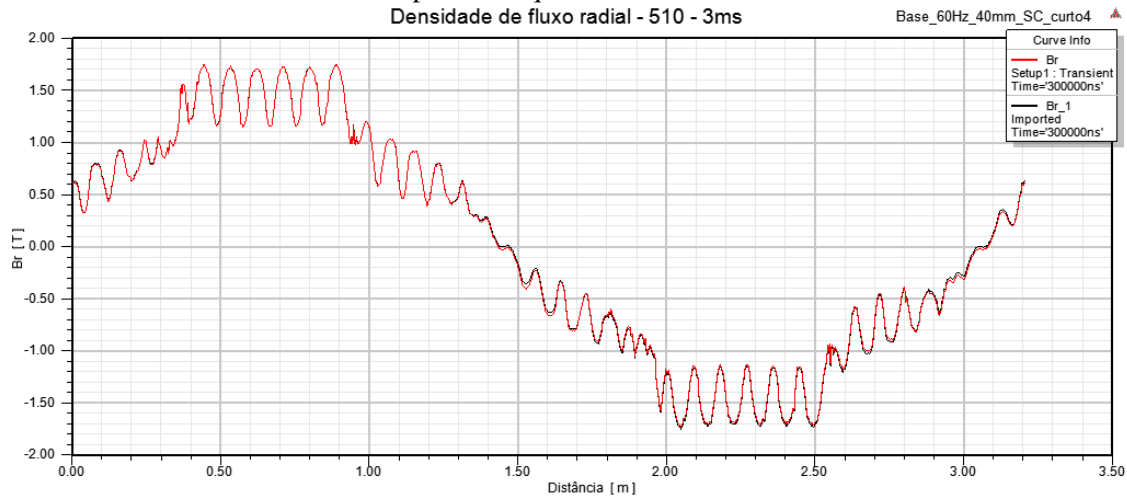


Figura 4-78 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

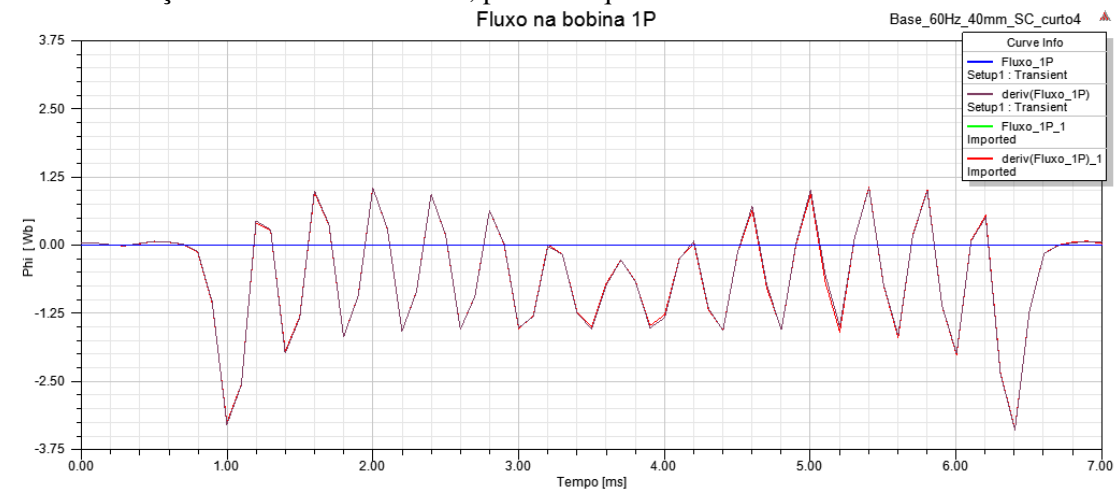


Figura 4-79 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

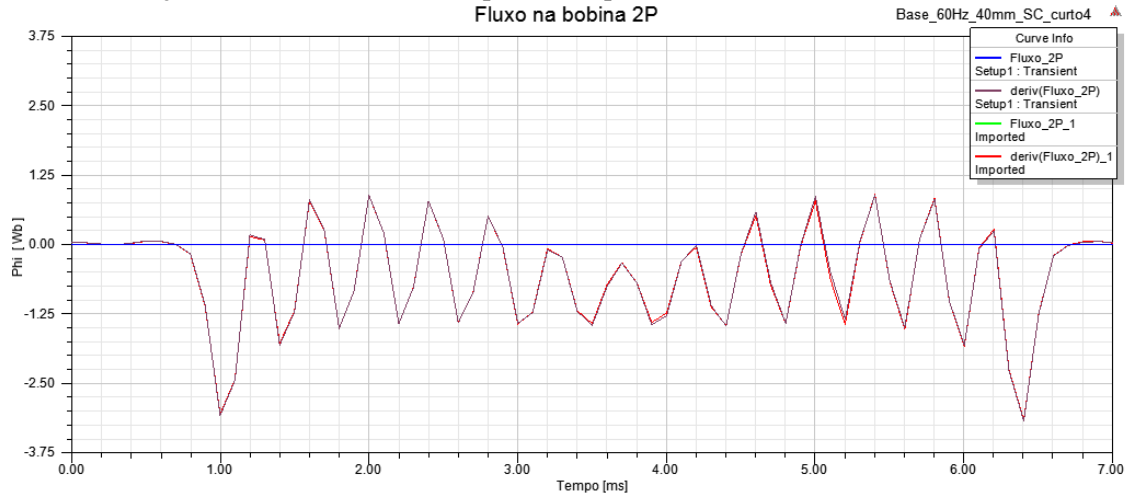


Figura 4-80-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

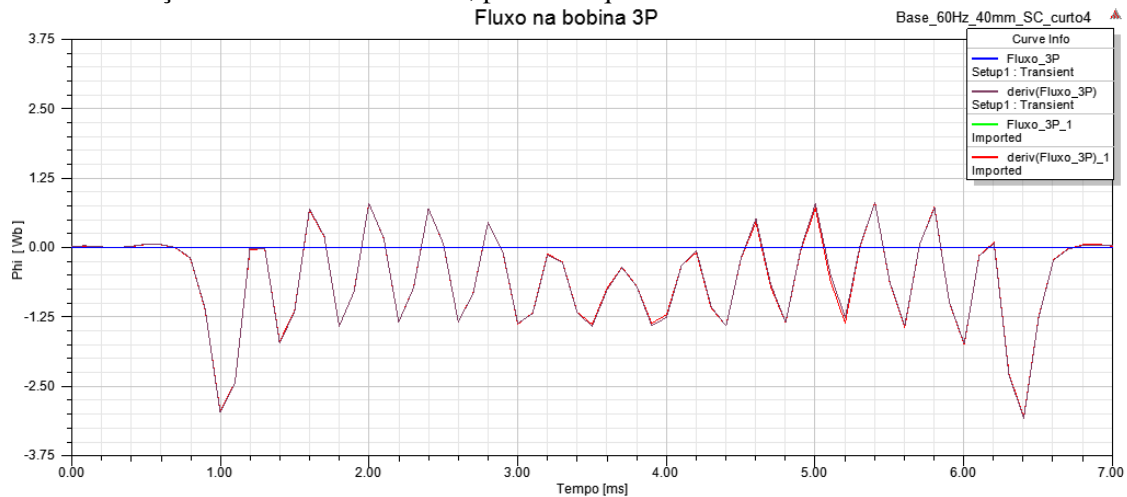


Figura 4-81-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

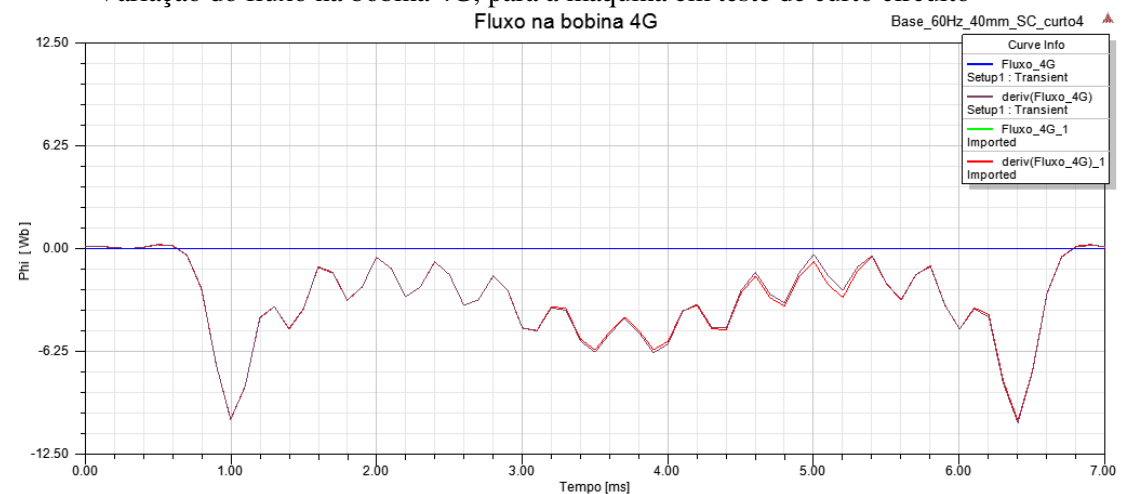


Figura 4-82-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #4

➤ **TESTE DE CIRCUITO ABERTO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

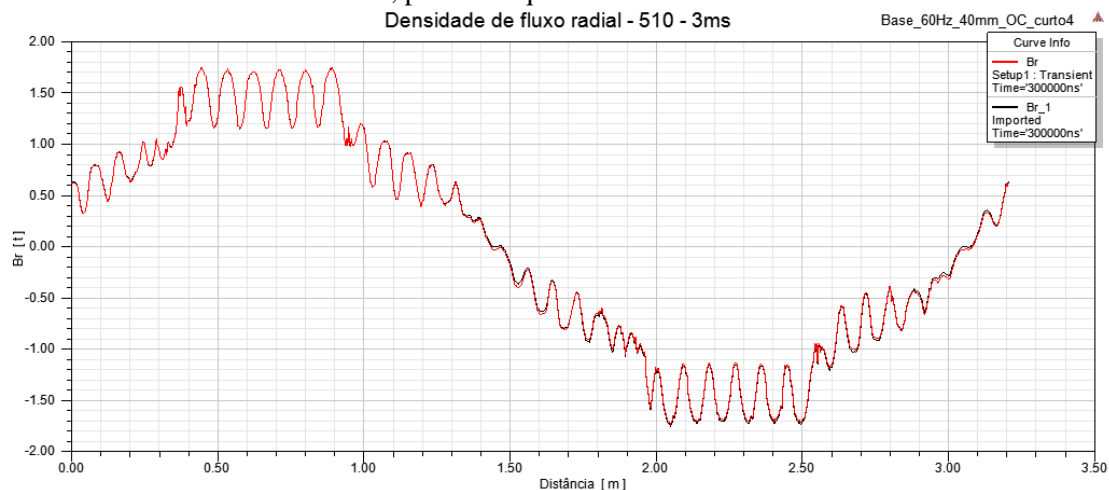


Figura 4-83 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

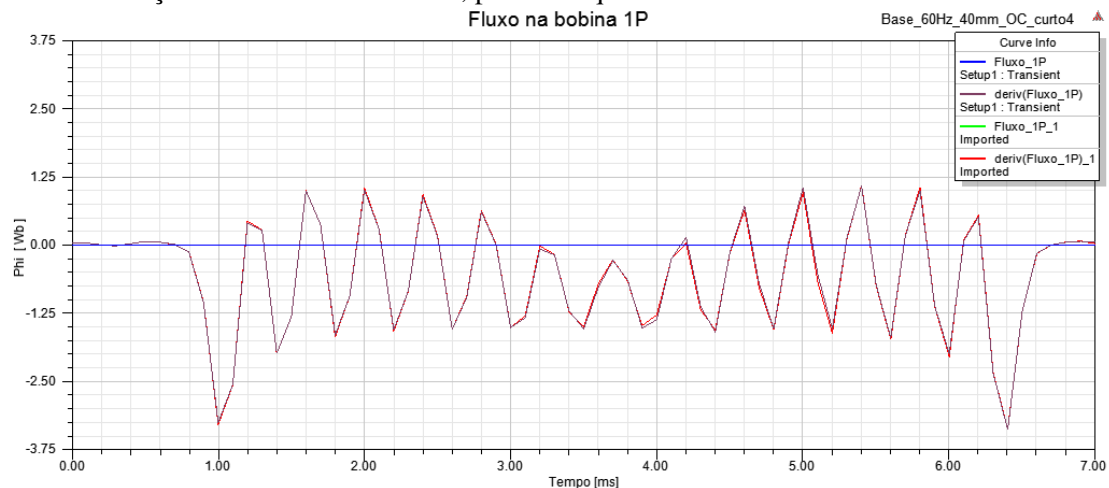


Figura 4-84- variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

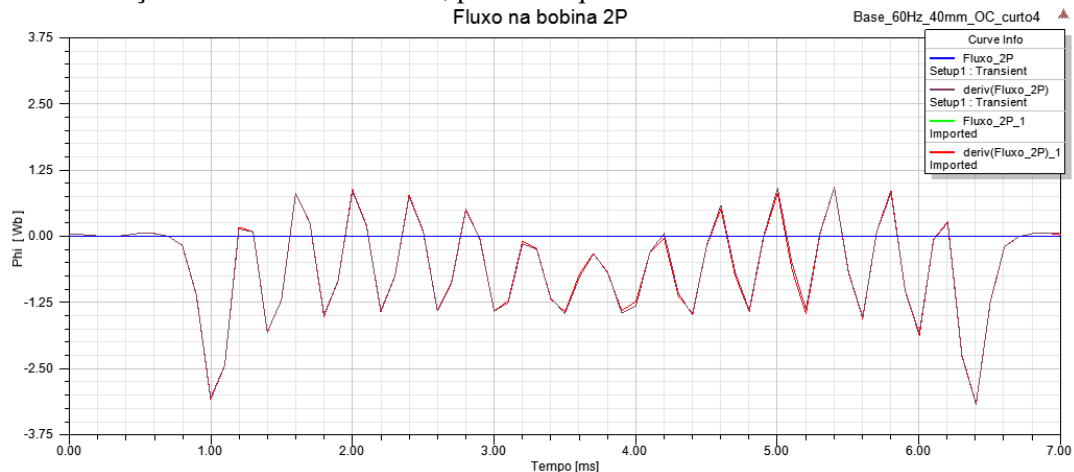


Figura 4-85- variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

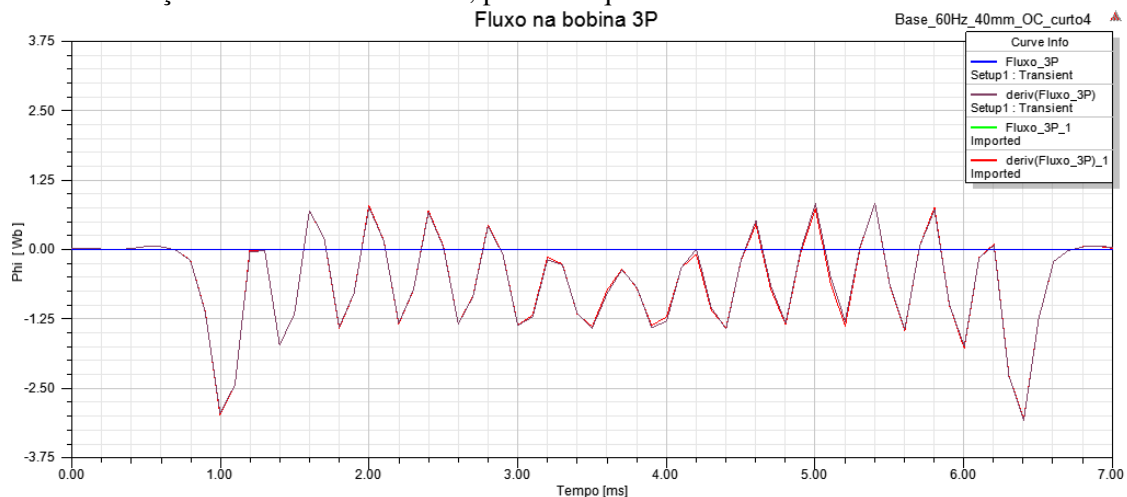


Figura 4-86-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

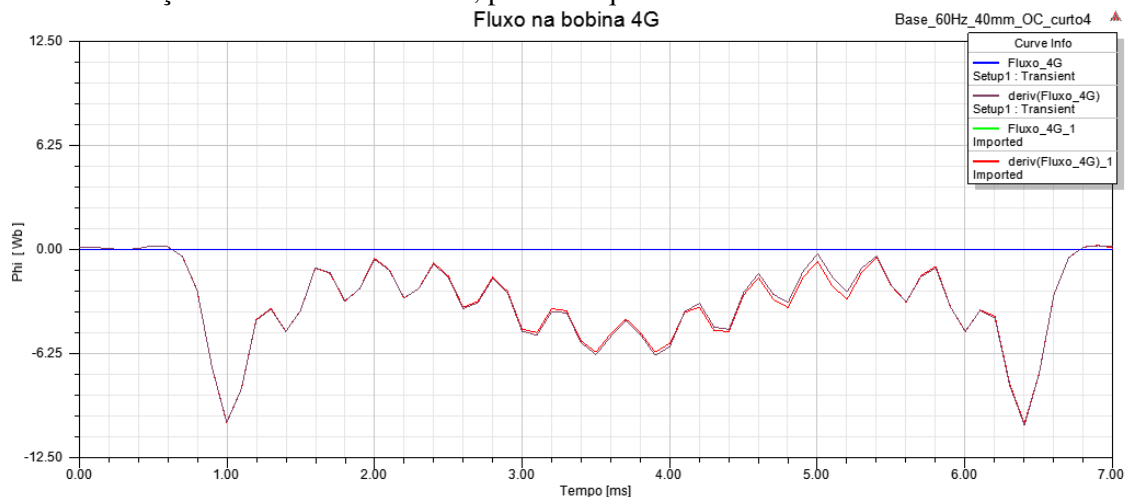


Figura 4-87-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #4

Nos resultados apresentados nessa seção percebe-se uma queda de sensibilidade no cenário de teste em carga e uma acentuação dessa perda de sensibilidade nos cenários de teste de curto circuito e circuito aberto.

#### 4.8. Máquina com curto na bobina #5

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #5. Conforme a figura 5-88, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.



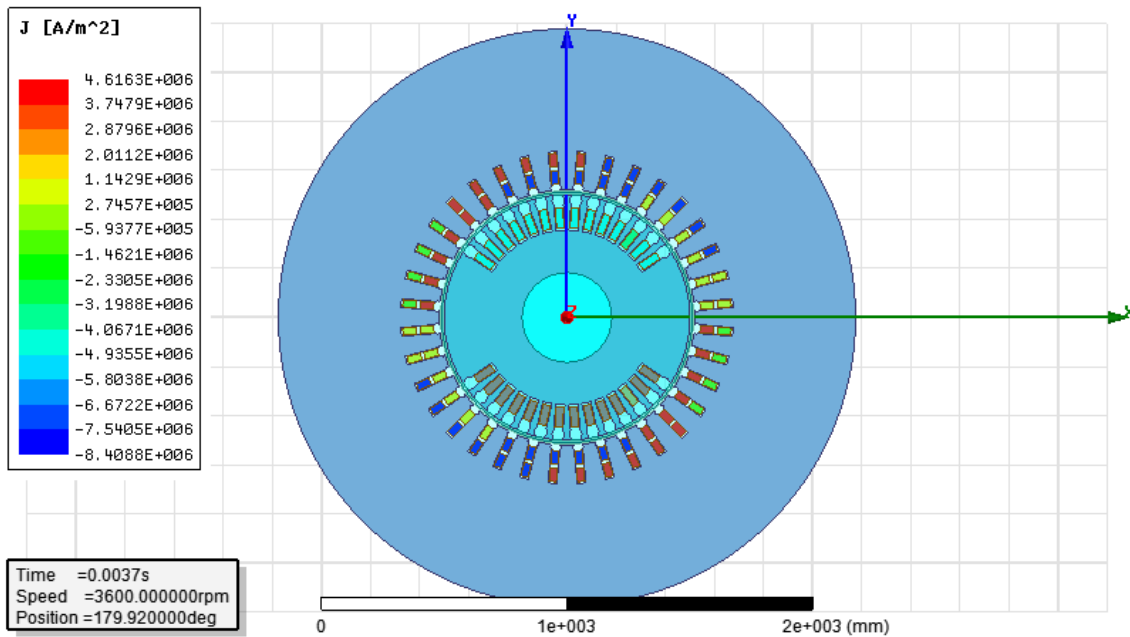


Figura 4-88 - posição da bobina #5, na qual o curto foi aplicado

### ➤ TESTE EM CARGA:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

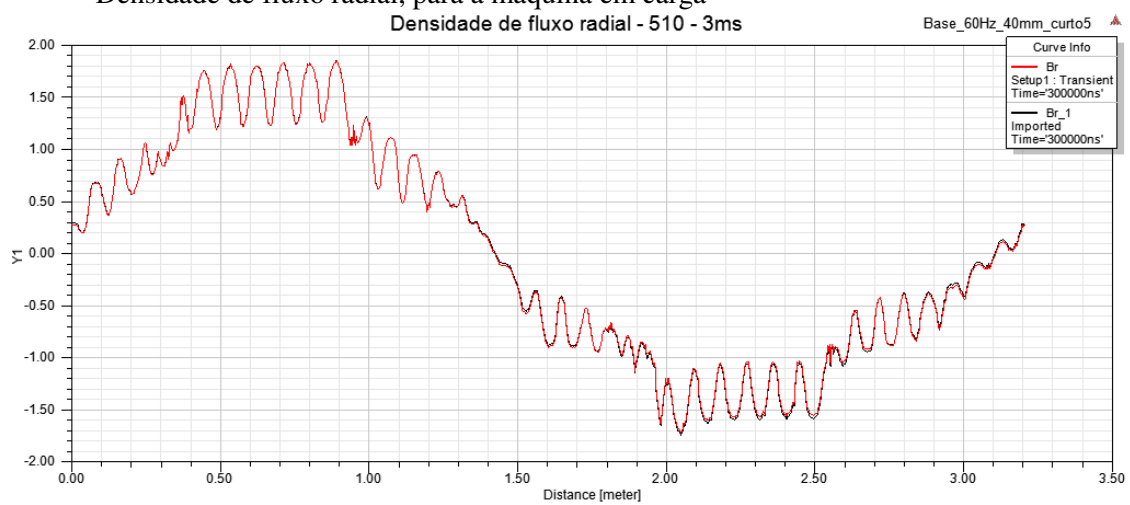


Figura 4-89 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

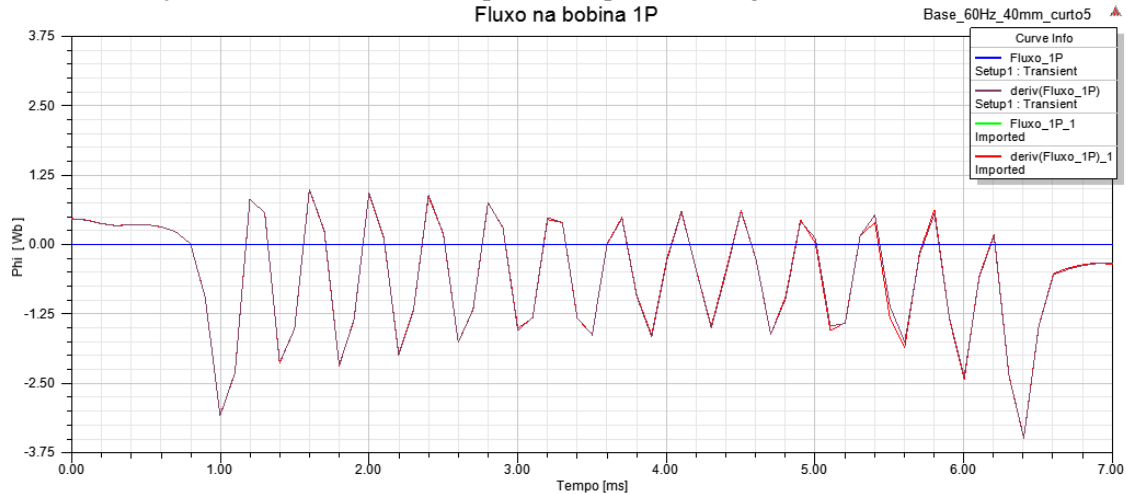


Figura 4-90-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

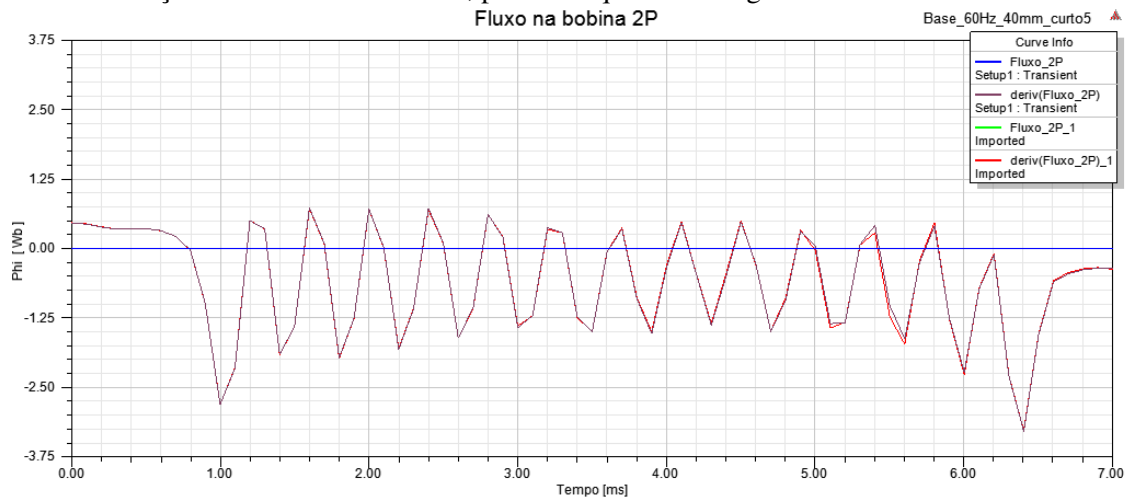


Figura 4-91-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

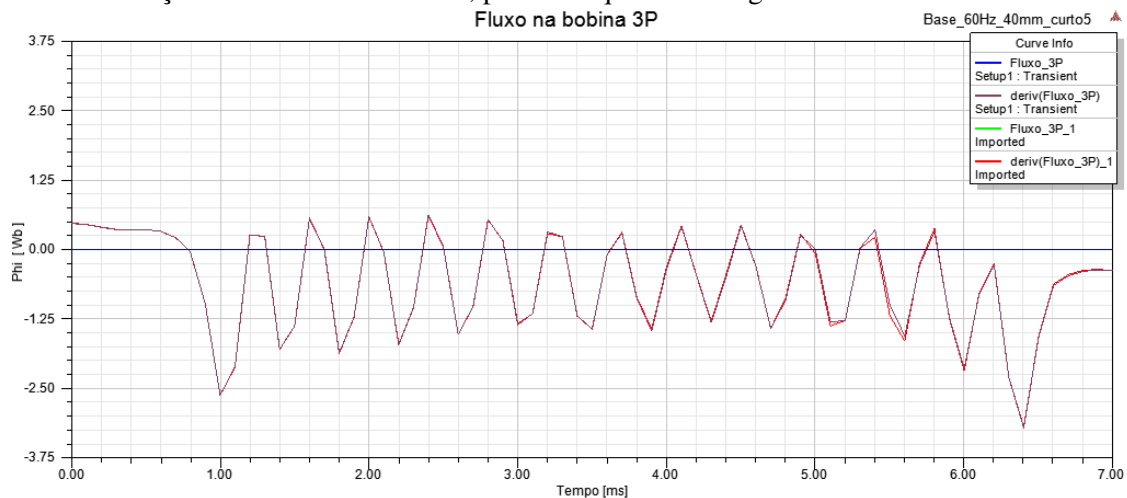


Figura 4-92-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

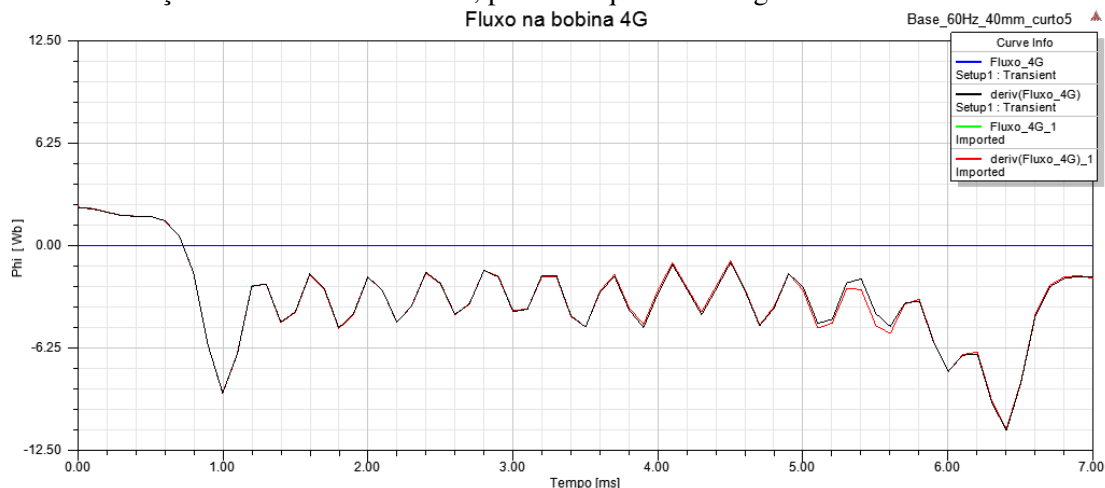


Figura 4-93-variação do fluxo na bobina 4G,para a máquina em carga com curto na bobina #5

### ➤ TESTE DE CURTO CIRCUITO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

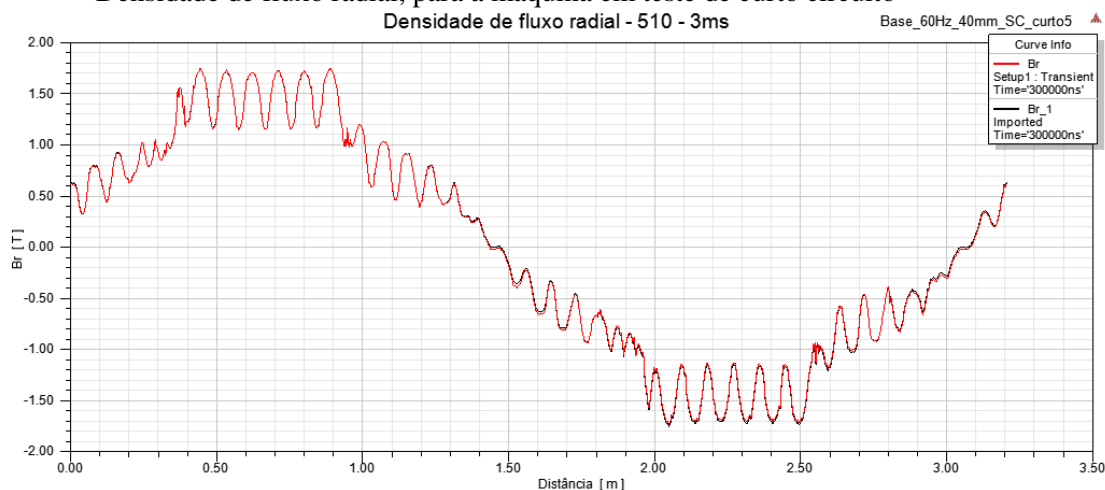


Figura 4-94 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

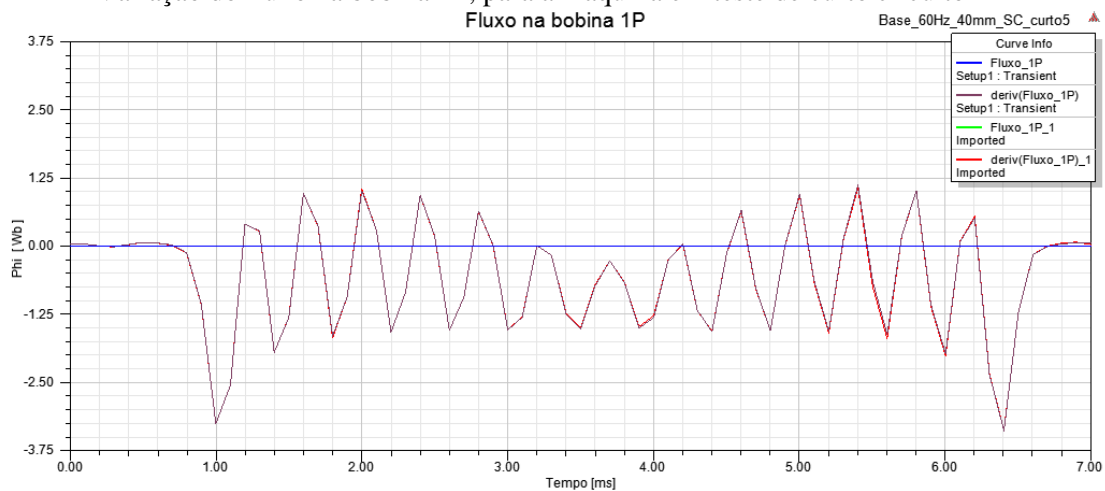
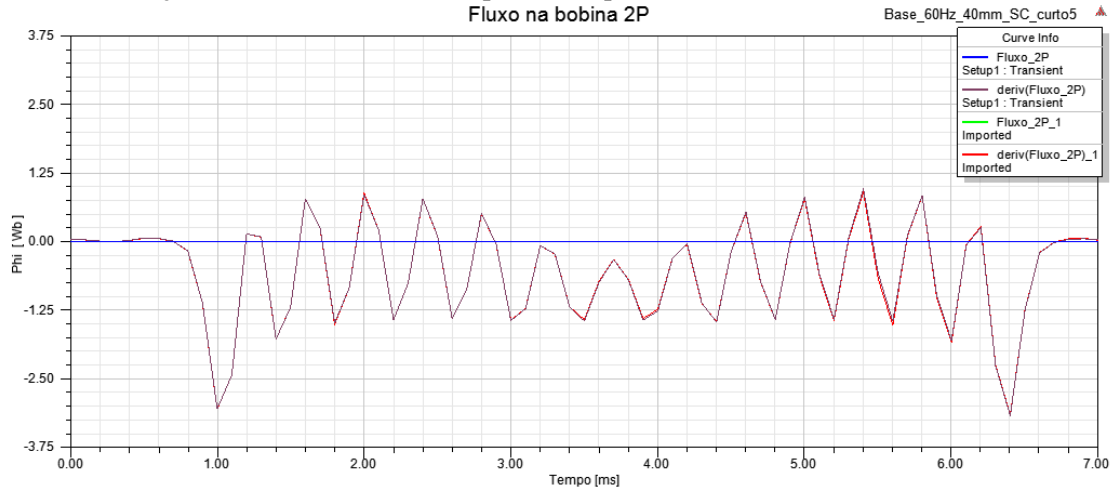


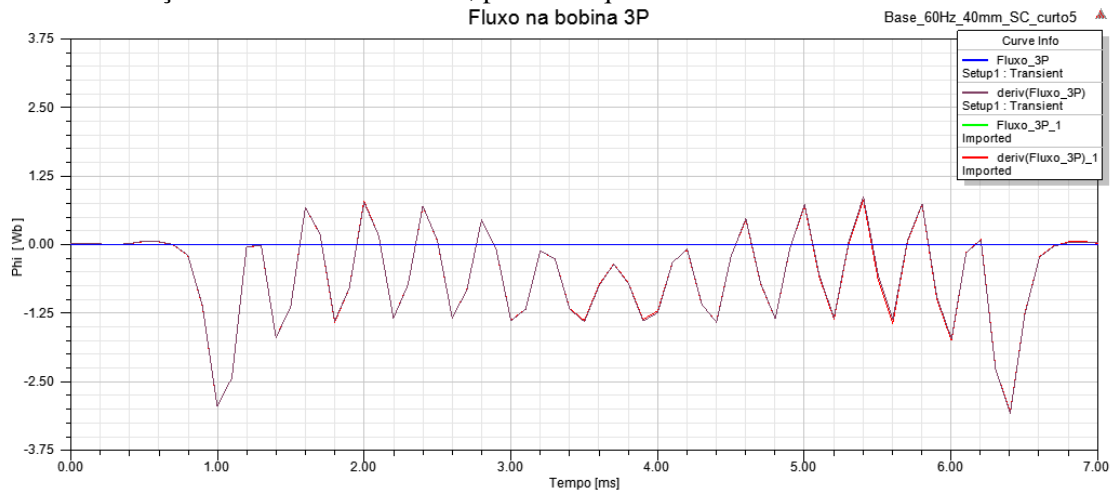
Figura 4-95 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito



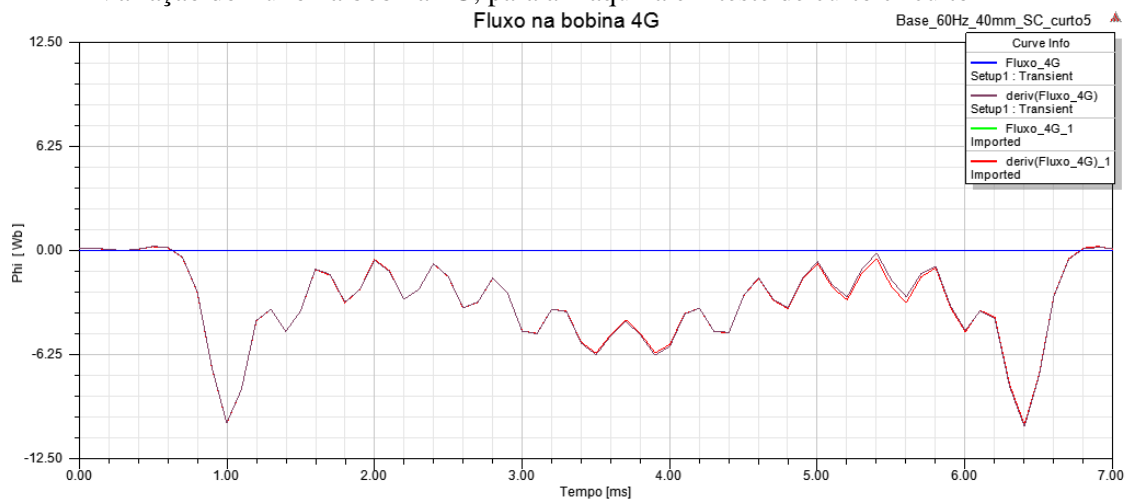
*Figura 4-96-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5*

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito



*Figura 4-97-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5*

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito



*Figura 4-98-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #5*

### ➤ TESTE DE CIRCUITO ABERTO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

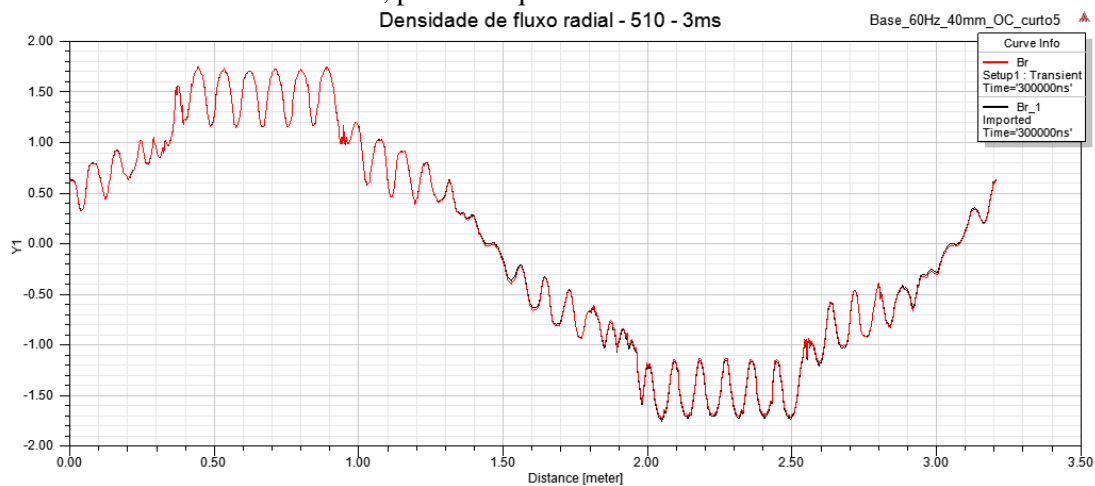


Figura 4-99 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

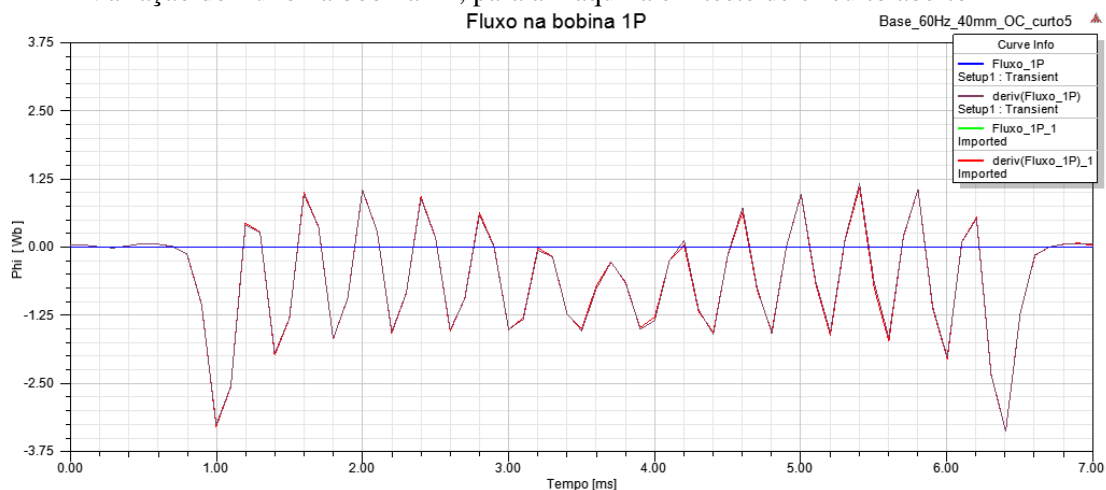


Figura 4-100-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

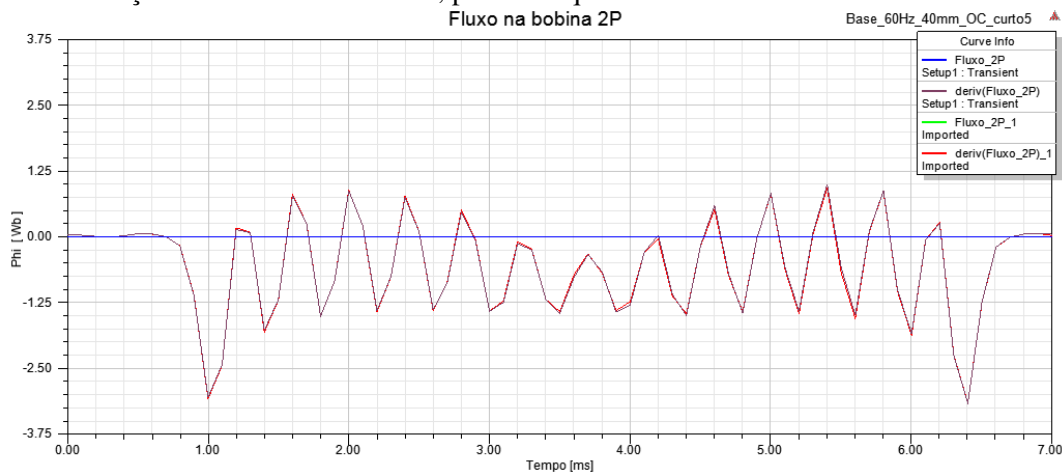


Figura 4-101-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

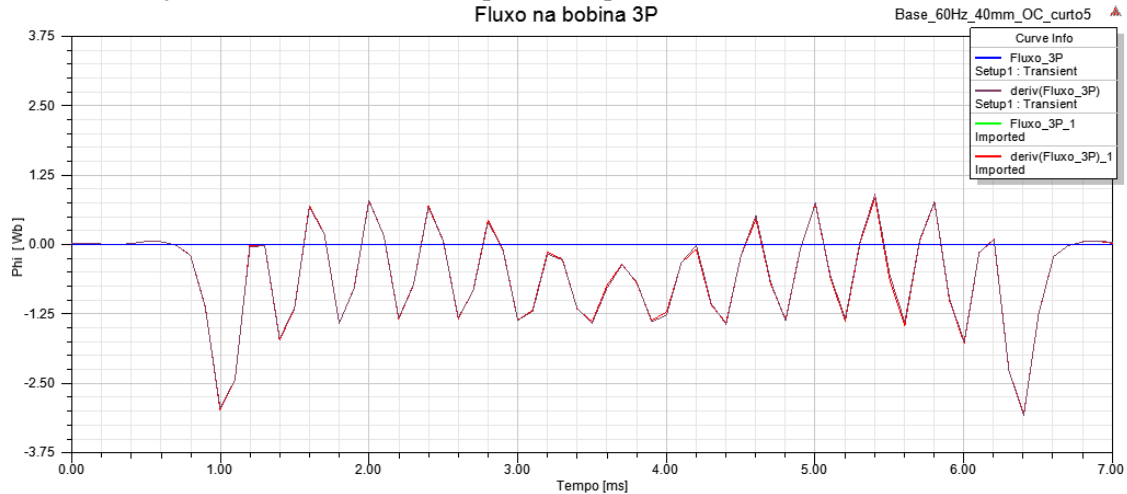


Figura 4-102-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

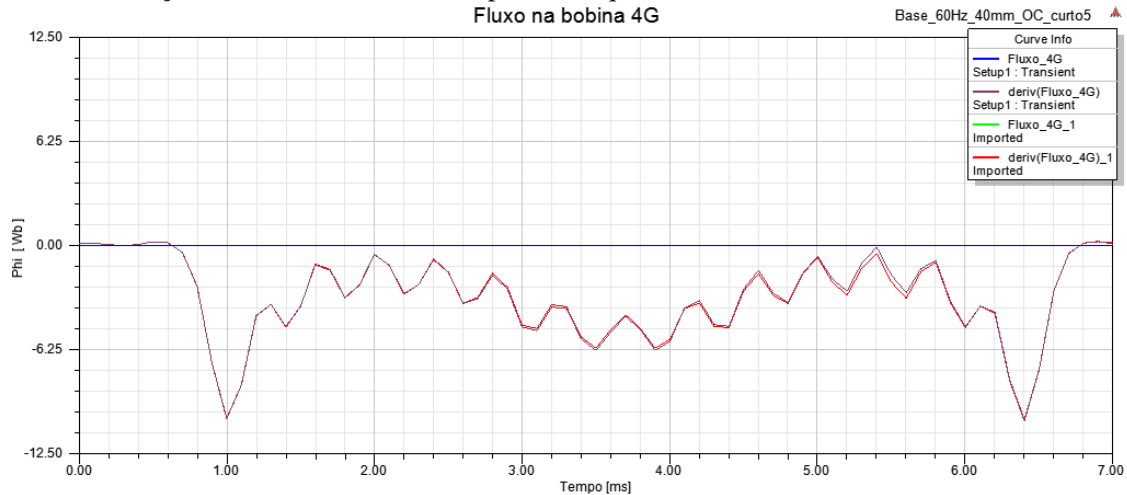


Figura 4-103-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #5

Na presente seção pode-se perceber que a queda de sensibilidade atinge todos os testes realizados, tendo alguma efetividade, mesmo que pequena, apenas no teste em carga.

#### 4.9. Máquina com curto na bobina #6

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #6. Conforme a figura 5-104, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

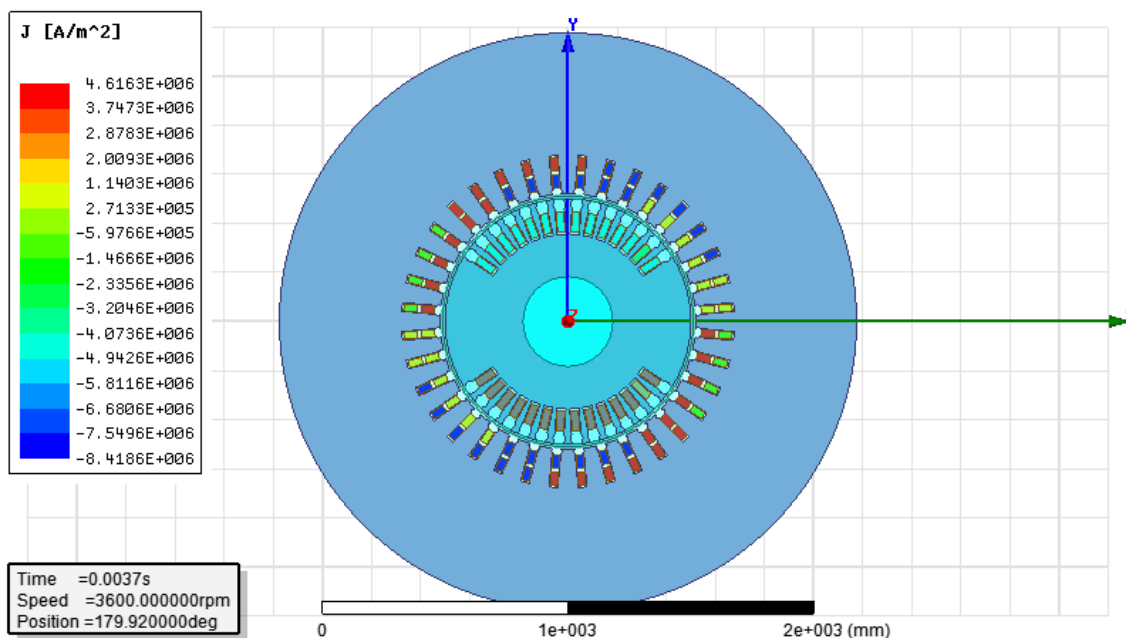


Figura 4-104 - posição da bobina #6, na qual o curto foi aplicado

#### ➤ TESTE EM CARGA:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

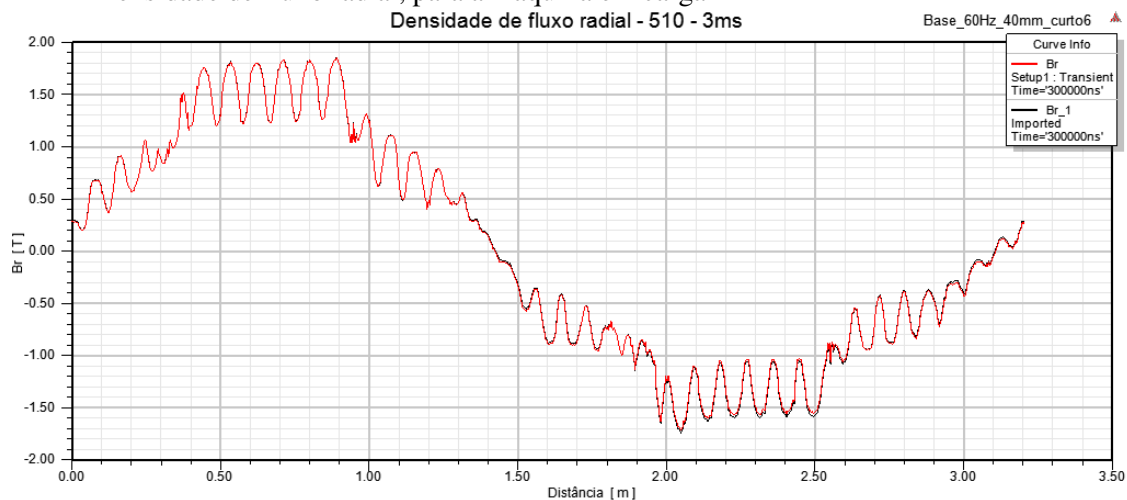


Figura 4-105 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

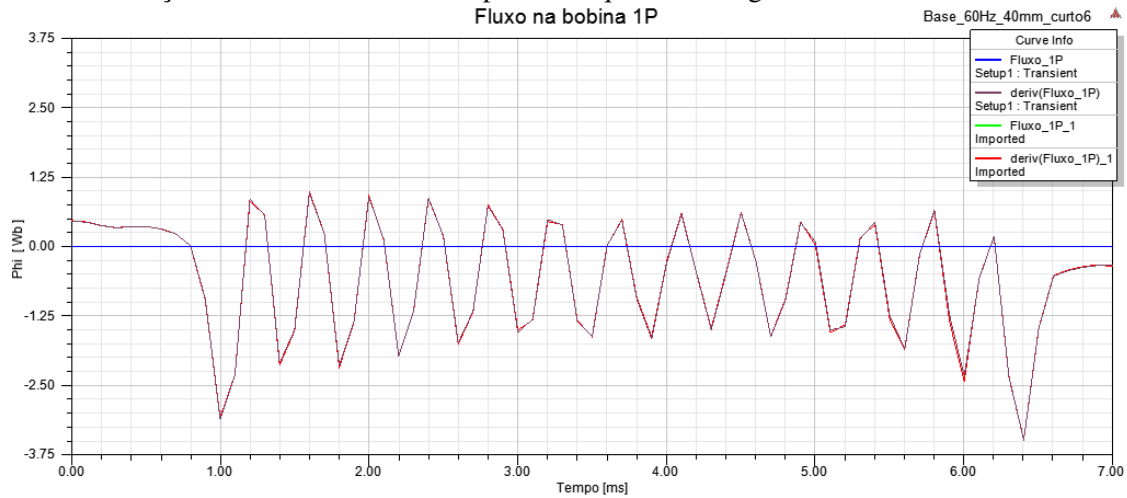


Figura 4-106-variação do fluxo na bobina 1P, para máquina em carga com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

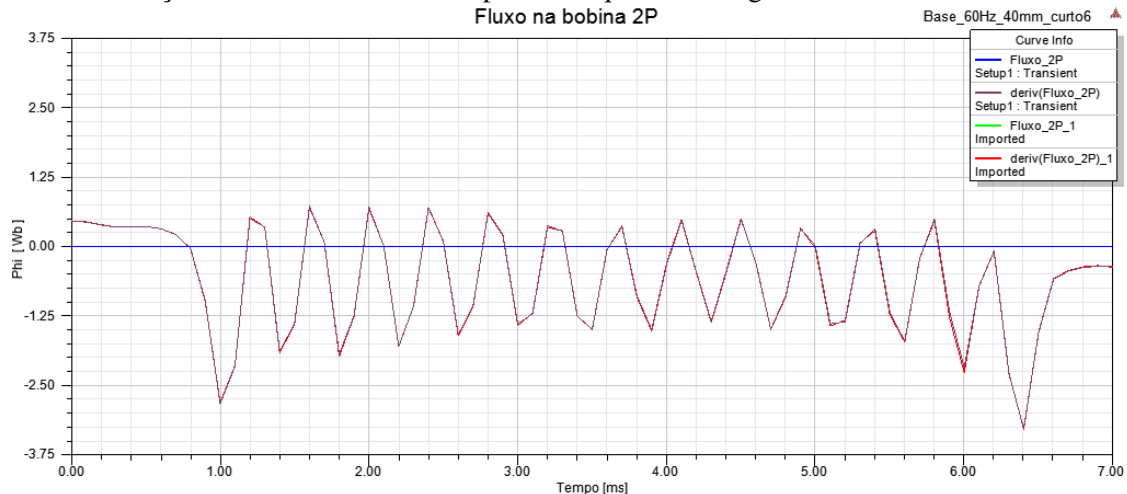


Figura 4-107-variação do fluxo na bobina 2P, para máquina em carga com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

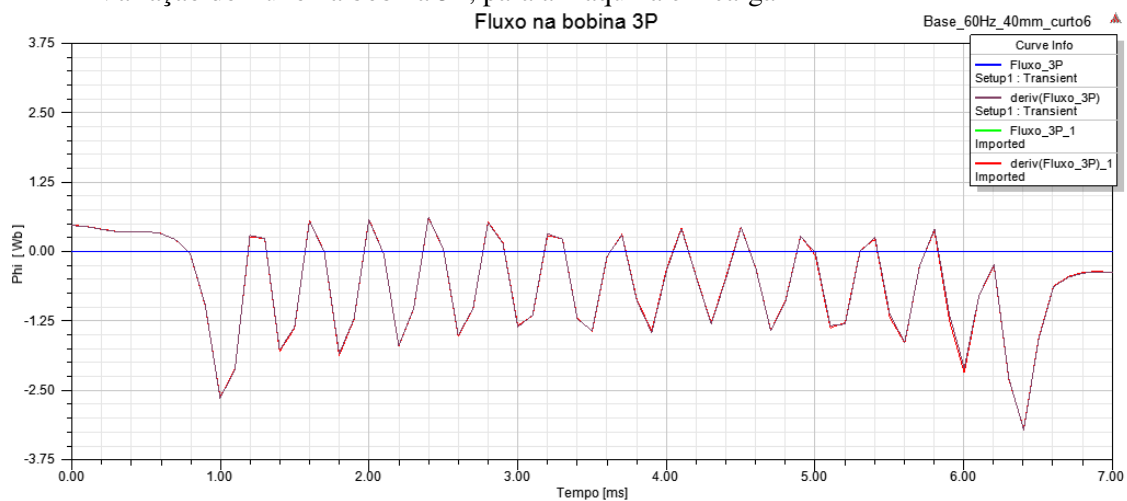


Figura 4-108-variação do fluxo na bobina 3P, para máquina em carga com curto na bobina #6



- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

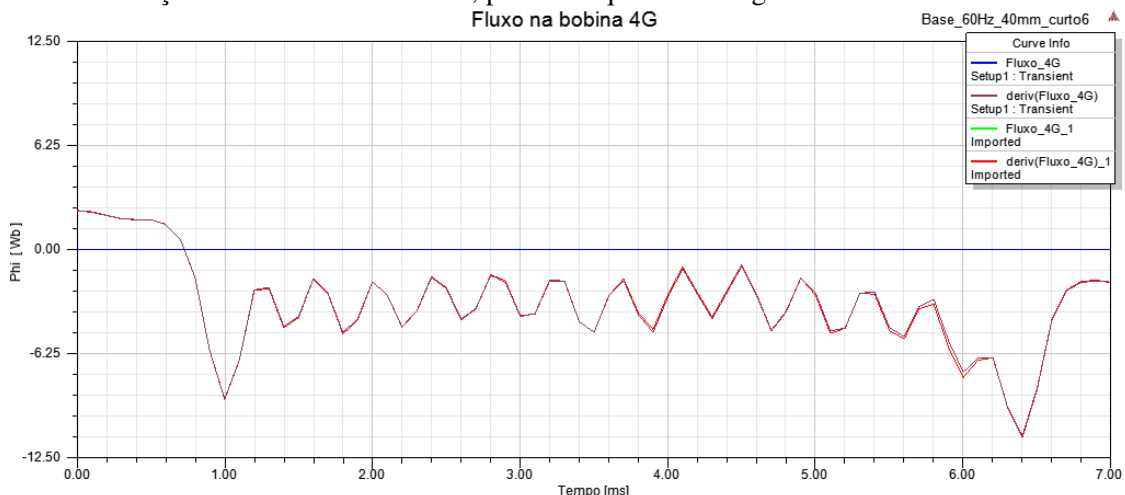


Figura 4-109-variação do fluxo na bobina 4G, para máquina em carga com curto na bobina #6

➤ **TESTE DE CURTO CIRCUITO:**

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

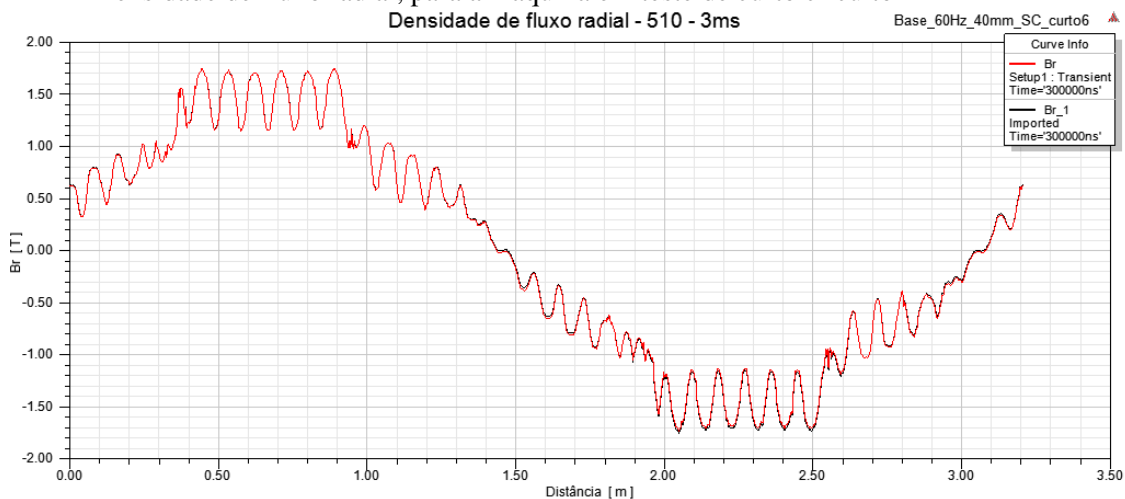


Figura 4-110 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

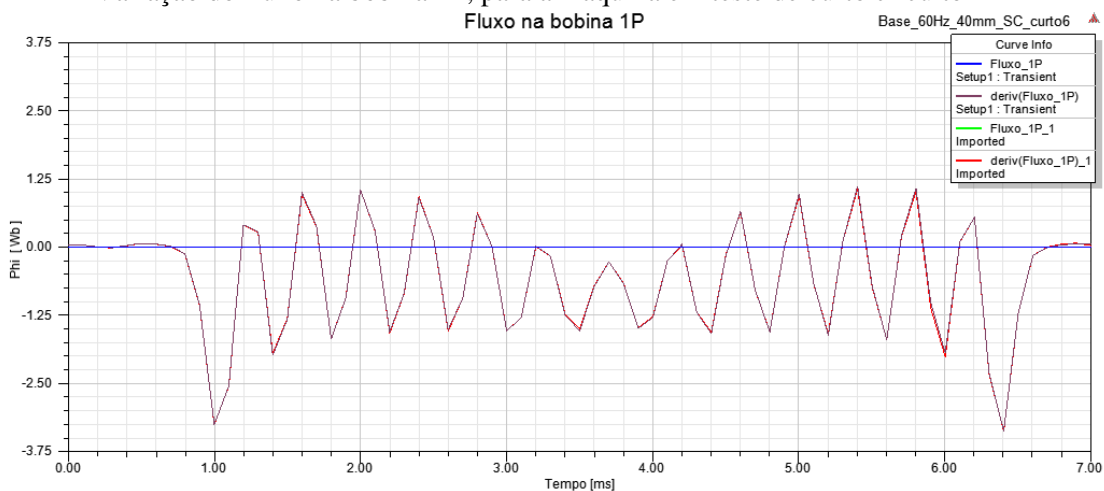


Figura 4-111 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

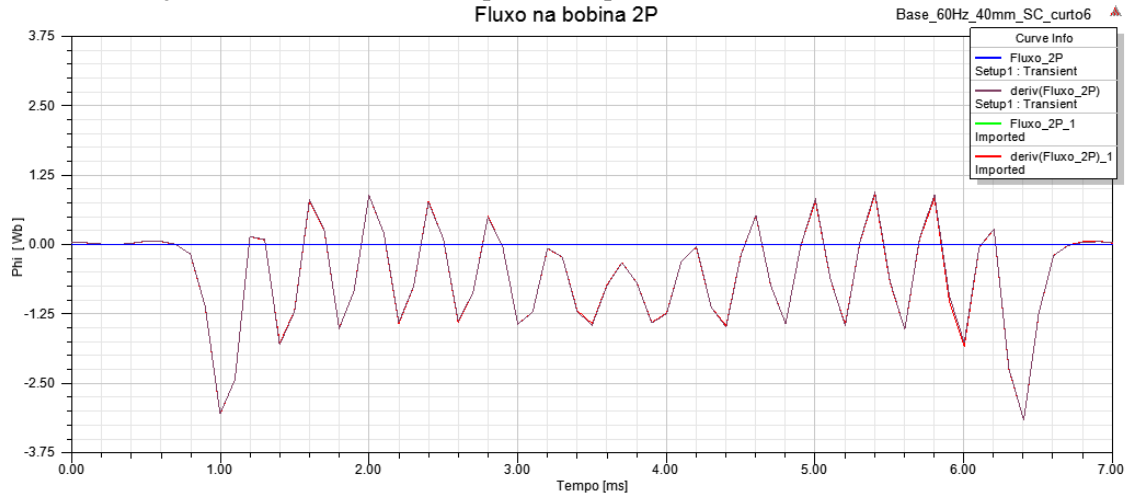


Figura 4-112-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

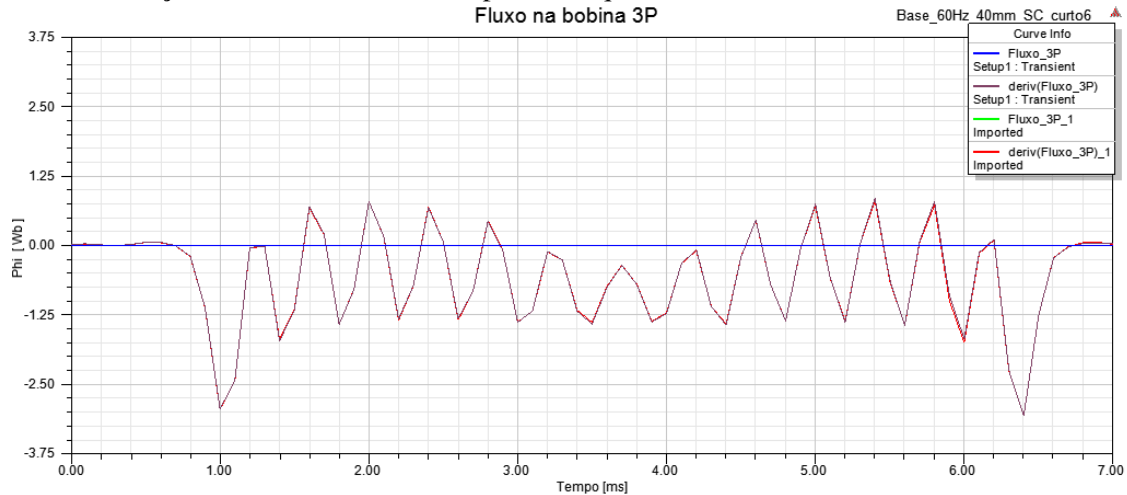


Figura 4-113-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

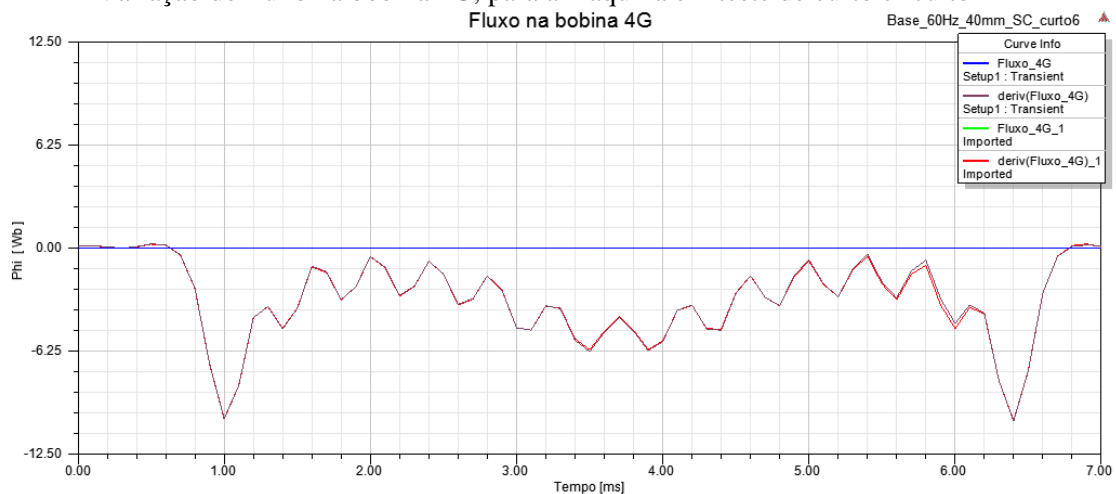


Figura 4-114-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #6

### ➤ TESTE DE CIRCUITO ABERTO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

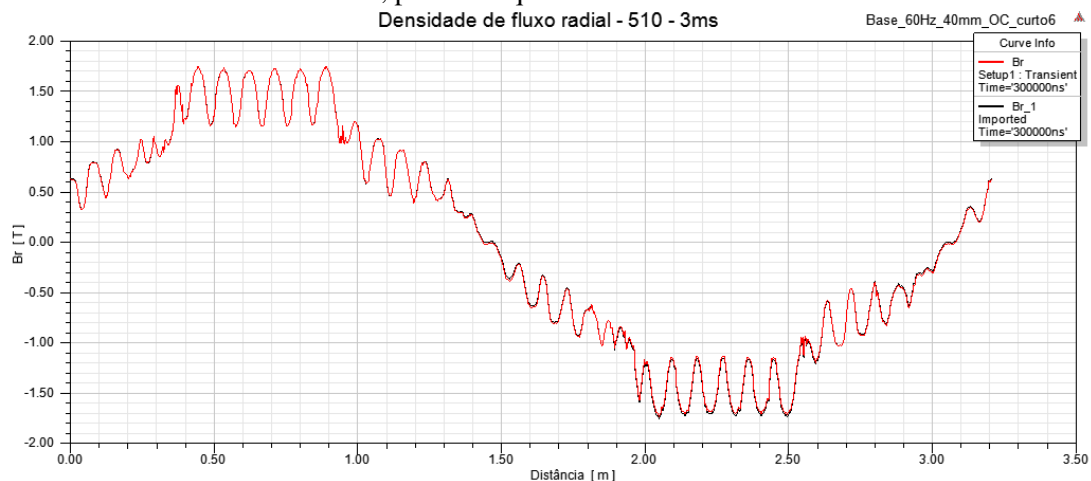


Figura 4-115 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

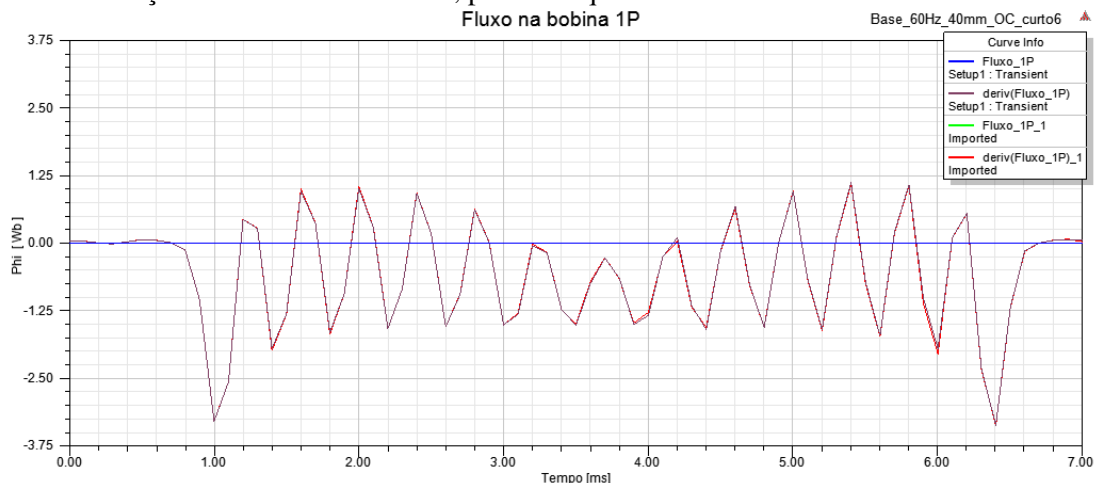


Figura 4-116- variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

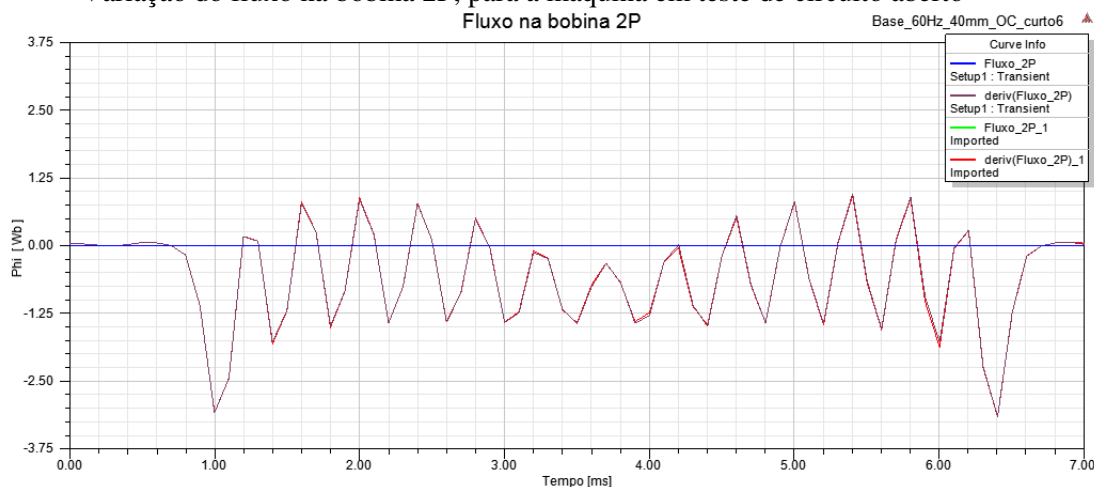


Figura 4-117- variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

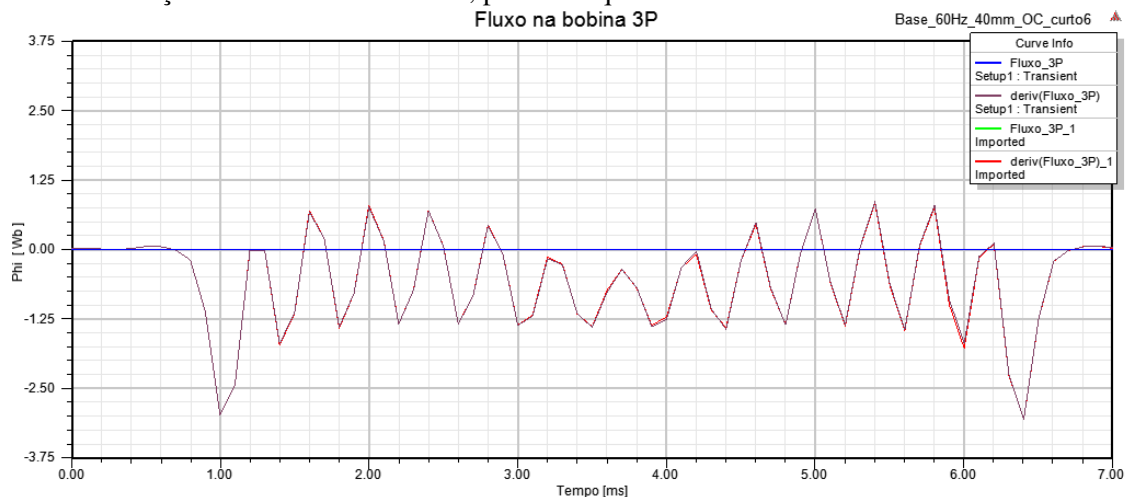


Figura 4-118-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

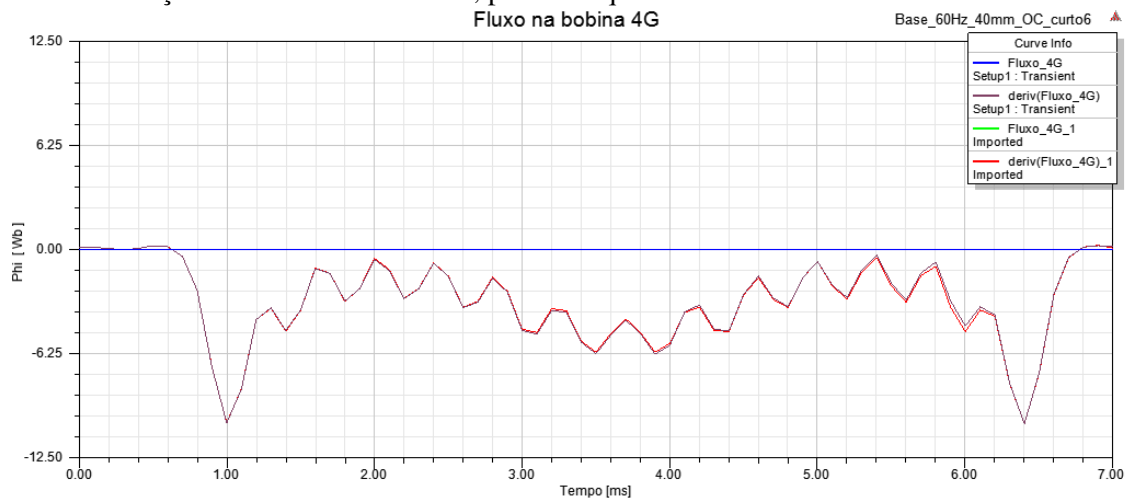


Figura 4-119-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #6

Na seção atual a queda de sensibilidade é grande todos os testes realizados, tendo alguma resposta nos resultados da bobina grande (4G).

#### 4.10. Máquina com curto na bobina #7

Nesse cenário o curto é aplicado em metade das espiras (em 6 das 12) da bobina #7. Conforme a figura 5-120, que mostra a densidade de corrente nos condutores da máquina para o teste da máquina em carga.

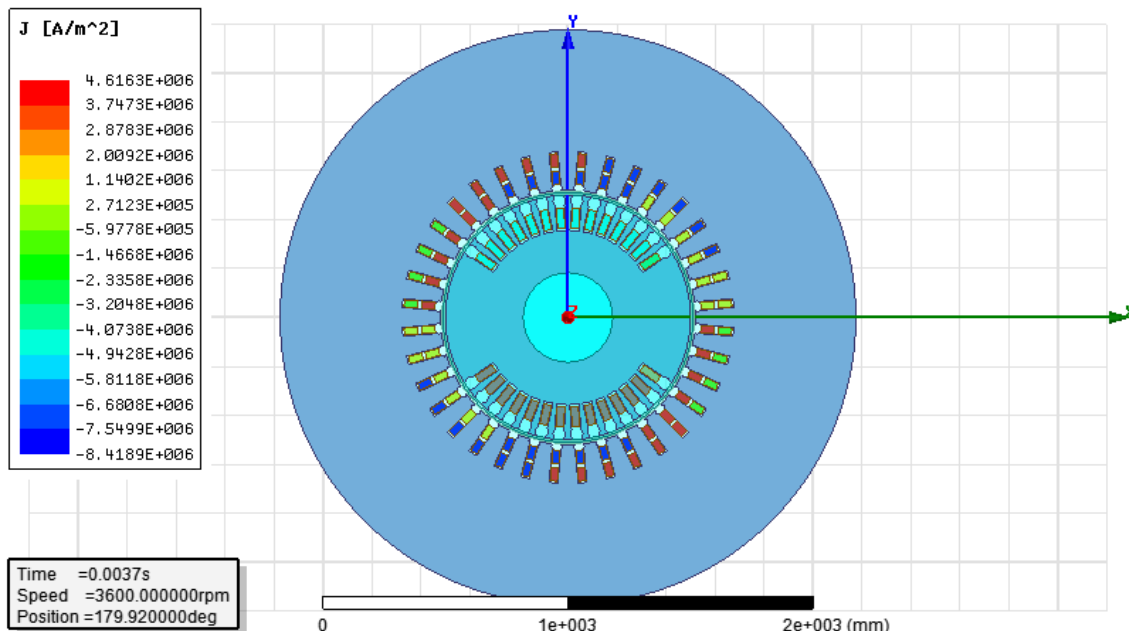


Figura 4-120 - posição da bobina #7, na qual o curto foi aplicado

#### ➤ TESTE EM CARGA:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em carga

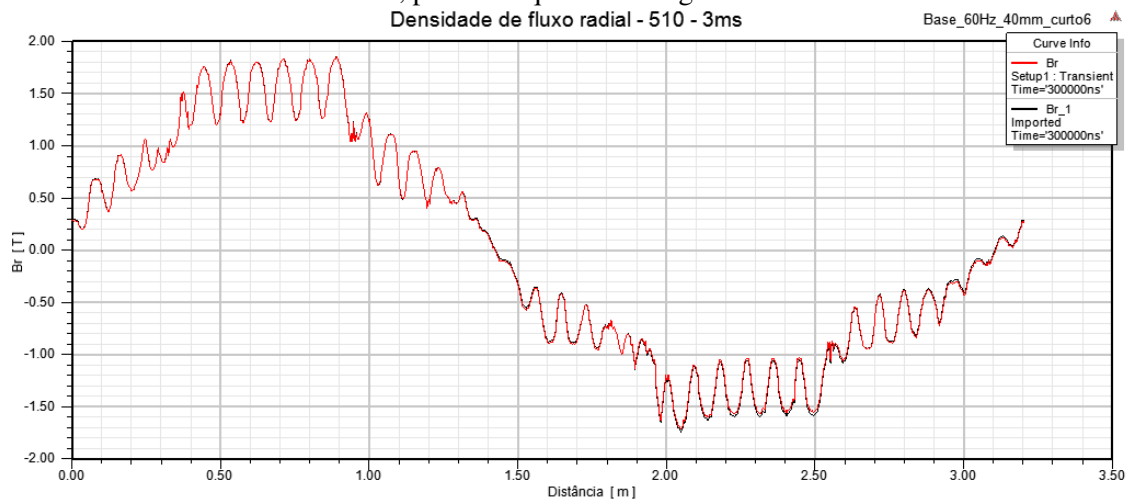


Figura 4-121 - densidade de fluxo radial, para a máquina em carga com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em carga

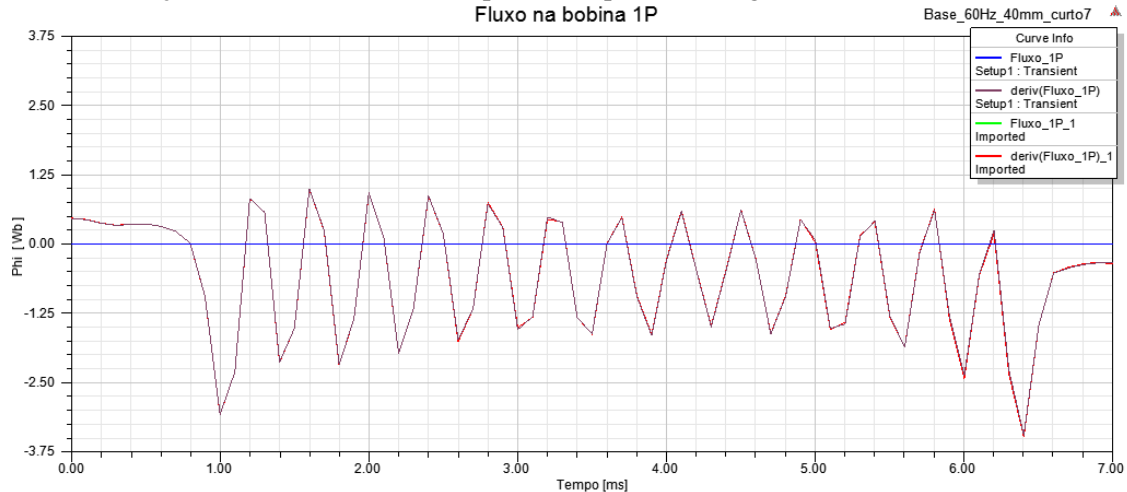


Figura 4-122-variação do fluxo na bobina 1P, para máquina em carga com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em carga

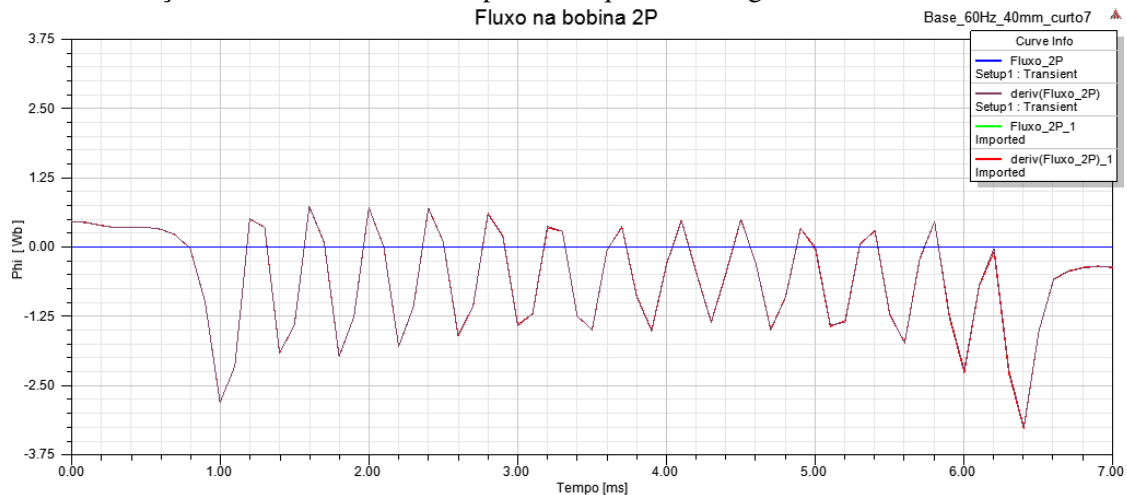


Figura 4-123-variação do fluxo na bobina 2P, para máquina em carga com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em carga

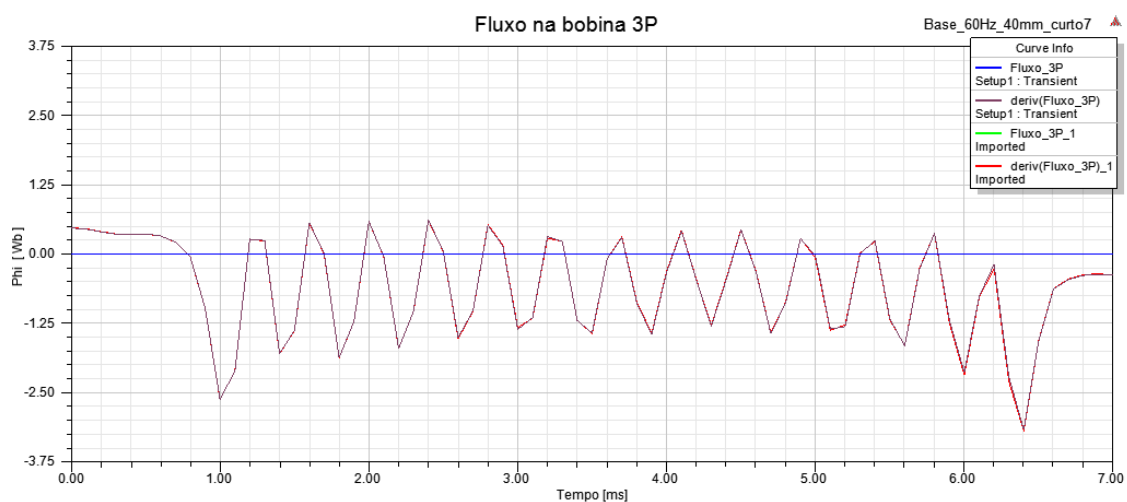


Figura 4-124 -variação do fluxo na bobina 3P, para máquina em carga com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em carga

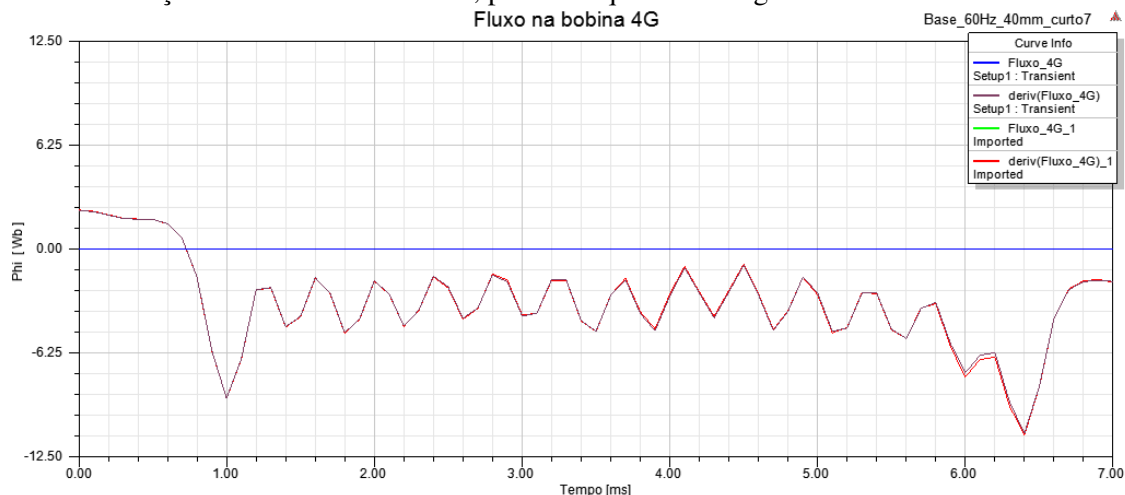


Figura 4-125-variação do fluxo na bobina 4G, para máquina em carga com curto na bobina #7

### ➤ TESTE DE CURTO CIRCUITO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito

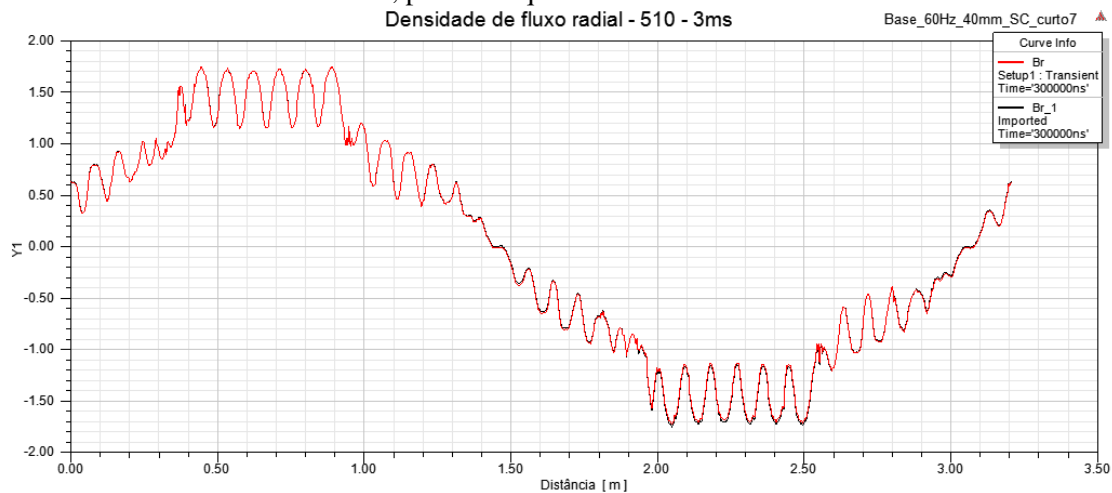


Figura 4-126 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito

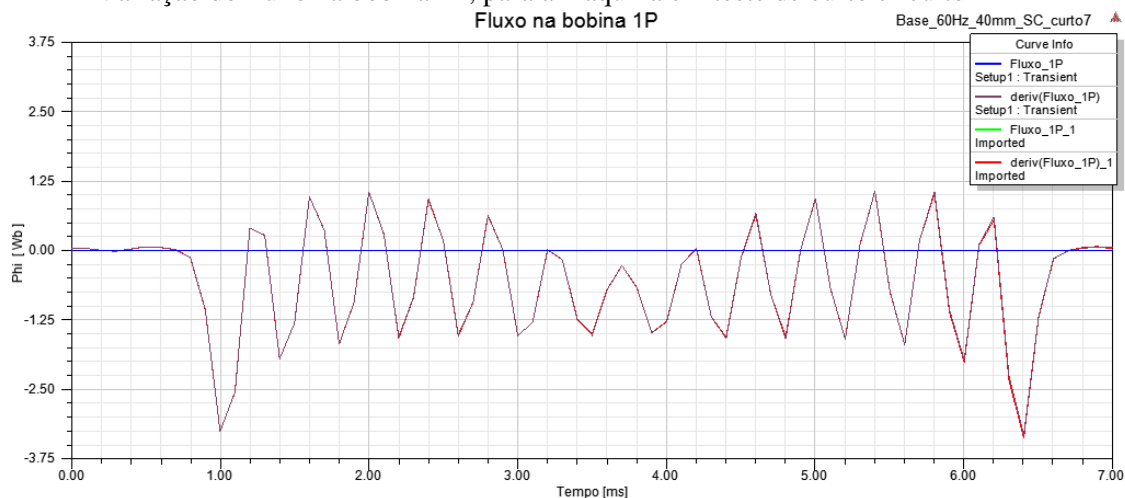


Figura 4-127 - variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito

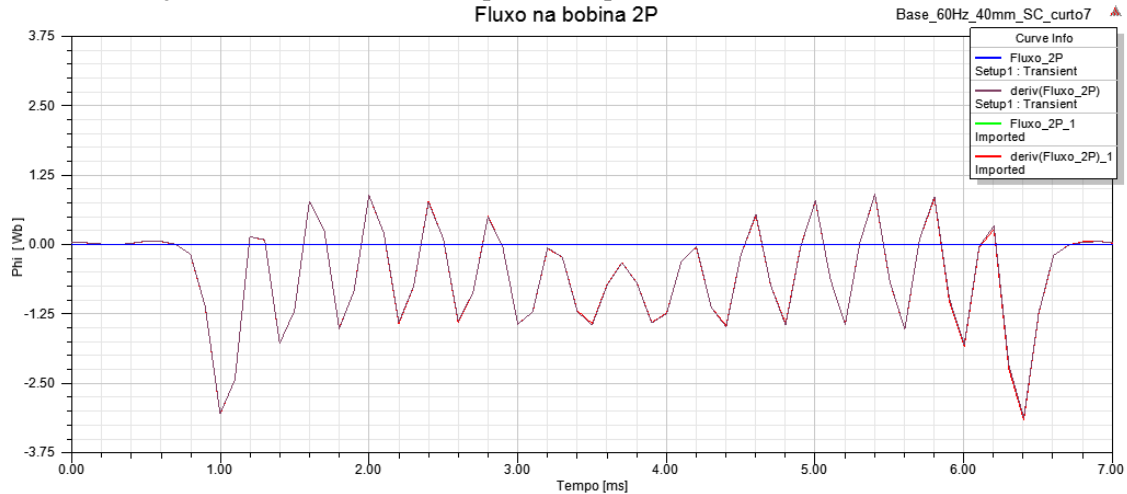


Figura 4-128-variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito

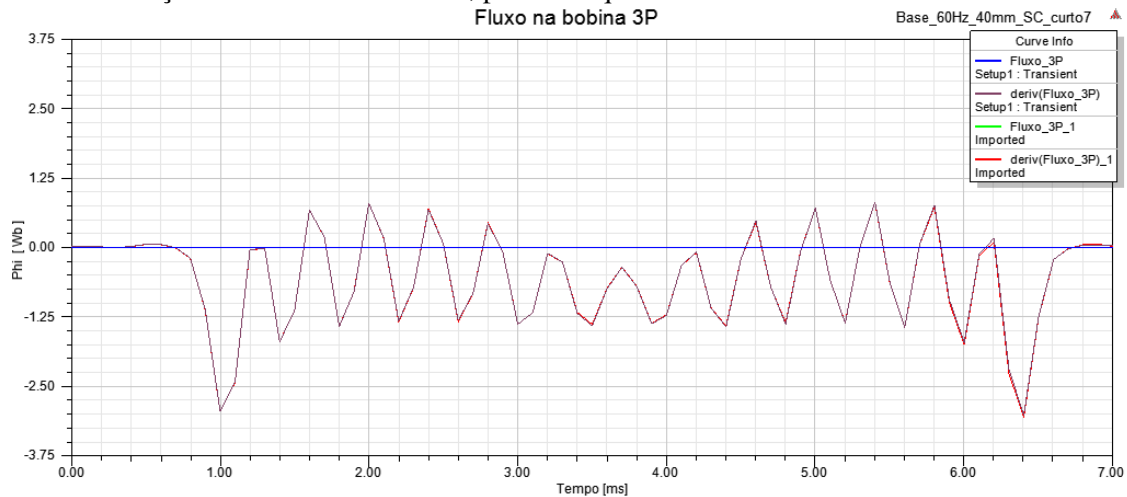


Figura 4-129-variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito

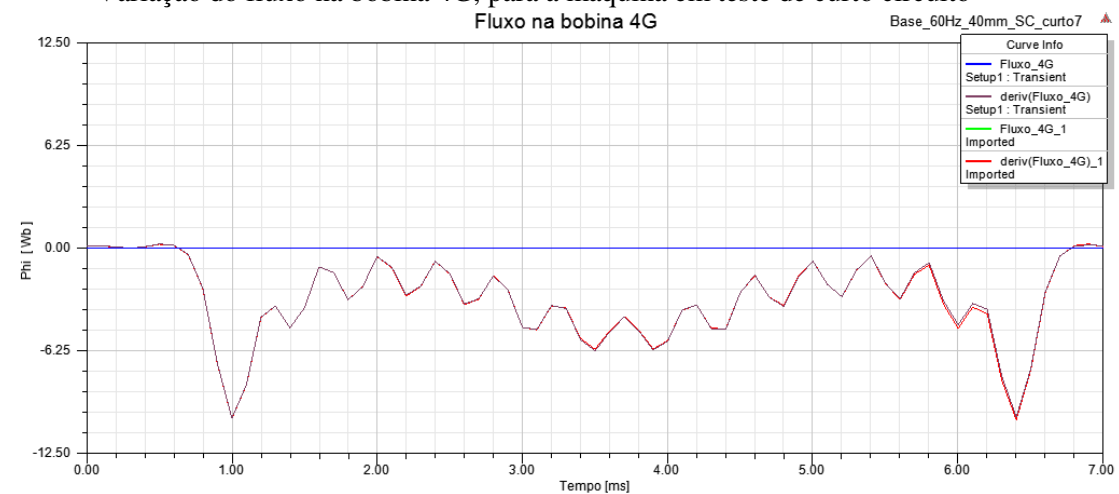


Figura 4-130-variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de curto circuito com curto na bobina #7



### ➤ TESTE DE CIRCUITO ABERTO:

- Densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto

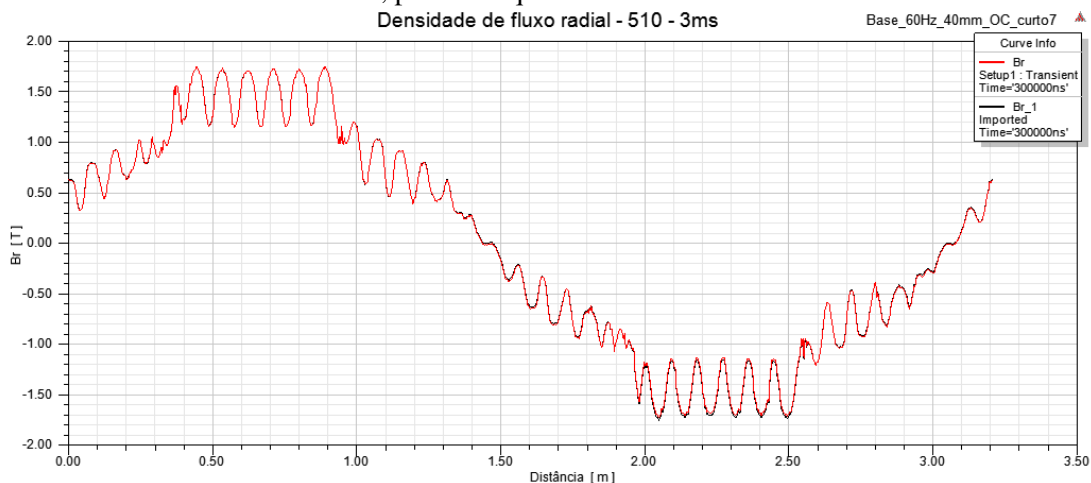


Figura 4-131 - densidade de fluxo radial, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto

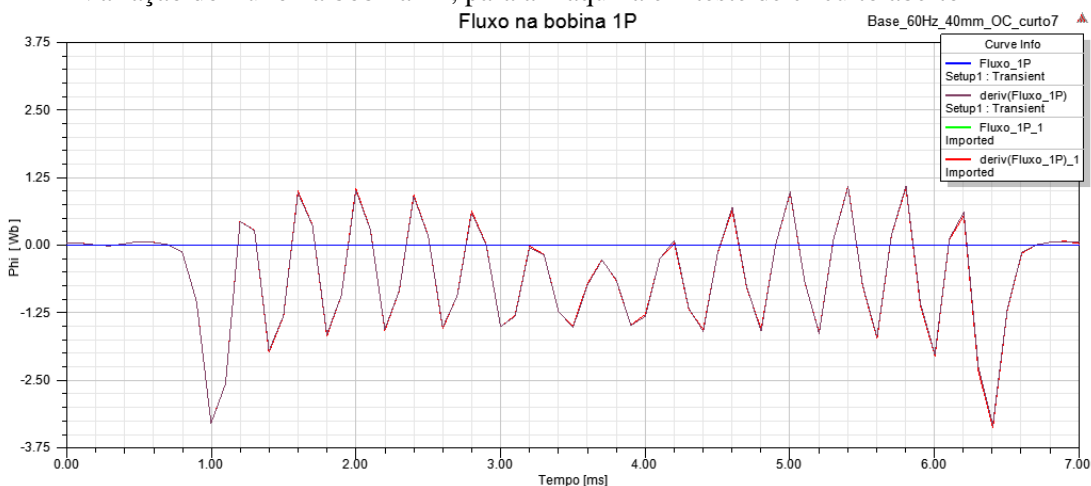


Figura 4-132-variação do fluxo na bobina 1P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto

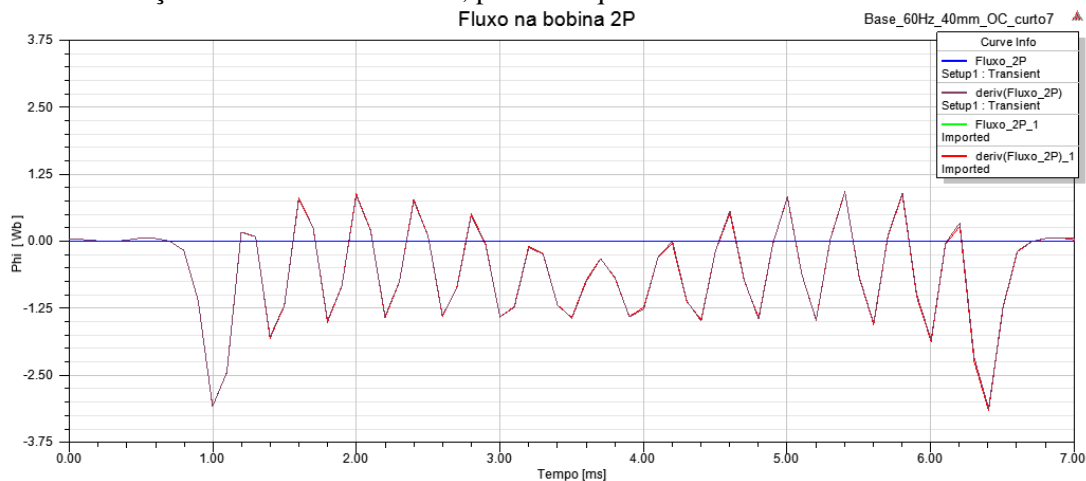


Figura 4-133-variação o fluxo na bobina 2P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto

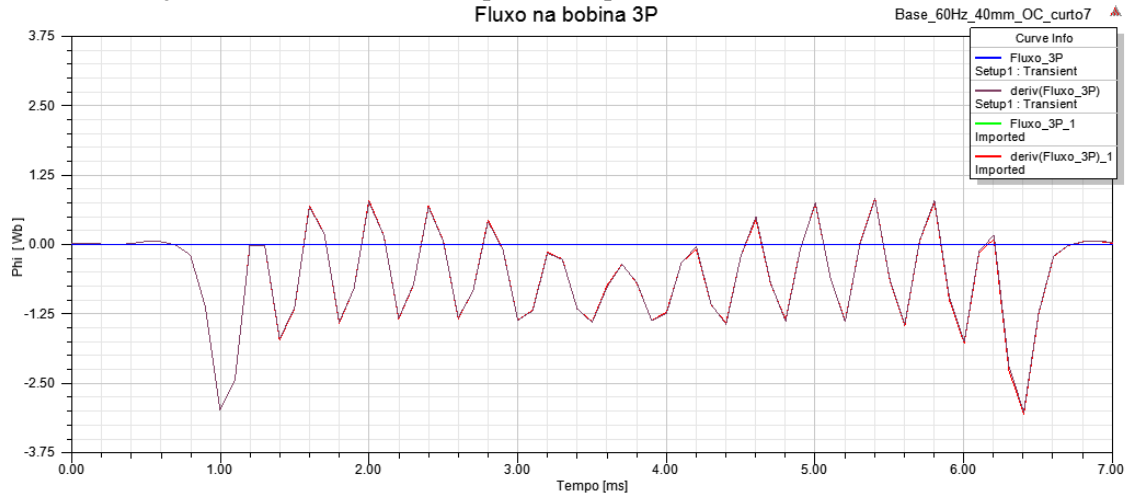


Figura 4-134-variação o fluxo na bobina 3P, para a máquina em teste de circuito aberto com curto na bobina #7

- Variação do fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

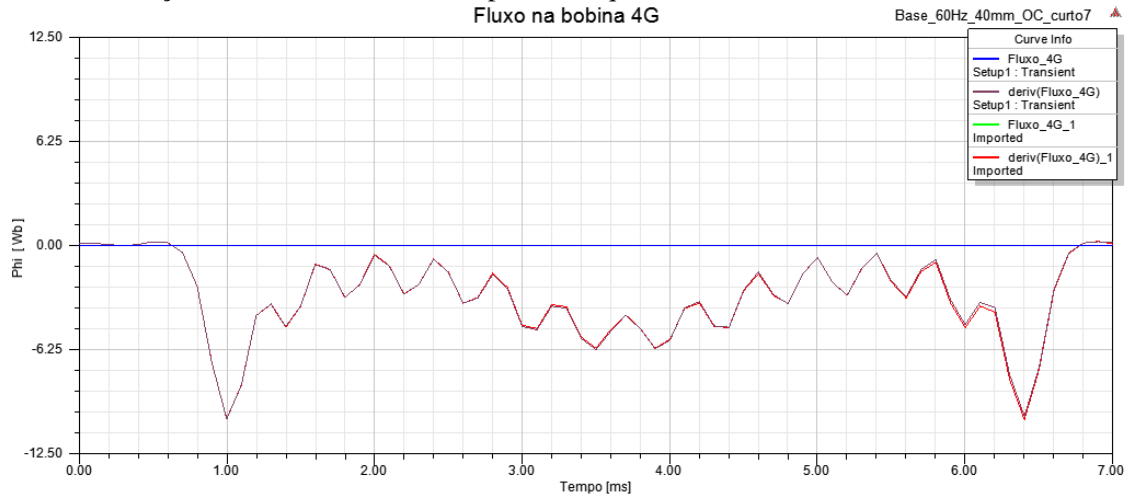


Figura 4-135-variação o fluxo na bobina 4G, para a máquina em teste de circuito aberto

De forma análoga à seção anterior, a perda de sensibilidade ocorre em todas as simulações realizadas, quando se compara os resultados das simulações de curtos em bobinas de numeração mais baixa.

## 5. CONCLUSÃO

A ocorrência do curto entre espiras do rotor é um problema que ocorre em muitas máquinas, mas pouca importância é dada para ele. Conforme já dito ao longo deste trabalho esse é um defeito que, na maioria das vezes, não causa problemas operacionais à máquina. E, no estágio inicial da ocorrência, sequer é percebido, mas caso o curto se mantenha por longos períodos ele pode se agravar atingindo uma quantidade maior de espiras e aí começar a causar problemas para a operação da máquina. Por isso a detecção precoce deste tipo de problema é primordial para sua solução definitiva.

Nas simulações realizadas pode-se concluir que quanto mais próximo do rotor está a bobina de medição melhor a sua sensibilidade para detecção da ocorrência de algum curto nas espiras de alguma bobina do rotor, sua posição e até para uma boa estimativa da quantidade de espiras que está em curto. Também foi possível perceber que com uma bobina de medição de maiores dimensões também tem uma sensibilidade razoável à detecção de existência ou não de curtos e sua posição, mas tem pouca precisão para quantificar as espiras em curto.

Os testes em carga apresentaram os melhores resultados, quando comparados com os demais tanto na detecção da existência do curto, quanto na definição de sua posição e a quantidade de espiras em curto.

Nos resultados dos três tipos de teste realizados, com a máquina em carga, em teste de curto circuito e em teste de circuito aberto, é possível verificar perda de sensibilidade das bobinas de medição conforme a posição da bobina em curto ia se afastando do eixo de quadratura. A análise dessa ocorrência buscando sua causa e/ou métodos de mitigação é um tema sugerido para trabalhos futuros.

Analisando os resultados do capítulo 3, pode-se perceber que cada bobina testada pode ter uma utilidade e, a depender do intuito do estudo, o tamanho da bobina de medição e seu posicionamento relativo ao eixo deve ocorrer para buscar melhores resultados nas simulações a serem desenvolvidas.

Não foi possível identificar alterações relevantes nas correntes ou tensões nos enrolamentos de armadura que pudessem ser utilizadas para auxiliar na identificação da existência do defeito. Uma melhor investigação dessas variáveis por ser um interessante tema para um trabalho futuro.



## A. APÊNDICE A – Dados utilizados nas simulações

### A.1. Dados da simulação da máquina base

A tabela A.1 mostra os dados básicos da máquina que será utilizada em nesse estudo. A partir dela que serão inseridos os defeitos para simulação e avaliação de cada cenário proposto.

Potência aparente nominal (MVA)	125
Fator de potência nominal:	0,8
Tensão nominal (kV):	13,8
Conexão do enrolamento:	Y
Tipo de carga:	Barra Infinita
Número de pólos:	2
Frequência (Hz):	60
Velocidade nominal (rpm):	3600
Temperatura de operação (C):	80
Perdas por atrito (W):	$1,52 \times 10^5$
Perdas nos enrolamentos (W):	$3,63 \times 10^5$
Eficiência da excitatriz (%):	90
Corrente de excitação (A):	0

*Tabela A-1 dados gerais da máquina a ser simulada*

Nas tabelas A-2, A-3, A-4 e A-5 são mostrados os dados técnicos e dimensionais do estator e do rotor, respectivamente.

Número de ranhuras no estator:	36
Diâmetro externo do estator (mm):	2350
Diâmetro interno do estator (mm):	1140
Tipo de ranhura do estator:	6
hs0 (mm):	3
hs1 (mm):	14
hs2 (mm):	141
bs1 (mm):	50
bs2 (mm):	36
Largura do topo da ranhura (mm):	54,73
Largura do fundo da ranhura (mm):	82,27
Número de setores por laminação:	12
Largura da inclinação (slots):	0
Extensão do núcleo do estator (mm):	3450
Fator de compressão	0.97
Tipo de aço:	DW540_50

*Tabela A-2 - Dados do estator*

Extensão do ajuste da cabeça da bobina (mm):	10
Folga de fim de bobina (mm):	0.5
Número de ramos paralelos:	1
Número de camadas:	2
Tipo de enrolamento:	Whole Coiled
Passo de bobina:	14
Comprimento de meia-espira da bobina (mm):	$5,14 \times 10^3$
Número de condutores por ranhura:	2
Número de fios por condutor:	48
Limite de fios por lado de bobina:	48
na direção da largura	2
na direção da espessura	24
Largura do fio (mm):	11,8
Espessura do fio (mm):	2,36
Espessura do revestimento do fio (mm):	0.5
Direção do fio na ranhura:	Horizontal
Revestimento da bobina (mm):	0
Largura da bobina (mm):	24,6
Altura da bobina (mm):	68,64
Isolação inferior (mm):	0
Espessura da cunha (mm):	2
Espessura do isolamento da ranhura(mm):	0,25
Isolação da camada (mm):	0,5
Área da ranhura (mm <sup>2</sup> ):	$5,79 \times 10^3$
Fator de preenchimento da ranhura (%):	68,07
Fator do enrolamento do estator:	0,89

*Tabela A-3 - dados do enrolamento do estator*

Entreferro (mm):	20
Diâmetro externo (mm):	1000
Diâmetro interno (mm):	365
Comprimento do rotor (mm):	3500
Fator de empilhamento do núcleo de ferro:	0.97
Tipo de aço:	DW540_50
Espessura do dedo de prensagem (mm):	0
Dedo de prensagem magnético:	Não
Número de índices de ranhuras	42
Número de ranhuras reais:	28
Tipo de ranhura do rotor:	6
hs0 (mm):	2,5
hs1 (mm):	38,5
hs2 (mm):	103
bs1 (mm):	52
bs2 (mm):	38
Largura do topo da ranhura do rotor (mm):	36,78
Largura do fundo da ranhura do rotor (mm):	15,26
Eixo magnético:	Sim

*Tabela A-4 - dados do rotor*

Extensão do ajuste da cabeça da bobina (mm):	80
Folga de fim de bobina (mm):	10
Número de ramos paralelos:	1
Passo de bobina mínimo:	8
Comprimento de meia-espira da bobina (mm):	$4,83 \times 10^3$
Número de condutores por ranhura:	12
Número de fios por condutor:	8
Limite de fios por lado de bobina:	96
na direção da largura	4
na direção da espessura	24
Largura do fio (mm):	8,25
Espessura do fio (mm):	3,66
Espessura do revestimento do fio (mm):	0,5
Direção do fio na ranhura:	Horizontal
Revestimento da bobina (mm):	0,5
Largura da bobina (mm):	36
Altura da bobina (mm):	$1,01 \times 10^2$
Isolação inferior (mm):	0
Espessura da cunha (mm):	38,5
Espessura do isolamento da ranhura (mm):	0,25
Isolação da camada (mm):	0
Área da ranhura (mm <sup>2</sup> ):	$5,74 \times 10^3$
Fator de preenchimento da ranhura (%):	94,55
Fator do enrolamento de campo:	0,83

*Tabela A-5 - dados do enrolamento de campo*

Na tabela A-6 são mostrados os dados referentes a consumo de material e alguns outros fatores importantes da máquina.

Taxa de curto-circuito:	0,18
Abrangência do polo elétrico:	0,66
Distorção do Fluxo harmônico total no entreferro sem carga (%)	5,11
Tensão de fase total distorção harmônica sem carga (%):	0,57
Tensão de linha total distorção harmônica sem carga (%):	0,57
Densidade de fio de cobre (kg/m <sup>3</sup> ):	$8,90 \times 10^3$
Densidade de aço do núcleo da armadura (kg/m <sup>3</sup> ):	$7,75 \times 10^3$
Densidade de aço do núcleo do rotor (kg/m <sup>3</sup> ):	$7,75 \times 10^3$
Peso do cobre da armadura (kg):	$4,37 \times 10^3$
Peso do cobre do campo (kg):	$3,43 \times 10^3$
Peso do aço do núcleo da armadura (kg):	$8,51 \times 10^4$
Peso do aço do núcleo do rotor (kg):	$1,37 \times 10^4$
Peso neto do estator (kg):	$8,94 \times 10^4$
Peso neto do rotor (kg):	$1,71 \times 10^4$
Consumo de aço no núcleo da armadura (kg):	$9,51 \times 10^4$
Consumo de aço no núcleo do rotor (kg):	$2,65 \times 10^4$

*Tabela A-6 - alguns fatores importantes e dados de consumo de material*

Já a tabela A-7 lista os parâmetros de regime permanente da máquina não saturada.

Resistência de armadura R1 (ohm):	$2,29 \times 10^{-3}$
Resistência de armadura a 20C (ohm):	$1,86 \times 10^{-3}$
Reatância de armadura de dispersão X1 (ohm):	$9,59 \times 10^{-2}$
Reatância reativa de eixo direto Xad (ohm):	8,25
Reatância reativa de eixo de quadratura Xaq (ohm):	8,08
Reatância de eixo direto X1+Xad (ohm):	8,35
Reatância de eixo de quadratura X1+Xaq (ohm):	8,18
Resistência do enrolamento de campo Rf (ohm):	0,15
Resistência do enrolamento de campo a 20C (ohm):	0,12
Resistência da armadura em p.u.	$1,50 \times 10^{-3}$
Reatância de dispersão da armadura em p.u.	$6,29 \times 10^{-2}$
Reatância reativa de eixo direto em p.u.	5,42
Reatância reativa de eixo de quadratura em p.u.	5,31
Reatância de eixo direto em p.u.	5,48
Reatância de eixo de quadratura em p.u.	5,48
Resistência do enrolamento de campo em p.u.	$8,81 \times 10^{-4}$
Tensão base (V):	$7,97 \times 10^3$
Corrente base (A):	$5,23 \times 10^3$
Impedância base (ohm):	1,52

*Tabela A-7 - parâmetros saturados de regime permanente*

As tabelas A-8 e A-9 mostram os dados magnéticos da máquina, tanto sem carga quanto a plena carga.

Densidade de fluxo no dente do estator (Tesla):	1,08
Densidade de fluxo no stator-yoke (Tesla):	0,83
Densidade de fluxo no topo do dente do rotor (Tesla):	0,83
Densidade de fluxo no dente do rotor (Tesla):	1,03
Densidade de fluxo no rotor-yoke (Tesla):	1,14
Densidade de fluxo no entreferro (Tesla):	0,74
Amperes espira no dente do estator (A.E):	24,46
Amperes espira no stator-yoke (A.E):	1,33
Amperes espira no topo do dente do rotor (A.E):	78,50
Amperes espira no dente do rotor (A.E):	7,73
Amperes espira no rotor-yoke (A.E):	24,46
Amperes espira no entreferro (A.E):	$1,31 \times 10^4$
Queda total de amperes espira (A.E):	$1,33 \times 10^4$
Fator de saturação:	1,01
Reação da armadura de eixo direto (A.E):	0
Reação da armadura de eixo de quadratura (A.E):	0
Amperes espira de excitação (A.T):	$1,32 \times 10^4$
Corrente de excitação (A):	$1,58 \times 10^2$
Correção para a extensão do circ mag do Stator Yoke:	0,5
Correção para a extensão do circ mag do Rotor Yoke:	0,5
Torque de engrenamento (N.m)	19,57

*Tabela A-8 - dados magnéticos da máquina sem carga*



Densidade de fluxo no dente do estator (Tesla):	1,12
Densidade de fluxo no stator-yoke (Tesla):	0,86
Densidade de fluxo no topo do dente do rotor (Tesla):	0,86
Densidade de fluxo no dente do rotor (Tesla):	1,07
Densidade de fluxo no rotor-yoke (Tesla):	1,18
Densidade de fluxo no entreferro (Tesla):	0,77
Amperes espira no dente do estator (A.E):	26,85
Amperes espira no stator-yoke (A.E):	81,93
Amperes espira no topo do dente do rotor (A.E):	8,06
Amperes espira no dente do rotor (A.E):	10,97
Amperes espira no rotor-yoke (A.E):	27,37
Amperes espira no entreferro (A.E):	$1,37 \times 10^4$
Queda total de amperes espira (A.E):	$1,38 \times 10^4$
Fator de saturação:	1,01
Reação da armadura de eixo direto (A.E):	$7,06 \times 10^4$
Reação da armadura de eixo de quadratura (A.E):	$9,21 \times 10^3$
Amperes espira de excitação (A.E):	$8,09 \times 10^4$
Corrente de excitação (A):	963,63
Corrente de excitação na corrente de curto-circuito (A):	$8,58 \times 10^2$
Corrente de excitação com FP=0 (A):	$1,01 \times 10^3$

*Tabela A-9 - dados magnéticos a plena carga*

São listados na tabela A-10 os dados elétricos da máquina a plena carga.

Ângulo do fator de potência (graus):	37,42
Ângulo de potência (graus):	44,99
Tensão induzida em p.u.	6,02
Tensão de fase (V):	$7,97 \times 10^3$
Corrente de fase (A):	$5,23 \times 10^3$
Carga térmica da armadura ( $A^2/mm^3$ ):	$4,54 \times 10^2$
Carregamento elétrico específico (A/mm):	$1,15 \times 10^2$
Densidade de corrente da armadura ( $A/mm^2$ ):	3,94
Densidade da corrente de excitação ( $A/mm^2$ ):	4,06
Perdas no cobre (W):	$3,46 \times 10^5$
Perdas no cobre da armadura (W):	$1,68 \times 10^5$
Perdas no cobre da armadura excendentes (W):	$1,99 \times 10^4$
Perdas no cobre do campo (W):	$1,42 \times 10^5$
Perdas na excitatriz (W):	$1,58 \times 10^4$
Perdas no núcleo de ferro (W):	$3,22 \times 10^5$
Perdas no dente do núcleo do estator (W):	$4,36 \times 10^4$
Stator-Yoke Core Loss (W):	$1,78 \times 10^5$
Perdas da superfície do estator excendentes (W):	$2,55 \times 10^4$
Perdas da superfície do rotor excendentes (W):	$7,59 \times 10^4$
Perdas no núcleo por carga excessiva (W):	$2,09 \times 10^6$
Superfície do estator por espelhamento de harmônicos(W):	$3,89 \times 10^5$
Superfície do estator por harmônicos nos dentes (W):	$4,26 \times 10^5$

Pulsção do estator por harmônicos nos dentes (W):	$6,51 \times 10^5$
Superfície do rotor por espelhamento de harmônicos (W):	$8,50 \times 10^4$
Superfície do rotor por harmônicos nos dentes (W):	$4,16 \times 10^5$
Acessórios magnéticos por corrente de carga (W):	$2,51 \times 10^4$
Perdas mecânicas (W):	$5,16 \times 10^5$
Perdas por atrito (W):	$1,52 \times 10^5$
Windage Loss (W):	$3,63 \times 10^5$
Perda total (kW):	$3,28 \times 10^3$
Potência de entrada (kW):	$1,02 \times 10^5$
Potência de saída (kW):	$0,99 \times 10^5$
Eficiência (%):	96,80
Torque no eixo (N.m):	$27,2 \times 10^5$
Potência aparente (kVA):	125000
Fator de potência:	0.79

*Tabela A-10 - dados elétricos da máquina a plena carga*

Nas tabelas A-11 e A-12 são apresentados os parâmetros transitórios, constantes de tempo e os dados do método dos elementos finitos utilizados para a simulação.

*Tabela A-11 - parâmetros transitórios, constantes de tempo e dados de MEF para a simulação*

Nota: Todos os parâmetros são referenciados ao lado da armadura

Resistência do enrolamento de campo (ohm):	$1,34 \times 10^{-3}$
Reatância de dispersão do campo (ohm):	0,16
Reatância transitória de eixo direto (ohm):	0,25
Reatância de sequência negativa (ohm):	0,49
Reatância de sequência zero (ohm):	$9,59 \times 10^{-2}$
Resistência do enrolamento de campo em p.u.:	$8,81 \times 10^{-2}$
Reatância de dispersão do campo em p.u.:	0,11
Reatância transitória de eixo direto em p.u.:	0,17
Reatância de sequência negativa em p.u.:	0,32
Reatância de sequência zero em p.u.:	$6,29 \times 10^{-2}$
Constante de tempo do enrolamento de campo com armadura em circuito aberto (s):	16,62
Constante de tempo transitória de eixo direto (s):	0,51
Constante de tempo da armadura (s):	0,57

*Tabela A-12 - parâmetros transitórios, constantes de tempo*

Para enrolamento da armadura:	
Número de espiras:	12
Ramos paralelos:	1
Resistência terminal (ohm):	$2,29 \times 10^{-3}$
Indutância de cabeça de bobina de dispersão (H):	$6,95 \times 10^{-5}$
Para enrolamento de campo:	
Número de espiras:	168
Ramos paralelos:	1
Resistência terminal (ohm):	0,15
Indutância de cabeça de bobina de dispersão (H):	$1,01 \times 10^{-2}$
Valor equivalente em 2D:	
Profundidade equivalente do modelo (mm):	3490
Fator de empilhamento equivalente do estator:	0,95
Fator de empilhamento equivalente do rotor:	0,97
Inércia estimada do rotor ( $\text{kg m}^2$ ):	$2,68 \times 10^3$

*Tabela A-13 - dados de entrada do MEF transitório*

Os dados das tabelas A-1 a A-13 foram analisados e comparados a diversas máquinas reais similares em potência e forma construtiva (e com a literatura [22], [23], [24] e [25]) e os valores foram considerados coerentes. Portanto a máquina foi bem modelada e pode ser utilizada nas simulações propostas durante todo o estudo sem que se tenha prejuízo aos valores que serão analisados por erros grosseiros na modelagem inicial da máquina. Isso poderia causar erros em cascata desde a máquina inicialmente simulada, sem defeitos, até todos os cenários propostos. Adicionalmente, serão analisados, na seção 3.3, os dados da máquina sem defeitos, em comparação com máquinas reais similares e da literatura, para assegurar a correção do modelo que será utilizado como base de todo o estudo.

Os resultados da máquina simulada sem defeitos serão utilizados como base para comparação com as demais, com defeitos inseridos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. R. Albright "Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-90, no. 2, pp.478 -483 1971
- [2] W. Shuting, L. Yonggang and L. Heming "The new diagnosis method of rotor winding inter-turn short circuit fault and imbalance fault based on stator and rotor vibration characteristics", *Proc. 8th Int. Conf. Elect. Mach. Syst.*, pp.2207 -2210
- [3] M. Sasic, B. Lloyd and A. Elez "Finite element analysis of turbine generator rotor winding shorted turns", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 4, pp.930 -937 2012
- [4] L. Yonggang, S. Yi and W. Linli "The criterion on inter-turn short circuit fault diagnose of steam turbine generator rotor windings", *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst.*, pp.8 -11 2007
- [5] J. W. Wood R. T. Hindmarch: Rotor Winding Short Detection IEE Proceedings Vol. 133 Pt. B 1986
- [6] P. K. Hermann, R. Mahrt, H. H. oon: "Detecting and Locating Interturn Short Circuits on Turbine-Generator Rotors." *IEEE TRANS. POWER APPARATUS SYSTEMS*, vol. 68, pp. 686-698, Oct. 1963.
- [7] N. E. Nilsson J. Mercurio "Synchronous generator capability curve testing and evaluation" *IEEE Transactions on Power Delivery* vol. PWRD-9 pp. 414-424 1994
- [8] J. S. Hsu and J. Stein "Shaft signals of salient-poles synchronous machines for eccentricity and shorted-field-coil detections", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, pp.572 -578 1994
- [9] de Canha, D.; Cronje, W.A.; Meyer, A.S.; Hoffe, S.J. "The Use of an Electromagnetic Finite Elements Package to Aid in Understanding Shaft Voltages in a Synchronous Generator" *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE.*
- [10] Wang Xiao-hua; Li Yong-gang; Wu Yu-cai; Fan Jing "Method of fault diagnosis on inter turn short-circuit in turbine generator rotor windings based on shaft voltage" *Proceedings of the 2009 International Workshop on Information Security and Application (IWISA 2009)*
- [11] D. R. Rankin and I. Wilson, "The use of shaft voltage to detect air gap eccentricity and shorted turns in salient pole alternators," *IEE Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives*, Conf. Publ. No. 412, pp. 194–197, Sep 1995.
- [12] Maytham Sabeeh Ahmed, Farrukh Nagi, UngkuAmirulddin, Marwan A, "Investigation Of Shaft Voltage Phenomena In A Gas Turbine Generator Through An Excitation-Shaft-Bearing Simulation Model", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7 (8): 420-430, 2013 ISSN 1991-8178.
- [13] A. S. Kulkarni, M. A. El-Sharkawi and R. J. Marks "Development of a technique for on-line detection of shorts in field windings of turbine-generator rotors: Circuit design and testing", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 1, pp.8 -13 2000

- [14] R. J. Streifel, R. J. Marks and M. A. El-Sharkawi "Detection of shorted-turns in the field winding of turbine-generator rotors using novelty detectors development and field test", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, pp.8 -13 1996
- [15] Wu Yucai; Li Yonggang "Diagnosis of Rotor Winding Interturn Short-Circuit in Turbine Generators Using Virtual Power" *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp.183 -188 2015.
- [16] Liangliang Hao; Junyong Wu; Yanzhen Zhou "Theoretical Analysis and Calculation Model of the Electromagnetic Torque of Nonsalient-Pole Synchronous Machines with Interturn Short Circuit in Field Windings" *IEEE Transactions on Energy Conversion. IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp.110 -121 2015
- [17] Wu Yucai; Li Yonggang; Wan Shuting; Li Heming "Investigation of turbine generator rotor winding inter-turn short circuit fault based on harmonic detection" Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008.
- [18] Wan Shuting Li Heming Li Yonggang. "Analysis of Generator Vibration Characteristic on Rotor Winding Inter-tum Short Circuit Fault " 2003 International Conference on Electrical Machines and Systems November 9-12 2003 Beijing China.
- [19] J. Torlay C. Corenwinder A. Audoli J. Hérigault A. Foggia "Analysis of shaft voltages in large synchronous generators" IEMD International Conference on Electric Machines and Drives pp. 607-609 1999.
- [20] Maxwell online help
- [21] Help desk da ESSS (representante da ANSYS no Brasil)  
<http://esss.zendesk.com/>
- [22] Kosow, Irving L., "Máquinas Elétricas e transformadores", 15. ed. Sao Paulo : Globo, 2005.
- [23] Fitzgerald, A. E., "Máquinas Elétricas", 6.ed. Porto Alegre : Bookaman, 2006.
- [24] Kuhlman, J.H., "Design of electrical apparatus", 3.ed., Minneapolis : John Wiley and Sons, Inc., 1950.
- [25] M.P. Kostenko; L.M. Piotrovski; "Electrical Machines"; Vol. II, Editorial Mir, Segunda edição, Moscou 1979.