



ANÁLISE DE ZEROS ATRASADOS EM UNIDADES OFFSHORE

Flavius Vinicius Caetano Bezerra

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: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Março de 2017

ANÁLISE DE ZEROS ATRASADOS EM UNIDADES OFFSHORE

Flavius Vinicius Caetano Bezerra

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. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D. Sc.

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.

Prof. José Andrés Santisteban Larrea, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2017

Bezerra, Flavius Vinicius Caetano

Análise de Zeros Atrasados em Unidades Offshore /
Flavius Vinicius Caetano Bezerra. – Rio de Janeiro: UFRJ/
COPPE, 2017.

XIV, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

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

Referências Bibliográficas: p. 96-98.

1. Zeros Atrasados. 2. Curto-circuito I. Ferreira,
Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por sempre guiar a minha vida e me dar a oportunidade de melhorar profissionalmente e como ser humano.

À Petrobras pela oportunidade e conhecimento técnico adquirido que foi de fundamental importância para enriquecer esta dissertação e a todos os colegas de trabalho que de alguma maneira ajudaram, em especial ao Gilber Teixeira e ao Rodrigo Rosa, pelas várias discussões sobre o tema e ajuda no embasamento teórico.

Ao engenheiro Anderson da ESSS, que ajudou no suporte técnico do software ANSYS MAXWELL, utilizado na modelagem pelo método de Elementos Finitos.

Ao engenheiro Roberto Cunha da Eletro-Estudos pelas várias discussões técnicas sobre o assunto.

Ao meu orientador Antônio Carlos, pela paciência e boa vontade de ajudar durante todo o período de pesquisa e elaboração da dissertação e por sempre estar disposto a tirar dúvidas quando eu precisava.

Agradeço em especial à minha família, que sempre foi o pilar da minha vida e, em especial ao meu irmão Marcus Fernando e à minha mãe Ana Maria que sempre me apoiou em todos os momentos e se sacrificou muito em prol da minha formação acadêmica.

Em especial agradeço do fundo do coração à minha esposa Aline, que esteve ao meu lado em todos os momentos e nunca me deixou desistir, mesmo nos momentos mais difíceis.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha filha Fernanda, que mesmo sem ter idade suficiente para entender a vida, me ajuda de uma forma muito especial, me impulsionando e dando forças para que eu me torne uma pessoa melhor.

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

ANÁLISE DE ZEROS ATRASADOS EM UNIDADES OFFSHORE

Flavius Vinicius Caetano Bezerra

Março/2017

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

A ocorrência de um curto-circuito próximo a fontes geradoras pode submeter o sistema elétrico, na vizinhança das mesmas, a correntes fortemente assimétricas. Em plataformas marítimas de produção, a referida assimetria, associada a outras condições específicas, favorece o surgimento do fenômeno conhecido como “Zeros Atrasados” na corrente de curto-circuito, que pode provocar estresse térmico no disjuntor que está tentando interromper o defeito. Este trabalho tem como objetivo analisar o fenômeno “Zeros Atrasados” e suas consequências em um sistema elétrico típico de plataformas marítimas de produção. Inicialmente, um gerador de 25 MW, 13,8kV foi modelado, com a utilização do método de elementos finitos, visto que este equipamento é o mais relevante para o estudo em questão. A seguir, este modelo foi incorporado ao sistema de geração sob estudo, e diversas simulações foram realizadas por meio do programa ATP (“Alternative Transient Program”), permitindo a avaliação da influência de diversos aspectos associados à formação de “Zeros Atrasados” na corrente de curto-circuito, dentre os quais a contribuição de motores de indução de grande porte.

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

ANALYSIS OF DELAYED CURRENT ZEROS IN OFFSHORE UNITS

Flavius Vinicius Caetano Bezerra

March/2017

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

High asymmetric currents are expected to appear in electrical systems, whenever a short circuit occurs somewhere nearby electric generators buses. In the case of offshore production platforms, the so called asymmetry, along with other specific conditions, may give rise to the so called “delayed current zeros” phenomenon in the short circuit current wave, which in turn, can produce thermal stress in the circuit breaker in charge of clearing the fault. The aim of the present work is to analyze the mentioned phenomenon, as well as its possible aftermath in a typical electrical system of an offshore production platform. Firstly, a 25 MW, 13.8 kV electric generator was modeled, by using finite elements method, since this piece of equipment is the most important factor in the study under consideration. That model was added to the electrical system under study, and then several simulations were performed employing the software ATP (“Alternative Transient Program”), making possible the evaluation of the different elements affecting the formation of “delayed current zeros”, including the contribution of large induction motors.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
CAPÍTULO 2 – O FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS.....	8
2.1 CONCEITOS BÁSICOS	8
2.2 EFEITO DE ZEROS ATRASADOS EM DISJUNTORES	15
2.3 DIFERENÇAS BÁSICAS DO FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA E SISTEMAS INDUSTRIAIS ISOLADOS	18
CAPÍTULO 3 – A MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS.....	21
3.1 CARACTERÍSTICAS DO GERADOR.....	21
3.2 REPRESENTAÇÃO DO ESTATOR.....	23
3.3 REPRESENTAÇÃO DO ROTOR.....	25
3.4 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM	26
3.5 EFEITO DA SATURAÇÃO DO GERADOR.....	31
CAPÍTULO 4 – CENÁRIOS EM QUE PODEM OCORRER O FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS	34
CENÁRIO 01 – GERADOR A VAZIO	35
CENÁRIO 02 – GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL INDUTIVO	40
CENÁRIO 03 – GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL CAPACITIVO	42
CENÁRIO 04 – VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	44
CENÁRIO 05 – RESISTÊNCIA DE ARCO EM DISJUNTORES A VÁCUO.....	48
CENÁRIO 06 – EFEITO DA ABERTURA DA PRIMEIRA FASE	50
CENÁRIO 07 – CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	53
COMPARAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DO ATP	53
SIMULAÇÃO COM CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO	56
CENÁRIO 08 – TIPOS DE CURTO-CIRCUITO	63
CONCLUSÕES SOBRE OS CENÁRIOS.....	68
CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE OFFSHORE TÍPICA.....	72
5.1 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA OFFSHORE TÍPICO	72
5.2 PREMISSAS PARA O ESTUDO DE ZEROS ATRASADOS FEITO NO ATP	75
5.3 SIMULAÇÃO FEITA NO ATP E RESULTADOS.....	79
5.4 POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA EVITAR O PROBLEMA DO FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS	90
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	93
TRABALHOS FUTUROS.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ANEXO 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO CAPÍTULO 4	99
CENÁRIO 01 - GERADOR A VAZIO	99
CENÁRIO 02 - GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL INDUTIVO	100
CENÁRIO 03 - GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL CAPACITIVO	105
CENÁRIO 04 - VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	109
CENÁRIO 05 – RESISTÊNCIA DE ARCO EM DISJUNTORES A VÁCUO	123
CENÁRIO 06 – EFEITO DA ABERTURA DA PRIMEIRA FASE	125
CENÁRIO 07 – CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	127
ANEXO 2 – RESULTADO DA INVESTIGAÇÃO DE TODAS AS POSSIBILIDADES DE ABERTURA DO DISJUNTOR SEM ATRASO INTENCIONAL NA PROTEÇÃO.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corrente de curto-circuito com o fenômeno de zeros atrasados.	8
Figura 2: Circuito RL simples.	9
Figura 3: Correntes do circuito RL simples.	10
Figura 4: Componente CC da corrente para diferentes X/R.....	10
Figura 5: Representação do gerador através dos eixos d e q (Park), adaptado de [3]....	11
Figura 6: Correntes de armadura para máxima assimetria na fase A.	13
Figura 7: Correntes de armadura sem assimetria na fase A.....	13
Figura 8: Comparação da densidade de campo magnético criado nas tecnologias de disjuntores TMF e AMF.....	16
Figura 9: Efeito do arco elétrico no momento da abertura do disjuntor.	17
Figura 10: Corte transversal do gerador modelado pelo método de Elementos Finitos.	23
Figura 11: Montagem dos enrolamentos de armadura nas ranhuras do estator.	24
Figura 12: Comparação da Curva em Vazio do Gerador com e sem os canais de ventilação do estator.	24
Figura 13: Curva BxH adaptada na modelagem pelo método de Elementos Finitos.	25
Figura 14: Modelagem do rotor no RMxprt.	26
Figura 15: Modelo 3D do gerador feito no Maxwell.....	27
Figura 16: Modelagem do Gerador no Maxwell 2D.	28
Figura 17: Comparação da Curva em Vazio de projeto e a simulada no Maxwell.....	29
Figura 18: Comparação da curva de Curto-Circuito de projeto e a simulada no Maxwell.	30
Figura 19: Comparação do efeito de saturação da máquina durante o curto-circuito.	32
Figura 20: Circuit Editor para o cenário 1.....	35
Figura 21: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - a.1).	36
Figura 22: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - a.1).	37
Figura 23: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - a.1).	37
Figura 24: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - a.2).	39
Figura 25: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - b).	40
Figura 26: Circuit Editor para o cenário 2.....	41
Figura 27: Corrente de curto-circuito para o cenário 3 - a).	43
Figura 28: Diagrama fasorial simplificado para Fator de Potência indutivo.....	46
Figura 29: Diagrama fasorial simplificado para Fator de Potência capacitivo.....	47
Figura 30: Comparação do Fator de Potência com o tempo para a corrente cruzar o zero.	47
Figura 31: Corrente de curto-circuito com a extinção da fase C devido a abertura do disjuntor.	50
Figura 32: Tensão induzida da máquina para extinção da corrente de curto-circuito na fase C.	51
Figura 33: Corrente de armadura com a simulação da abertura do disjuntor e consequentemente extinção das fases.....	51
Figura 34: Corrente de curto-circuito com a extinção da fase A devido a abertura do disjuntor.....	52
Figura 35: Modelo simples no ATP para validar a resposta dinâmica do gerador.....	54
Figura 36: Comparação do método em Elementos Finitos (curva Azul) com o ATP (curva vermelha) para curto-circuito no zero de tensão.	55
Figura 37: Comparação do método em Elementos Finitos (curva azul) com o ATP (curva	

vermelha) para um curto-circuito no pico de tensão.	55
Figura 38: Comparação da corrente de campo simulada no Maxwell (curva azul) e ATP (curva vermelha) para um curto-circuito trifásico no gerador a vazio.	56
Figura 39: Circuito montado no ATP para o cenário 7. Erro! Indicador não definido.	
Figura 40: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - a).	59
Figura 41: Comparação das correntes de curto-circuito (curva vermelha) da fase A, contribuição do gerador (curva verde) da fase A e contribuição do motor (curva Azul) da fase A.	59
Figura 42: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - b).	60
Figura 43: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - c).	61
Figura 44: Contribuição do motor para o cenário 7 - c).	62
Figura 45: Corrente de curto-circuito do cenário 7 - d).	62
Figura 46: Tensão terminal para o pior caso encontrado no cenário 8.	67
Figura 47: Corrente de curto-circuito para o pior caso encontrado no cenário 8.	67
Figura 48: Comparação da corrente de campo (em ampere) de duas cargas de mesma impedância e fatores de potência diferentes (curva superior representa a carga com fator de potência menor).	70
Figura 49: Comparação da corrente de curto-circuito de duas cargas de mesma impedância e fatores de potência diferentes.	70
Figura 50: Diagrama unifilar simplificado de uma unidade offshore típica.	73
Figura 51: Aplicação dos curtos-circuitos na simulação da planta real Offshore.	81
Figura 52: Montagem da simulação no ATP.	82
Figura 53: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 50ms (vermelho fase A, verde fase B e azul fase C).	84
Figura 54: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 52ms (vermelho fase A, verde fase B e azul fase C).	84
Figura 55: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 70ms.	86
Figura 56: Contribuição para curto-circuito da fase A para três diferentes motores para o caso 1.D.	88
Figura 57: Simulação do caso 6.D para curto-circuito evolutivo.	90
Figura 58: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - a.2).	99
Figura 59: Gráfico de tensão com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - a.2).	99
Figura 60: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - b).	100
Figura 61: Gráfico de tensão com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - b).	100
Figura 62: Corrente de campo do gerador para o cenário 2 - a).	101
Figura 63: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - a).	101
Figura 64: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - a).	102
Figura 65: Corrente de curto-circuito para o cenário 2 - a).	102
Figura 66: Corrente de campo do gerador para o cenário 2 - b).	103
Figura 67: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - b).	103
Figura 68: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - b).	104
Figura 69: Corrente de curto-circuito para o cenário 2 - b).	104
Figura 70: Circuit Editor para o cenário 3.	105
Figura 71: Corrente de campo do gerador para o cenário 3 - a).	105

Figura 72: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - a).	106
Figura 73: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - a).	106
Figura 74: Corrente de campo do gerador para o cenário 3 - b).	107
Figura 75: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - b).	107
Figura 76: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - b).	108
Figura 77: Corrente de curto-circuito para o cenário 3 - b).	108
Figura 78: Circuit Editor para o cenário 4, FP=0,95.	109
Figura 79: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) FP=0,95.	109
Figura 80: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.	110
Figura 81: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.	110
Figura 82: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.	111
Figura 83: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) FP=0,95.	111
Figura 84: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,95.	112
Figura 85 Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,95.	112
Figura 86: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,95.	113
Figura 87: Circuit Editor para o cenário 4, FP=0,5.	113
Figura 88: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) FP=0,5.	114
Figura 89: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,5.	114
Figura 90: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,5.	115
Figura 91: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,5.	115
Figura 92: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) FP=0,5.	116
Figura 93: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,5.	116
Figura 94: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,5.	117
Figura 95: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,5.	117
Figura 96: Circuit Editor para o cenário 4, FP=1,0.	118
Figura 97: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) FP=1,0.	119
Figura 98: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=1,0.	119
Figura 99: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=1,0.	120
Figura 100: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=1,0.	120
Figura 101: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) FP=1,0.	121
Figura 102: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=1,0.	121
Figura 103: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=1,0.	122
Figura 104: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=1,0.	122
Figura 105: Circuit Editor para Cenário 5 - a).	123

Figura 106: Variação da impedância de falta para o cenário 5 - a).....	123
Figura 107: Circuit Editor Cenário 5- b).	124
Figura 108: Circuit Editor utilizado no Cenário 6.....	125
Figura 109: Corrente de campo do gerador para o cenário 6 - a).....	125
Figura 110: Corrente de campo do gerador para o cenário 6 - b).....	126
Figura 111: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 6 - b).....	126
Figura 112: Tensão terminal para o cenário 7 -a).	127
Figura 113: Corrente de campo para o cenário 7 -a).....	127
Figura 114: Contribuição do motor de indução durante o curto-circuito para o cenário 7 - a).	128
Figura 115: Tensão terminal para o cenário 7 - b).....	128
Figura 116: Corrente de campo para o cenário 7 - b).....	129
Figura 117: Contribuição do motor de indução para o cenário 7 - b).....	129
Figura 118: Tensão terminal para o cenário 7 - c).	130
Figura 119: Corrente de campo para o cenário 7 - c).	130
Figura 120: Tensão terminal para cenário 7 - d).....	131
Figura 121: Corrente de campo para o cenário 7 - d).....	131
Figura 122: Contribuição do motor para o cenário 7 - d).....	132
Figura 123: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 54ms.	133
Figura 124: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 56ms.	133
Figura 125: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 58ms.	134
Figura 126: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 60ms.	134
Figura 127: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 62ms.	134
Figura 128: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 64ms.	135
Figura 129: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 66ms.	135
Figura 130: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 68ms.	135
Figura 131: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 72ms.	136
Figura 132: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 74ms.	136
Figura 133: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 76ms.	137
Figura 134: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 78ms.	137
Figura 135: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 80ms.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre disjuntores de gerador e disjuntores de distribuição [7].	20
Tabela 2: Dados nominais do gerador fornecido pela Weg.	22
Tabela 3: Parâmetros do gerador calculado pelo método de Elementos Finitos em P.U.31	
Tabela 4: Resultado das simulações do Cenário 4.	45
Tabela 5: Efeito do curto-circuito com impedância de falta.	49
Tabela 6: Efeito do curto-circuito com resistência de arco no momento da abertura do disjuntor.	49
Tabela 7: Resultado do cenário 8 com os diversos tipos de curto-circuito.	65
Tabela 8: Resumos dos cenários estudados.	68
Tabela 9: Parâmetros elétricos dos cabos de 15kV - isolação XLPE	75
Tabela 10: Resultados para o caso 2.D considerando as possibilidades de tempo de abertura do disjuntor.	85
Tabela 11: Resultado para os sistema real e curtos-circuitos trifásicos.	87
Tabela 12: Resultados o sistema real e curtos-circuitos evolutivos.	89

LISTA DE SÍMBOLOS

X	reatância do sistema elétrico.
R	resistência do sistema elétrico.
CC	corrente contínua.
CA	corrente alternada.
θ	deslocamento angular da tensão senoidal.
L	indutância.
$i(t)_{CC}$	componente em corrente contínua.
$i(t)_{CA}$	componente em corrente alternada.
d	eixo direto.
q	eixo em quadratura.
I_a, I_b, I_c	correntes de armadura.
I_f	corrente de campo.
V_a, V_b, V_c	tensão de fase.
V_f	tensão de campo.
λ	ângulo entre o eixo da fase <i>a</i> e o eixo <i>d</i> .
T' e T''	constantes de tempo transitório e subtransitório.
x, x' e x''	reatância em regime permanente, transitória e subtransitória.
T_a	constante de tempo da armadura.
ω	frequência angular.
TMF	<i>Transverse Magnetic Field.</i>
AMF	<i>Axial Magnetic Field.</i>
\vec{A}	vetor potencial magnético.
SF6	Gás hexafluoreto de enxofre.
KEMA	Keuring van E lektrotechnische M aterialen te A rnhem, laboratório especializado em ensaios elétricos.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O fenômeno de zeros atrasados vem sendo estudado há décadas e sempre existe uma preocupação no que diz respeito à integridade do sistema elétrico.

Diversas características da planta podem influenciar na assimetria das correntes de curto-circuito implicando em que pelo menos uma delas demore vários ciclos até cruzar o zero de referência. Este fenômeno é conhecido como Zeros Atrasados (*Delayed Current Zeros*).

Dentre os diversos fatores que influenciam o fenômeno de Zeros Atrasados, um dos mais relevantes segundo a literatura técnica é a elevada relação X/R do sistema. Quanto maior seja esta relação, mais lento será o decaimento da componente de corrente contínua (CC) e, conseqüentemente, maior será a assimetria do curto-circuito. O efeito é agravado caso a componente transitória do gerador (componente CA) decaia rapidamente, implicando em um maior tempo para que a corrente de curto-circuito passe por zero.

O grande risco para o sistema elétrico em caso de ocorrência de curtos-circuitos com elevada assimetria está no momento da abertura do disjuntor. O disjuntor é projetado para suportar o arco elétrico dentro das suas câmaras por um determinado tempo e a extinção do arco somente acontecerá no momento da passagem da corrente por zero. Caso o arco elétrico no interior do disjuntor permaneça por um período de tempo relativamente maior, a energia interna ao disjuntor será muito elevada, podendo danificar o equipamento e, conseqüentemente, comprometer a operação do sistema elétrico.

Muitas referências bibliográficas apresentam resultados de estudos em sistemas reais onde fica caracterizado a presença do fenômeno de Zeros Atrasados, indicando preocupação com a integridade física dos equipamentos e recomendando que o sistema elétrico esteja preparado de forma que o disjuntor seja capaz de suportar assimetrias elevadas por um período relativamente longo ou que sejam utilizadas outras medidas mitigadoras para resolver o problema [1].

1.1 MOTIVAÇÃO

A maioria das referências literárias sobre o fenômeno de Zeros Atrasados é

voltada para sistemas de potência onde o disjuntor utilizado normalmente é a SF6 e projetado para suportar correntes de curto-circuito com alta assimetria. Desta forma, são utilizados disjuntores específicos para geradores testados em consonância com a norma IEEE C.37-013 [2], que prevê a ocorrência de curtos-circuitos com elevada assimetria e preparados para a ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados.

Outra característica favorável em sistemas de potência, com relação ao fenômeno de zeros atrasados, é o fato de existirem transformadores elevadores próximos à geração e cargas elétricas motóricas distantes, processando potências inferiores quando comparadas com a geração.

Em sistemas industriais que possuem geração própria, normalmente não são utilizados transformadores elevadores para transmitir a energia elétrica e os motores elétricos são localizados relativamente próximos à geração, com potência na mesma ordem de grandeza da geração, contribuindo significativamente para a assimetria do sistema no momento da falta.

Em unidades marítimas de produção, plataformas de produção, o sistema elétrico é ainda mais desfavorável, pois trata-se de um sistema isolado em que a geração é feita localmente, normalmente com turbinas a gás, e em que grande quantidade de motores de grande porte é ligada diretamente à geração, sem utilização de transformadores.

Devido à limitação de espaço nas plataformas e necessidade de redução da manutenção dos equipamentos elétricos, os disjuntores utilizados são a vácuo e não são próprios para serem utilizados em geradores, ou seja, são utilizados disjuntores de distribuição não projetados para suportar correntes de curto-circuito com Zeros Atrasados.

Cada nova descoberta de petróleo em águas ultraprofundas faz com que o sistema elétrico da plataforma de produção aumente consideravelmente, implicando altas demandas e, conseqüentemente, altos níveis de corrente de curto-circuito. O fenômeno de Zeros Atrasados pode ser tornar uma realidade em unidades desse porte e um perigo para o sistema elétrico.

1.2 OBJETIVO

Conhecendo a especificidade de um sistema isolado *offshore* e sabendo os perigos envolvidos na ocorrência de um curto-circuito com elevada assimetria, este

trabalho tem como objetivo estudar o fenômeno de Zeros Atrasados em uma plataforma de produção, avaliando os riscos envolvidos com relação à continuidade operacional quando são utilizados disjuntores não preparados para suportar altas assimetrias e sujeitos a arcos elétricos internamente ao disjuntor por longos períodos de tempo.

O comportamento assimétrico do curto-circuito depende de vários fatores tais como: parâmetros dos geradores, carregamento do sistema, fator de potência, tipos de cargas a serem alimentadas, instante da ocorrência do curto-circuito, tipo de falta, arco interno do disjuntor, impedância de falta, etc.

Para entender este fenômeno e avaliar o comportamento da assimetria do curto-circuito em várias condições operacionais, o gerador do sistema em questão foi modelado através do método de Elementos Finitos, utilizando dados reais de geometria e informações sobre aspectos construtivos fornecidos pelo fabricante de geradores WEG.

A vantagem de se utilizar a abordagem por Elementos Finitos é permitir uma representação mais fidedigna da máquina e, conseqüentemente, estudar a variação dinâmica das correntes de curto-circuito do gerador. Para aplicação do método de Elementos Finitos foi utilizado o software ANSYS MAXWELL.

Contudo, uma desvantagem da utilização do programa de Elementos Finitos é o elevado custo computacional que inviabiliza a utilização do método para simular sistemas de grandes portes com vários geradores e motores, em configuração típica de unidades *offshore*.

Desta forma para cumprir com o objetivo final deste trabalho, que é avaliar o fenômeno de Zeros Atrasados em um sistema elétrico real de uma plataforma de produção de petróleo, foi utilizado o software ATP (*Alternative Transient Program*), bastante empregado no estudo de fenômenos transitórios.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção destina-se a apresentar de forma resumida o que existe atualmente na literatura sobre o fenômeno de Zeros Atrasados, funcionamento de disjuntores a vácuo e modelagem de geradores pelo método de Elementos Finitos, com intuito de mostrar o embasamento teórico da dissertação.

A referência [1] apresenta resultados encontrados em testes realizados no

KEMA (laboratório holandês especializado em realizar ensaios elétricos) para curtos-circuitos com Zeros Atrasados em disjuntores a SF6 e que foram utilizados em simulações computacionais no sistema da subestação de Itaipu de 550kV. A situação mais crítica simulada ocorre quando o gerador está operando em condição subexcitada com curtos trifásicos não simultâneos nos terminais do gerador.

A conclusão do artigo é que existe uma alta possibilidade de existir o fenômeno de Zeros Atrasados para curtos-circuitos no sistema de Itaipu devido ao elevado fator X/R dos geradores. No entanto, os resultados de teste do disjuntor do tipo duplo-sopro a SF6 mostram que, nas condições da simulação, o disjuntor suportaria a assimetria encontrada sem necessidade de atraso na proteção ou qualquer outra medida mitigadora.

A referência [3] propõe que uma falta nos terminais do gerador pode implicar em que a corrente de curto-circuito não passe por zero por um tempo considerável, causando danos severos ao disjuntor do gerador.

É feita uma avaliação a partir das equações de Park para curtos-circuitos trifásicos, deduzindo assim uma expressão aproximada para se obter uma estimativa do tempo necessário para a corrente cruzar por zero. Também são feitas simulações computacionais para curtos-circuitos desbalanceados, concluindo-se que o curto-circuito evolutivo (bifásico para trifásico) implica no pior caso para o fenômeno de zeros atrasados.

O artigo é referência básica citada em vários trabalhos sobre o fenômeno de Zeros Atrasados e apresenta análises fundamentais para a mitigação do fenômeno, discutindo-se efeitos provocados pela interrupção sequencial das correntes de falta e por arco interno no disjuntor do gerador.

Em [4] é abordado o comportamento do disjuntor a vácuo de média tensão para faltas com Zeros Atrasados em plataformas de petróleo. É destacada a influência do momento da aplicação da falta na assimetria das correntes de curto-circuito do sistema, assim como a condição da excitação da máquina e a influência das contribuições motóricas para a assimetria do curto-circuito.

O artigo mostra a dinâmica existente no momento da abertura do disjuntor e os efeitos associados à passagem da corrente por zero após a primeira fase se extinguir, sendo este um dos principais fenômenos que mitigam o fenômeno. Ainda são apresentados resultados de testes em disjuntores a vácuo, evidenciando a suportabilidade ao arco elétrico dentro das câmaras do disjuntor por um tempo de 47 milissegundos sem danos ao equipamento.

A aplicação de disjuntores a vácuo é aprofundada em [5], em que é exemplificado que, para sistemas de potência, normalmente são utilizados disjuntores a SF6 de grande porte e que para aplicações industriais é cada vez mais comum encontrar disjuntores a vácuo de distribuição mesmo para aplicações de proteção de geradores.

O artigo recomenda que disjuntores para geradores sejam testados para o fenômeno de Zeros Atrasados de acordo com a norma IEEE C37.013 [2] devido às altas assimetrias envolvidas e, conseqüentemente, longos períodos de arco interno às câmaras do disjuntor para curtos-circuitos próximo a geração. Tal artigo apresenta a preocupação de analisar os curtos-circuitos com Zeros Atrasados em diferentes pontos do sistema e com fechamento fora de fase, enfatizando aplicações específicas em sistemas de potência.

Ainda neste artigo é descrito o princípio de funcionamento do disjuntor a vácuo, de fundamental importância para entender a dinâmica do fenômeno de Zeros Atrasados durante a abertura do disjuntor, principalmente com relação às características da resistência do arco durante a separação dos contatos do disjuntor.

A referência [6] apresenta resultados do efeito de Zeros Atrasados para curtos-circuitos próximos à geração, em unidades de produção *offshore* que utilizam disjuntores a vácuo que não são preparados para suportar faltas com altas assimetrias.

A planta simulada possui 100 MVA de geração instalada e vários motores próximos à geração, conectados diretamente à tensão gerada. Foram testados curtos trifásicos e evolutivos de forma a caracterizar qual condição seria mais favorável para o fenômeno.

Alguns aspectos, que devem ser levados em consideração na simulação de Zeros Atrasados, foram evidenciados, tais como: efeitos da resistência do arco, uso de disjuntores especiais e atraso intencional na proteção com intenção de esperar o decaimento da corrente de curto-circuito e garantir a passagem por zero.

Disjuntores com aplicação para geradores e disjuntores para distribuição apresentam características muito diferenciadas, conforme é explorado em [7]. O artigo resume aspectos únicos de disjuntores projetados para proteger circuitos de geradores.

O desempenho superior dos disjuntores projetados para proteger geradores é detalhado e comparado com as características típicas de disjuntores padrões de distribuição. Uma das conclusões do artigo é que existe um risco em se utilizar

disjuntores de distribuição para proteção de circuitos de geradores, principalmente com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados.

A referência [8] estuda o fenômeno de Zeros Atrasados devido ao sincronismo fora de fase em sistemas de potência. Apesar de ser um fenômeno importante, este efeito não é significativo em sistemas industriais isolados *offshore* e não será abordado neste trabalho.

Em [9], [10], [11], [12], [13] e [14] são feitos diversos estudos com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados em plantas específicas de sistemas de potência, mostrando que apesar das características favoráveis desses sistemas de grande porte, em comparação com plantas industriais, o efeito de faltas com altas assimetrias é uma preocupação a ser investigada.

Com relação ao estudo de geradores pelo método de Elementos Finitos, a referência [15] modela um gerador de 247 MVA e investiga a variação da reatância em regime permanente à medida em que as condições operacionais da máquina são alteradas, inclusive com relação à saturação.

O efeito da saturação do gerador nos períodos transitório e subtransitório foi investigado e os resultados encontrados na modelagem através do método de Elementos Finitos foram comparados com os resultados informados pelo fabricante, fornecendo diferenças entre os parâmetros na ordem de 10%.

Além da referência [15], as referências [16], [17], [18], [19] e [20] mostram que a utilização de modelagem do gerador através do método de Elementos Finitos traz resultados satisfatórios com relação à determinação dos parâmetros da máquina, resultando erro percentual satisfatório em comparação aos dados reais dos geradores medidos em fábrica.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em 6 capítulos dispostos da seguinte maneira:

O capítulo 1 apresenta a introdução e a motivação que levaram ao estudo do fenômeno de Zeros Atrasados em unidades *offshore*. Além disso, traz também todo o levantamento bibliográfico utilizado na dissertação sobre o fenômeno de Zeros Atrasados e sobre a modelagem de geradores através do método de Elementos Finitos.

No capítulo 2 é apresentada uma introdução teórica sobre o fenômeno de Zeros Atrasados de forma a embasar o entendimento deste trabalho. Ainda são apresentadas características básicas de funcionamento de disjuntores a vácuo e uma breve comparação das características do fenômeno de Zeros Atrasados para sistema de potência e sistemas industriais isolados.

O capítulo 3 aborda a modelagem do gerador pelo método de Elementos Finitos, explicando as vantagens e desvantagens na utilização deste método. Além disso, este capítulo detalha como foi feita a modelagem, as aproximações consideradas e os resultados obtidos. É feita uma breve comparação dos parâmetros da máquina encontrado através do método em Elementos Finitos com os dados nominais do gerador, de forma a validar a modelagem. Ainda neste capítulo discute-se o efeito da saturação ao longo de um curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador inicialmente operando em vazio.

De posse de um modelo de gerador confiável, no capítulo 4 são apresentados resultados de uma série de simulações pelo método de Elementos Finitos, verificando a influência do fenômeno de Zeros Atrasados em diferentes condições operacionais da máquina, tais como: gerador em vazio, gerador com carga nominal, mudança do fator de potência, gerador alimentando cargas capacitivas, efeito da resistência do arco durante a abertura do gerador e efeito da abertura do primeiro polo do disjuntor.

Ainda no capítulo 4 são descritos resultados de análise do efeito de motores de indução ligados diretamente ao gerador e dos curtos-circuitos evolutivos. Para a análise de mais de uma máquina foi utilizado o software ATP (*Alternative Transients Program*).

De posse de todos os resultados do capítulo 4 e das considerações que implicam na ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados, uma planta real *offshore* é analisada no capítulo 5 através de simulações no ATP. São feitas avaliações de diversos cenários operacionais de forma a verificar, em várias condições possíveis, se o fenômeno de Zeros Atrasados pode ser um perigo para a operação da unidade.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, resumidos todos os resultados encontrados e incluídas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – O FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS

2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Conforme já introduzido no capítulo 1, o fenômeno de zeros atrasados ocorre devido à assimetria da corrente durante um curto-circuito, sendo agravado caso ocorra um decaimento relativamente maior da componente CA, durante o período transitório.

A figura 1 mostra a corrente de curto-circuito de uma fase sujeita ao fenômeno de Zeros Atrasados em um gerador operando a vazio. É possível observar na figura que a corrente de curto-circuito somente cruza o zero por volta de 83ms após a ocorrência do defeito para este caso específico.

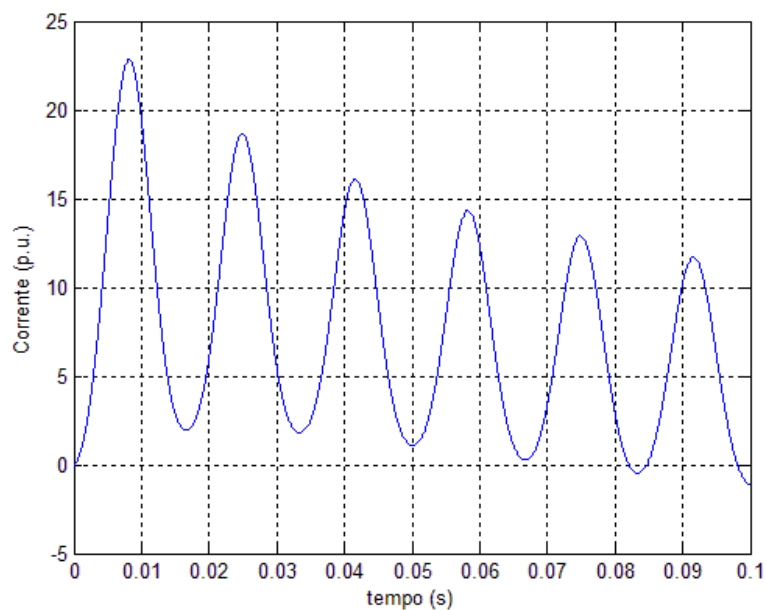


Figura 1: Corrente de curto-circuito com o fenômeno de zeros atrasados.

Para introduzir o fenômeno será feita uma abordagem simples, analisando um sistema RL simples [21], conforme mostrado na figura 2.

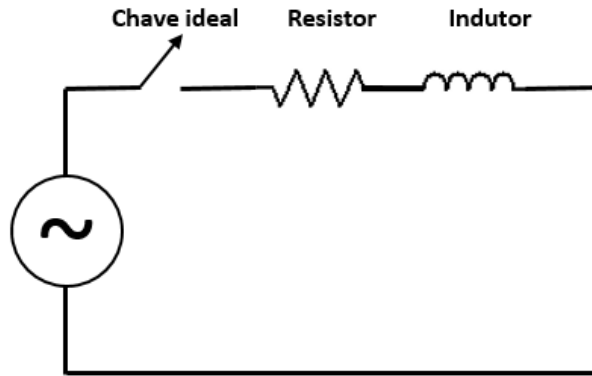


Figura 2: Circuito RL simples.

O sistema consiste em uma fonte senoidal ideal (com deslocamento angular θ), uma resistência (R) em série com uma indutância (L) e uma chave ideal que se fechará no tempo $t=0$. A equação diferencial resultante do circuito mostrado na figura 2 é a seguinte:

$$v(t) = V_0 \cdot \text{sen}(wt + \theta) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{d}{dt}i(t) \quad (2.1)$$

Cuja solução da equação pode ser considerada como a soma de duas expressões: componente em corrente contínua (i_{CC}) e componente em corrente alternada (i_{CA}):

$$i(t)_{CC} = I_0 \cdot \text{sen}(\arctan(X/R) - \theta) e^{\frac{-2\pi}{X/R}t} \quad (2.2)$$

$$i(t)_{CA} = I_0 \cdot \text{sen}(wt + \theta - \arctan(X/R)) \quad (2.3)$$

onde I_0 é o valor de pico da corrente simétrica e $X=wL$.

É possível observar que a expressão (2.2), conhecida como componente de corrente contínua (CC ou DC), é uma constante multiplicada por um valor exponencial negativo que decai ao longo do tempo de acordo com a relação X/R do circuito. Com o passar do tempo a componente CC tende para zero e somente a expressão (2.3), conhecida como componente de corrente alternada (CA ou AC), permanece no circuito.

Pela expressão (2.2) e considerando que $X \gg R$, então o $\arctan(X/R)$ tende a um valor próximo de 90° . Com isso observamos que para o valor da componente CC seja máximo, θ deve ser próximo a zero, ou seja, no momento do fechamento da chave a senoide da tensão da fonte está passando por zero. Caso θ seja $\pm 90^\circ$ a componente CC será zero e não ocorrerá assimetria no circuito.

A figura 3 mostra a componente CC, CA e a soma das duas componentes para θ igual a zero, máxima assimetria. A figura 4 mostra o efeito da componente CC com a variação do X/R, isto é, quanto maior o X/R do sistema maior será a componente CC e consequentemente maior a assimetria do circuito.

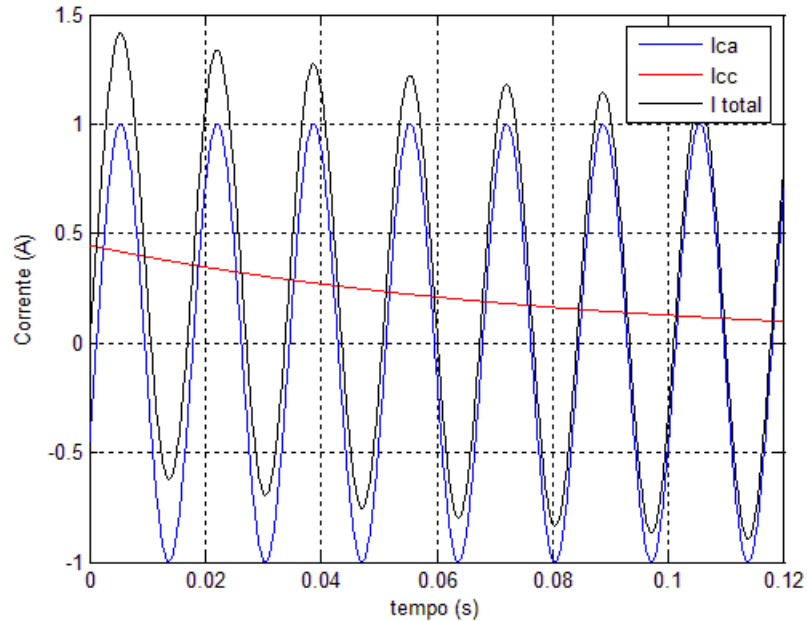


Figura 3: Correntes do circuito RL simples.

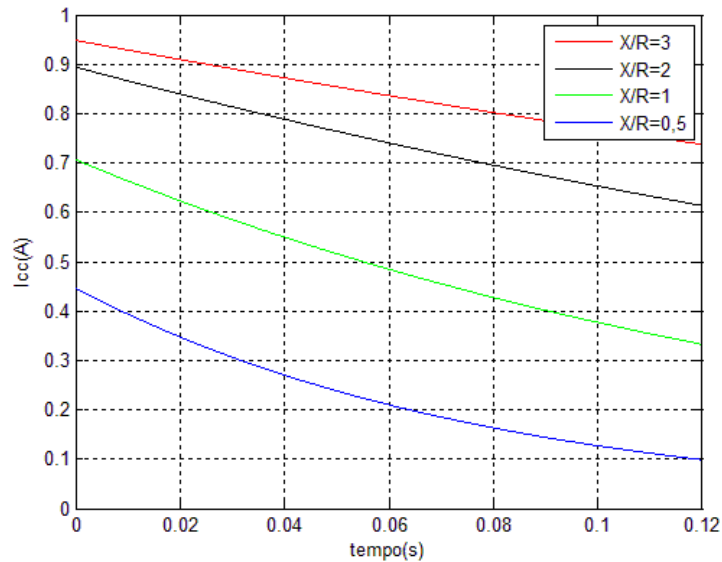


Figura 4: Componente CC da corrente para diferentes X/R.

Apesar do circuito da figura 2 ser muito simples, é possível verificar pelas figuras 3 e 4 que nos instantes iniciais de um fenômeno transitório, como um curto-circuito, a componente CC é de fundamental importância para as análises assimétricas e seu valor depende do X/R do circuito analisado.

Um caso real é bem mais complexo que o circuito simplificado da figura 2, que utiliza uma fonte ideal sem resistência nem reatância série. Ao analisar o mesmo fenômeno para um gerador síncrono, cuja reatância varia ao longo do tempo (subtransitório, transitório e regime permanente) [22], [23] e [24], o modelo matemático a ser considerado fica mais complexo.

Para quantificar o fenômeno transitório, para um gerador síncrono, será utilizada a abordagem feita em [3] para um curto-circuito trifásico nos terminais da máquina. Uma possível modelagem para analisar este tipo de fenômeno é através da transformação de Park, que considera os eixos direto (d) e em quadratura (q), conforme mostrado na figura 5.

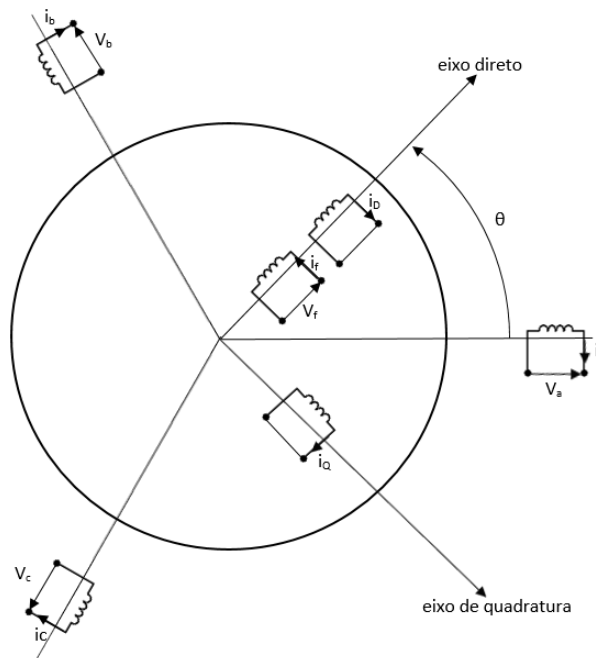


Figura 5: Representação do gerador através dos eixos d e q (Park), adaptado de [3].

Na figura 5, a , b e c são os enrolamentos de armadura, f é o enrolamento de campo, d e q são os eixos direto e em quadratura.

A partir dos modelos de Park é possível desenvolver uma expressão mais completa para a corrente do gerador para um curto-circuito em seus terminais, levando em consideração a variação da reatância da máquina ao longo do tempo [3]. As equações a seguir mostram o resultado no tempo da corrente de armadura na máquina no momento do curto-circuito para as três fases:

$$\begin{aligned}
I_a = & -\sqrt{2}V_{q0} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \cos(\omega t + \lambda) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(\lambda) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \lambda) \right\} \\
& + \sqrt{2}V_{d0} \left\{ - \left[\frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T''_q} \right] \text{sen}(\omega t + \lambda) \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(\lambda) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(2\omega t + \lambda) \right\} \\
& - \sqrt{2}I_{d0} \cos(\omega t + \lambda) - \sqrt{2}I_{q0} \text{sen}(\omega t + \lambda)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
I_b = & -\sqrt{2}V_{q0} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \cos(\omega t + \lambda - 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(\lambda - 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \lambda - 2\pi/3) \right\} \\
& + \sqrt{2}V_{d0} \left\{ - \left[\frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T''_q} \right] \text{sen}(\omega t + \lambda - 2\pi/3) \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(\lambda - 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(2\omega t + \lambda - 2\pi/3) \right\} \\
& - \sqrt{2}I_{d0} \cos(\omega t + \lambda - 2\pi/3) - \sqrt{2}I_{q0} \text{sen}(\omega t + \lambda - 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}
I_c = & -\sqrt{2}V_{q0} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \cos(\omega t + \lambda + 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(\lambda + 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \cos(2\omega t + \lambda + 2\pi/3) \right\} \\
& + \sqrt{2}V_{d0} \left\{ - \left[\frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-t/T''_q} \right] \text{sen}(\omega t + \lambda + 2\pi/3) \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(\lambda + 2\pi/3) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \text{sen}(2\omega t + \lambda + 2\pi/3) \right\} \\
& - \sqrt{2}I_{d0} \cos(\omega t + \lambda + 2\pi/3) - \sqrt{2}I_{q0} \text{sen}(\omega t + \lambda + 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

onde o índice 0 indica as condições pré-faltas, λ é o ângulo entre o eixo da fase a e o eixo d no instante da falta, T' e T'' são as constantes de tempo transitórias e

subtransitórias e x , x' e x'' são as reatâncias em regime permanente, transitória e subtransitória de cada eixo respectivamente.

Para λ igual a zero (senoide da tensão passando por zero) temos o valor de máxima assimetria para a fase A e as fases B e C ficam deslocadas de $\pm 120^\circ$. Para λ igual a $\pm 90^\circ$ (senoide da tensão passando por $\pm 90^\circ$) temos assimetria nula na fase A, mas mesmo assim existe assimetria nas outras fases. As figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, um curto-circuito trifásico franco em um gerador operando em vazio com λ igual a zero e 90° .

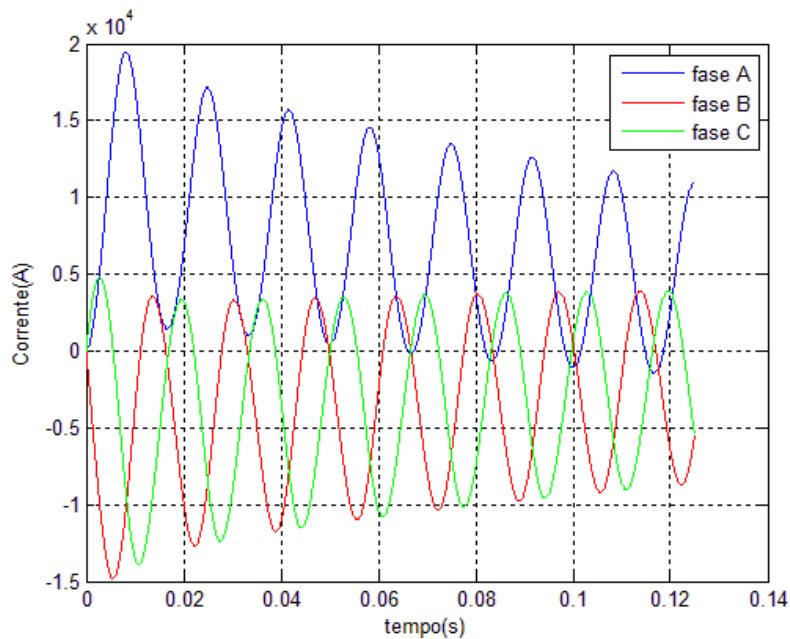


Figura 6: Correntes de armadura para máxima assimetria na fase A.

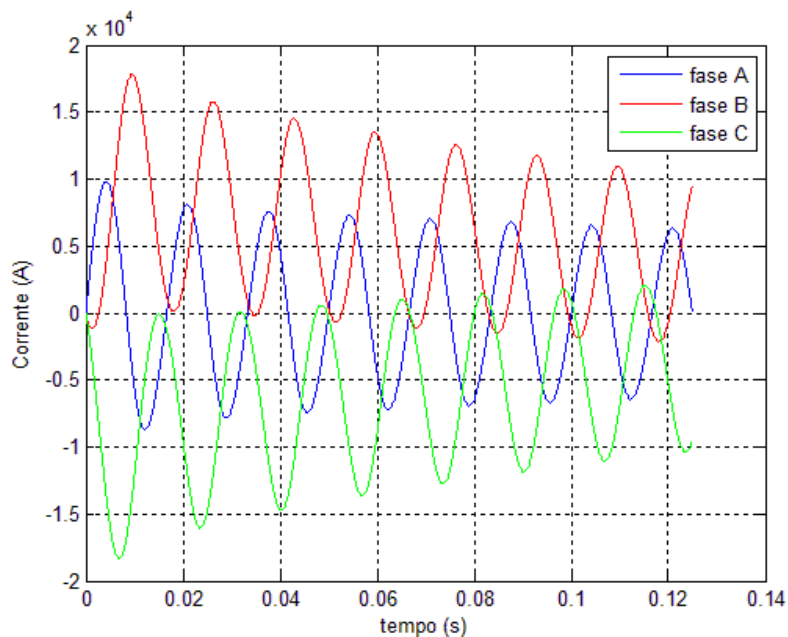


Figura 7: Correntes de armadura sem assimetria na fase A.

É possível observar pelas figuras 6 e 7 que independente do momento da aplicação do curto-circuito, sempre existirá assimetria em pelo menos duas das fases e sempre pelo menos umas das correntes passará pelo zero nos primeiros ciclos.

Na figura 6 podemos verificar que, para este gerador em particular, a corrente da fase A demora vários ciclos para cruzar por zero.

Para determinar o tempo em que a corrente da fase A, por exemplo, demora para cruzar o zero é necessário fazer $i_a=0$ na equação (2.4). Um resultado analítico para a equação não é possível de ser encontrado, sendo utilizadas assim algumas propostas em [3] para resolver a equação:

- i) O tempo (t) onde ocorre a passagem por zero da corrente da fase A é muito maior que T''_d e T''_q , desprezando esses termos na equação;
- ii) Considerando que o gerador em questão é uma máquina síncrona de polos lisos e que $x''_d=x''_q$, desprezam-se as componentes de 2º harmônico na equação.

Considerando as premissas acima e que o gerador está operando a vazio (pior condição para o fenômeno de Zero Atrasado, segundo [3]) e ainda que o instante em que ocorreu o curto-circuito foi no momento onde a tensão terminal da fase A esteja passando no ângulo zero ou 180º, temos a seguinte expressão para indicar o pior tempo para que a corrente passe por zero:

$$t_{max} = \frac{T'_d \cdot T_a}{T'_d - T_a} \ln \left[\frac{x'_d}{x''_d} \right] \quad (2.7)$$

onde:

$$T_a = \frac{X''_d + X''_q}{2\omega R_a} \quad T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T'_{d0} \quad (2.8)$$

A premissa de considerar o tempo em que a corrente passe por zero é muito maior que as constantes de tempo subtransitórias de eixo d e q pode ser considerado uma boa aproximação, mas nem em todos os projetos de máquinas síncronas de polos lisos o valor de x''_d é igual ao de x''_q , como pode ser verificado em [23] e, posteriormente, no modelo de gerador a ser utilizado nesta dissertação.

Em [3] é exemplificado que a expressão de t_{max} é uma boa aproximação para o gerador a vazio e apresenta algum erro para o gerador com carga.

A premissa adotada em [3] indica que a pior condição para que ocorra o fenômeno de Zeros Atrasados é para o gerador em vazio. Esta afirmativa é verdadeira

para sistemas de potência, mas pode não ser verdade para sistemas industriais onde existem as contribuições de motores de indução localizados próximos à geração [6].

Apesar das premissas adotadas em [3] não se mostrarem verdadeiras para qualquer tipo de máquina e sistema, o resultado encontrado de t_{\max} (equação (2.7)) indica uma sensibilidade de quais parâmetros do gerador influenciam na passagem da corrente por zero.

Pela equação simplificada de tempo máximo, T_a é proporcional ao fator X/R , ou seja, quanto maior esse parâmetro maior o tempo para a corrente passar por zero. Além disso, esta equação indica outra relação importante: a razão da reatância transitória com a subtransitória. Quando maior o valor da reatância transitória maior será o tempo para que a corrente de curto-circuito cruze o zero.

Os resultados encontrados através da transformada de Park foram obtidos para um curto-circuito trifásico franco em um gerador síncrono operando sem carga, simplificando a análise matemática.

Entretanto, os curtos-circuitos sequenciais podem ser mais severos quando comparados aos curtos-circuitos simultâneos e implicar em piores condições de assimetria e conseqüentemente um tempo maior para que a corrente de curto-circuito passe por zero, conforme pode ser verificado através de método analítico desenvolvido em [25] e no capítulo 4 deste trabalho.

2.2 EFEITO DE ZEROS ATRASADOS EM DISJUNTORES

Um dos grandes problemas do fenômeno de Zeros Atrasados é a preocupação com a integridade física do disjuntor do sistema. Quando o disjuntor percebe o curto-circuito e começa o processo de abertura, a corrente flui através dos seus contatos, chamados de pétalas, formando um arco interno as câmaras do disjuntor.

Dependendo da tecnologia do fabricante do disjuntor, no instante em que ocorre a abertura é criado um campo magnético que pode ser transversal (TMF – *Transverse Magnetic Field*) ou axial (AMF – *Axial Magnetic Field*). No disjuntor TMF o campo magnético é aplicado perpendicular ao fluxo da corrente e devido ao formato espiral dos contatos o arco interno roda ao longo da periferia dos contatos. No disjuntor AMF o campo magnético é no mesmo sentido do fluxo da corrente e o arco fica com um formato difuso [5].

A figura 8 mostra a diferença do campo magnético criado no instante da

separação dos contatos dos disjuntores para as tecnologias TMF e AMF.

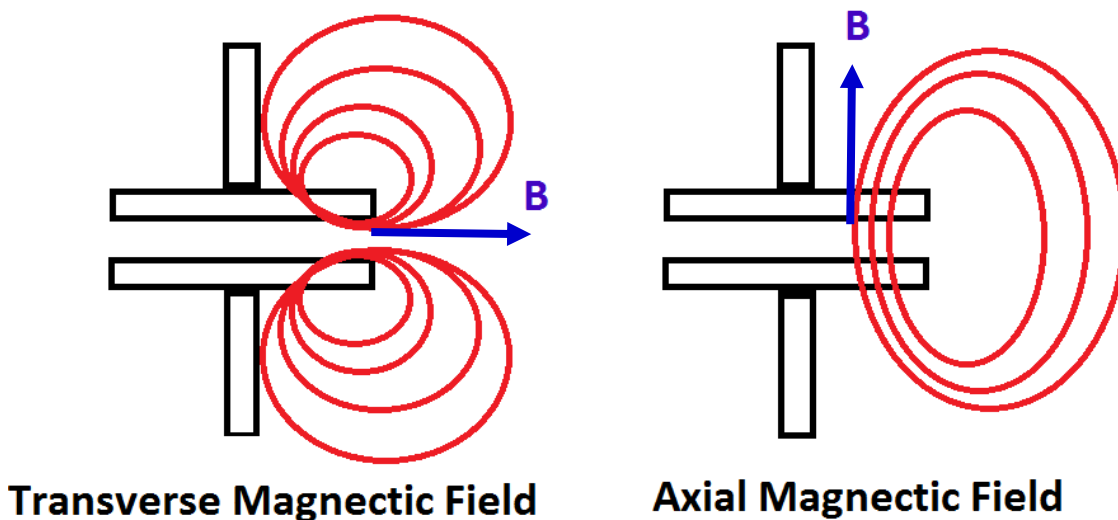


Figura 8: Comparação da densidade de campo magnético criado nas tecnologias de disjuntores TMF e AMF.

Independentemente da tecnologia do disjuntor, existe a preocupação de distribuir o arco pelos contatos minimizando o fenômeno de erosão. A magnitude da corrente vai decrescendo até que a corrente passe por zero [5].

Devido à característica indutiva da corrente de curto-circuito, ao abrir os contatos do disjuntor é gerado um arco interno a suas câmaras que somente se extinguirá após a corrente passar por zero.

Caso o fenômeno de Zeros Atrasados seja muito significativo, o arco se manterá por muito tempo dentro das câmaras do disjuntor e a energia acumulada pode chegar ao ponto de fazer o componente explodir, danificando os equipamentos elétricos do sistema.

O tempo que o disjuntor suporta o arco elétrico no interior das suas câmaras, sem se danificar, depende da tecnologia do fabricante. Em [5] é apresentado o resultado de teste em laboratório especializado de um disjuntor a vácuo onde o tempo entre a separação dos contatos até a corrente de curto-circuito da última fase cruzar o zero foi de 47ms, ou seja, o tempo em que o disjuntor ficou com o arco elétrico dentro das suas câmaras sem apresentar danos ao equipamento.

Para disjuntores a vácuo, no momento da separação dos contatos é criada uma tensão não-linear, cujo valor médio é da ordem de 100V a 150V para os do tipo TMF e 50V para os do tipo AMF [5]. A vantagem desse processo de abertura do disjuntor é que a impedância do arco elétrico formado é praticamente puramente

resistiva, ou seja, no momento que o disjuntor abre os contatos é inserida uma resistência de arco que faz com que o X/R do sistema caia e conseqüentemente a corrente passe mais rapidamente por zero.

O arco elétrico resistivo criado durante a separação dos contatos do disjuntor é não-linear, mas para exemplificar o efeito do arco para o fenômeno de Zeros Atrasados foi feita uma simulação simplificada em Matlab, onde foi plotado a corrente obtida pela equação 2.4 em função do tempo. Considerando que o disjuntor começa a separação dos contatos em 60ms após a ocorrência da falta, foi inserido na simulação uma resistência linear no circuito para contabilizar o efeito da criação da resistência do arco elétrico no instante de abertura dos contatos do disjuntor.

Este aumento constante da resistência não representa fisicamente a dinâmica do arco elétrico não-linear, mas é útil para visualizar qualitativamente o que acontece com a corrente de curto-circuito quando é inserida uma resistência durante a abertura dos contatos do disjuntor.

A figura 9 mostra o resultado desta simulação simplificada, onde o traço contínuo é a corrente de curto-circuito considerando a resistência do arco no momento da abertura do disjuntor (após 60ms) e o traço pontilhado mostra como estaria a corrente elétrica caso não existisse o arco no momento da abertura do disjuntor.

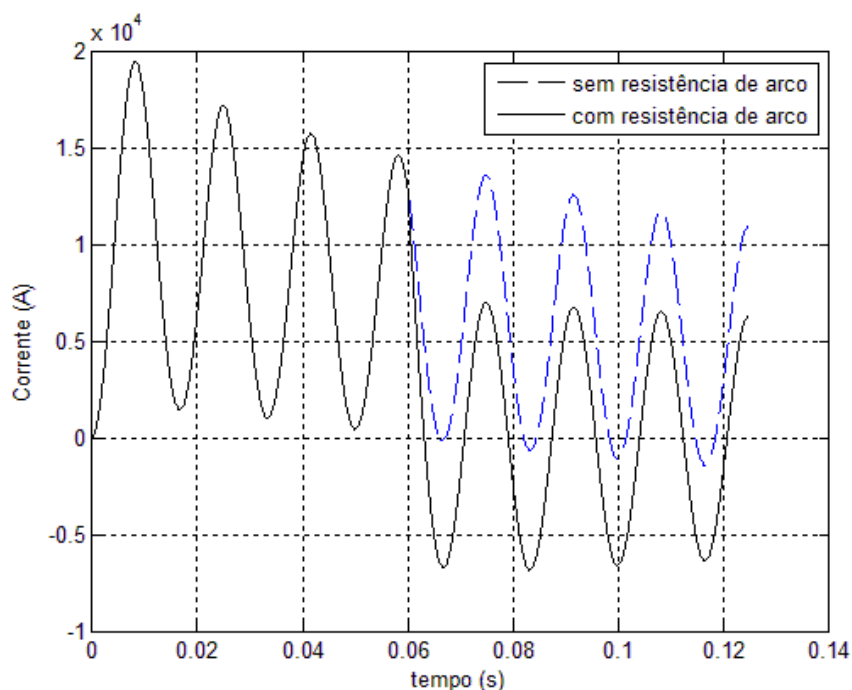


Figura 9: Efeito do arco elétrico no momento da abertura do disjuntor.

A figura 9 mostra uma simulação exagerada onde foi inserida uma resistência

muito superior aos valores típicos para disjuntores a vácuo. Para os disjuntores aplicados em níveis de curto-circuito de unidades *offshore* o valor dessa resistência inserida no instante de abertura do disjuntor não possui valor elevado, na ordem de 2 a 3 mΩ, podendo reduzir o tempo em que a corrente passe por zero em alguns ciclos, mas não é suficiente para acabar com o problema relacionado ao fenômeno de Zeros Atrasados, conforme será estudado nos capítulos 4 e 5 desta dissertação.

Uma importante característica do processo de abertura do disjuntor é que, devido ao deslocamento angular de $\pm 120^\circ$ entre as fases, sempre uma das fases passa por zero nos primeiros ciclos após a abertura do disjuntor, conforme pode ser visto nas figuras 6 e 7.

Ao ocorrer um curto-circuito no sistema, o relé é sensibilizado e envia o sinal de atuação do disjuntor trifásico. A mola do disjuntor faz com que o contato das três fases se abram simultaneamente, inserindo uma corrente de arco interna ao disjuntor. Devido ao deslocamento angular entre as fases pelo menos uma delas passará por zero nos primeiros ciclos após a abertura dos contatos e com isso tal fase se extinguirá. O curto-circuito, que a princípio era trifásico, passará a ser bifásico no momento em que a primeira fase se extingui e as correntes remanescentes das outras duas fases ficarão iguais, porém com sentido contrário.

Esse fenômeno em que o curto-circuito deixa de ser trifásico e passa a ser bifásico muda a dinâmica do sistema e influencia na componente de corrente contínua das outras fases, podendo reduzir ou aumentar o fenômeno de zeros atrasados dependendo da configuração do sistema e tipo de curto-circuito [3].

Esse fenômeno será estudado durante as simulações dos capítulos 4 e 5 desta dissertação.

2.3 DIFERENÇAS BÁSICAS DO FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA E SISTEMAS INDUSTRIAIS ISOLADOS

No caso específico de sistemas de potência temos tipicamente uma geração de grande porte seguida de transformadores elevadores e com linhas de transmissão de grandes comprimentos [3], ainda mais no Brasil que é um país de dimensões continentais.

Para o fenômeno de Zeros Atrasados nesses sistemas, os curtos-circuitos após

o transformador não se mostram um problema, pois existem diversas reatâncias e resistências que fazem o amortecimento do circuito e conseqüentemente a passagem da corrente por zero.

Em sistemas de potência o pior cenário para o fenômeno de Zeros Atrasados é quando o curto-circuito ocorre nos terminais do gerador.

Nestes sistemas normalmente são utilizados disjuntores de grande porte a SF6, específicos para geradores, que são testados pela norma IEEE Std C37.013 [2], que prevê o fenômeno de Zeros Atrasados.

Em sistemas industriais isolados com geração própria, que é o caso de plataformas de produção de petróleo, não existe a figura do transformador elevador, além de existirem motores de indução de grande porte ligados muito próximos à geração principal.

O grande problema dos motores de indução para o fenômeno de Zeros Atrasados é que durante a falta o motor age como se fosse um gerador contribuindo para o curto-circuito e posteriormente no período transitório a sua contribuição cai consideravelmente. À medida que o motor desacelera, ele vai ficando fora de fase com o sistema alimentador e a frequência da corrente gerada pelos motores cai abaixo da frequência do gerador [3].

Pela equação 2.7 foi inferido que quanto maior a reatância transitória do sistema (menor o curto-circuito transitório) maior é o tempo para que a corrente cruze por zero. Portanto devido às características físicas do motor de indução, sistemas com a configuração de grandes cargas motóricas próximas à geração podem implicar em piores condições para o fenômeno de Zeros Atrasados.

Devido à limitação de espaço físico em unidades industriais é muito difícil a aplicação de disjuntores projetados para abrir contribuições de geradores, principalmente em unidades *offshore*. O que é muito comum em plantas industriais com limitação de espaço é a utilização de disjuntores de distribuição para aplicações de proteção de geradores.

A tabela 1 mostra uma breve comparação entre disjuntor de gerador e disjuntores de distribuição [7].

Tabela 1: Comparação entre disjuntores de gerador e disjuntores de distribuição [7].

	Disjuntor de gerador	Disjuntor de distribuição
Norma de referência	IEEE C37.013 (1997)	IEEE C37.04 (1999)
Corrente nominal (A)	6300 – 20000	1200 – 3000
Tempo de abertura (ms)	67 - 100	50 - 83
Típicas constantes de tempo (ms)	133 (X/R = 50)	45 (X/R=17)
%CC para mínima separação dos contatos	75%	43%
RRRV (rated of rise of recovery voltage)	3,5kV/μs	0,33 kV/μs
Número de operações com carga	50	500
Número de operações sem carga	1000	5 -10000
Zeros Atrasados	Previsto em norma	Não previsto de ocorrer

Pela análise da tabela é possível observar algumas características em que o disjuntor de gerador possui vantagens em comparação aos disjuntores de distribuição:

- Os tempos de abertura de disjuntores de distribuição são menores, ou seja, a componente CC do sistema ainda pode estar com valor elevado no momento da abertura;
- Os disjuntores de gerador são projetados para X/R maiores, implicando que eles suportam uma componente CC superior aos disjuntores de distribuição.

Interessante destacar também que as normas para disjuntores de distribuição não preveem que ocorra o fenômeno de Zeros Atrasados, o que não necessariamente é verdade para todos os sistemas.

Apesar dos disjuntores de distribuição não serem apropriados para o uso de proteção de geradores eles são amplamente utilizados e não é comum encontrar relatos de problemas operacionais com a sua utilização [7].

CAPÍTULO 3 – A MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

O método de Elementos Finitos é um método de solução numérico que utiliza as equações do eletromagnetismo para fazer análises com elevada precisão. É uma ferramenta robusta para modelagem de equipamentos elétricos.

A grande vantagem em utilizar este método é que, de posse de toda a geometria e materiais da máquina, é possível descrever o comportamento real da máquina com certa precisão, sem a necessidade de utilizar os modelos matemáticos convencionais.

Um ponto superior na abordagem pelo método de Elementos Finitos é a simulação do efeito da saturação, por exemplo. O efeito da mudança da saturação da máquina no momento do curto-circuito é difícil de ser considerado nos modelos matemáticos convencionais.

O software utilizado nesta dissertação para o cálculo de elementos finitos é o Ansys Eletromagnético. O programa possui vários outros módulos com diversas finalidades, mas para este trabalho de dissertação foram utilizados somente dois módulos: RMXprt e Maxwell.

No RMXprt são inseridos todos os dados construtivos da máquina, sendo feita uma análise algébrica na qual é possível obter resultados preliminares do gerador modelado.

O Maxwell importa os dados do RMXprt e faz a análise pelo método de Elementos Finitos, usando elementos tetraédricos e tamanho da malha auto-adaptativa. É possível obter diversos resultados tais como: linhas de fluxo, campos magnéticos, gráfico de tensão, correntes, torque, além do comportamento transitório da máquina, que será utilizado para o cálculo das reatâncias do gerador.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO GERADOR

O gerador considerado nesta dissertação é uma máquina síncrona utilizada em plataformas de produção de petróleo, acionado por uma turbina aeroderivada bicomcombustível: diesel e gás. Se considera que no início da produção ainda não foram retirados o óleo e o gás do poço e a turbina funciona com diesel. À medida que a

unidade começa a entrar em operação o próprio gás retirado no processo de extração do óleo é utilizado para alimentar a turbina.

Por questões de eficiência, a velocidade da turbina é superior à velocidade síncrona do gerador, portanto existe uma caixa redutora entre o gerador e a turbina para compatibilizar a velocidade de rotação.

Por se tratar de uma unidade *offshore*, onde o espaço é reduzido e a logística é dificultada, o gerador utiliza o sistema de excitação *Brushless* com imã permanente (PMG), reduzindo a manutenção da máquina em comparação à excitação estática com escovas.

Os dados nominais básicos do gerador fornecido pela empresa Weg estão resumidos na tabela 2.

Tabela 2: Dados nominais do gerador fornecido pela Weg.

Potência (S_n)	31250 kVA	Excitação	Brushless com PMG
Tensão (V_n)	13800 V	Enrolamento amortecedor	sim
Corrente (I_n)	1307A	Classe de isolamento do estator	F
Conexão do Estator	Y	Elevação de temperatura	B
Frequência (f_n)	60Hz	Grau de Proteção	IP56W
Fator de Potência ($\cos\phi$)	0,8 ind	Refrigeração	IC81W
Velocidade (n)	1800 rpm	Peso	56000kg
Quantidade de polos	4	Inércia do Rotor	2525 kgm ²

Apesar de o gerador possuir uma potência nominal aparente de 31,25MVA, a turbina a gás foi construída com potência máxima de 25MW, limitando a potência ativa de saída do gerador.

O método de refrigeração do gerador (IC81W) é através de um trocador de calor a base de água, cuja temperatura de entrada da água é de 32°C.

O trocador de calor fica localizado acima do gerador, portanto o ar quente do rotor e estator sobe e é refrigerado no trocador de calor que conseqüentemente resfria o gerador por convecção.

A figura 10 mostra um corte do gerador modelado no RMXprt, com todas as dimensões e tamanhos de ranhuras idênticos ao gerador original, destacando o estator em verde e o rotor em azul.

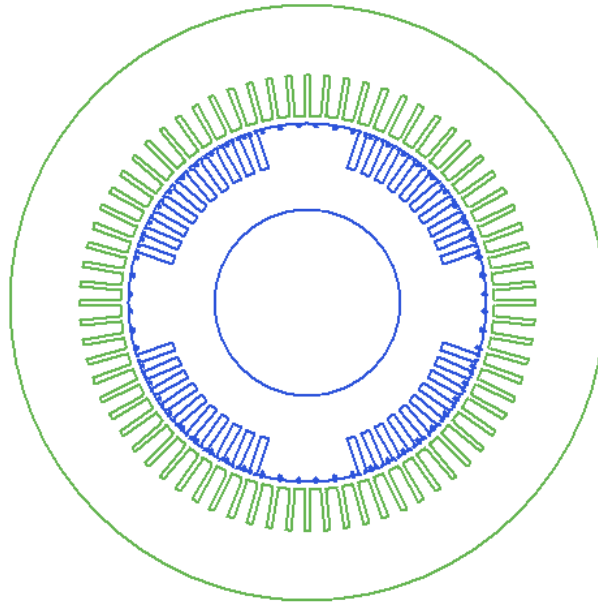


Figura 10: Corte transversal do gerador modelado pelo método de Elementos Finitos.

O RMxprt não utiliza o método de Elementos Finitos, fazendo uma análise das características da máquina a partir dos seus dados construtivos. Mesmo sem aprofundar no cálculo pelo método de Elementos Finitos é possível obter informações relevantes do gerador pelo RMxprt, tais como: curva em vazio, curva de curto-circuito, curva V, curva potência ângulo, eficiência, etc.

3.2 REPRESENTAÇÃO DO ESTATOR

O estator da máquina é laminado com chapas de aço, construído com bobinado trifásico em camada dupla imbricado e passo 1:16. A figura 11 mostra parte do esquema de ligação das bobinas do estator, divididas em 72 ranhuras. A geometria exata de todas as ranhuras, assim como o tamanho do estator, foram implementadas no RMxprt.

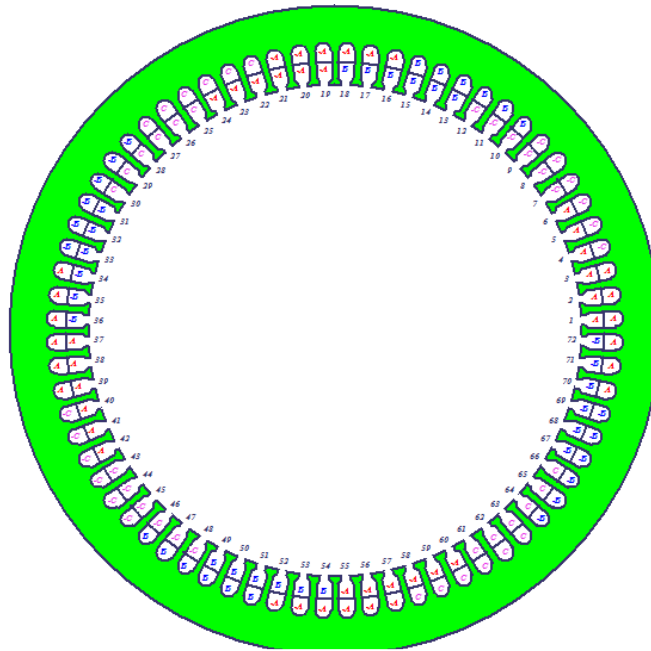


Figura 11: Montagem dos enrolamentos de armadura nas ranhuras do estator.

O estator do gerador possui espaçamentos ao longo do seu comprimento com objetivo de permitir a passagem do ar e conseqüentemente fazer a refrigeração da máquina. A modelagem correta desses canais de ventilação é importante, pois modifica a curva de saturação da máquina [26]. A figura 12 mostra a comparação da curva em vazio do gerador com e sem os canais de ventilação modelados.

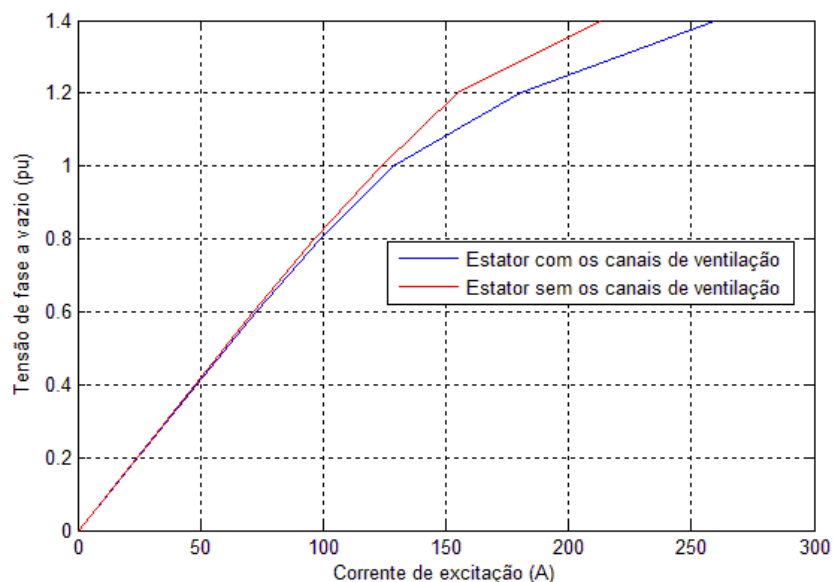


Figura 12: Comparação da Curva em Vazio do Gerador com e sem os canais de ventilação do estator.

Como não foi fornecida a curva de magnetização $B \times H$ real do aço usado no estator, foi utilizada uma curva real [28] e adaptada de acordo com a curva em vazio teórica de projeto fornecida pela empresa Weg.

A figura 13 mostra a curva BxH utilizada na modelagem através do método por Elementos Finitos.

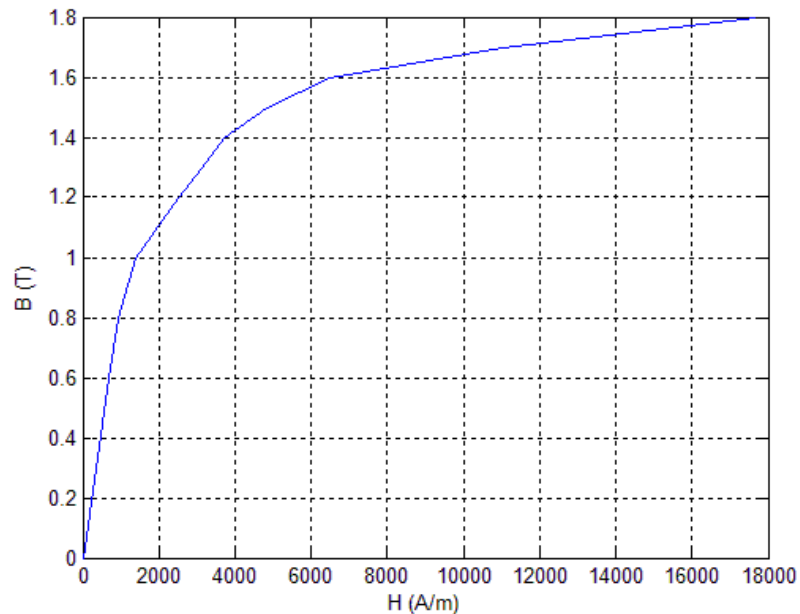


Figura 13: Curva BxH adaptada na modelagem pelo método de Elementos Finitos.

Cabe ressaltar que a curva BxH utilizada foi modificada de forma que a simulação do gerador pelo método de Elementos Finitos ficasse o mais próximo possível das curvas de projeto fornecidas pelo fabricante, podendo não ter relação física com o aço real utilizado no gerador.

Pela figura 13 podemos observar que o efeito da saturação do material começa a ocorrer quando a densidade de campo magnético (B) está por volta de 1,2 T.

3.3 REPRESENTAÇÃO DO ROTOR

O rotor do gerador é de polos lisos, feito do mesmo aço do estator, laminado, camada única, quatro polos e com barramento amortecedor de cobre. A figura 14 mostra a geometria modelada do rotor no RMxpert, idêntica ao rotor original.

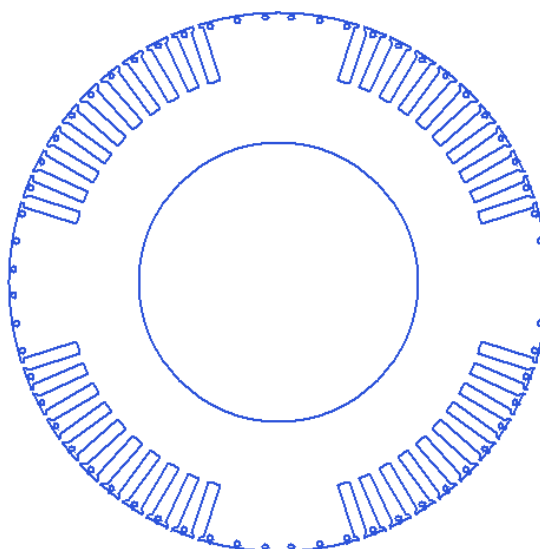


Figura 14: Modelagem do rotor no RMxprt.

O programa não possibilita a modelagem dos canais de ventilação do rotor no RMxprt. Tal limitação pode influenciar nas características magnéticas do gerador conforme apresentado na figura 12 e influenciar nas reatâncias da máquina.

3.4 VALIDAÇÃO DA MODELAGEM

Para modelar corretamente o rotor, com todos os detalhes que podem influenciar no fluxo magnético, tais como os canais de ventilação, seria necessário utilizar uma modelagem 3D do Maxwell e modificar a geometria manualmente, necessitando de informações adicionais da geometria do gerador além de um gasto computacional muito elevado.

A figura 15 mostra uma imagem do modelo 3D criado pelo Maxwell pelo método de Elementos Finitos.

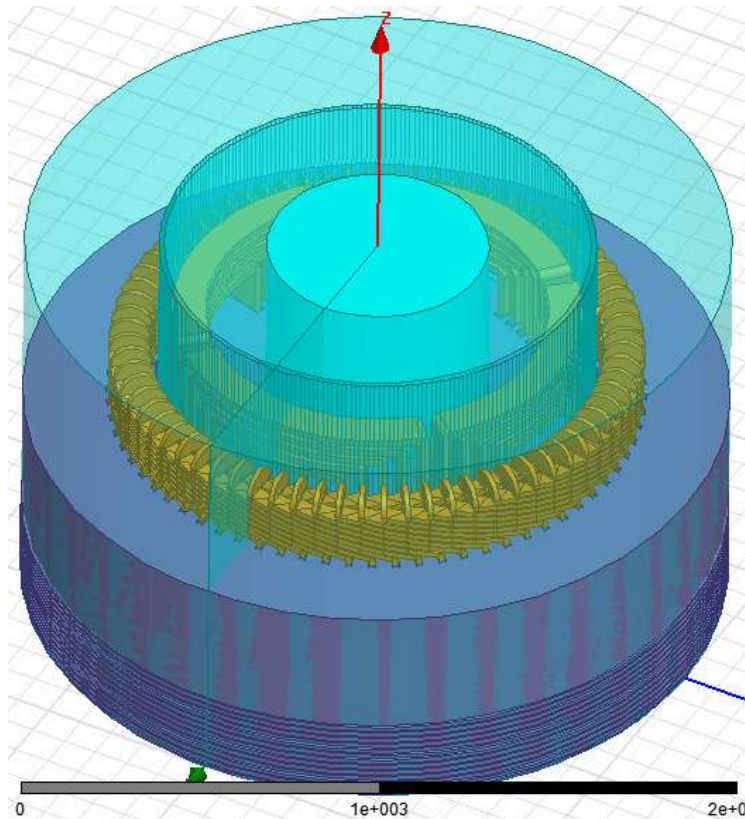


Figura 15: Modelo 3D do gerador feito no Maxwell.

Por necessitar de informações adicionais não disponíveis, além de um elevado processamento computacional, não será utilizada a abordagem em 3D, sendo feito o método de Elementos Finitos em 2D, conforme é normalmente encontrado na literatura técnica [15], [16], [17], [18], [19] e [20].

Ao importar os dados construtivos do RMXprt para o Maxwell 2D, o software analisa a simetria do gerador e cria o modelo pelo método de Elementos Finitos na menor geometria possível, visando otimizar o trabalho computacional. A figura 16 mostra que para o gerador de 4 polos o software Maxwell definiu uma geometria referente a $\frac{1}{4}$ da máquina.

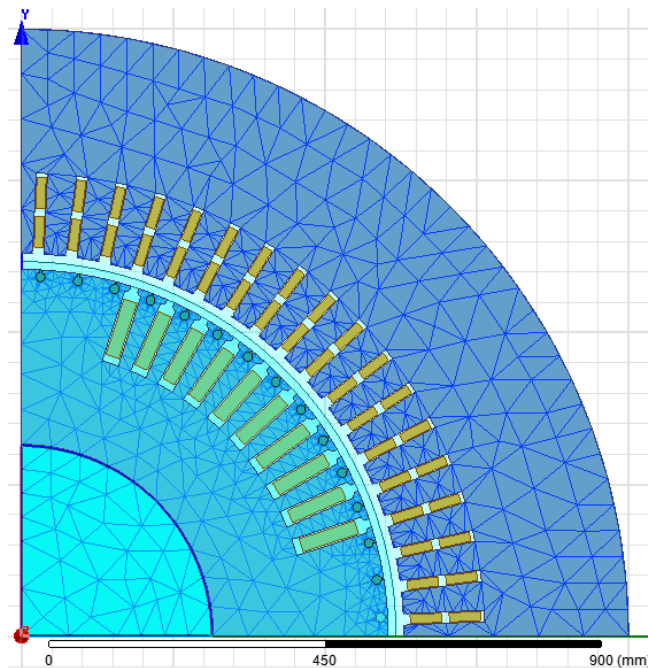


Figura 16: Modelagem do Gerador no Maxwell 2D.

Uma desvantagem no método por Elementos Finitos, além do gasto computacional elevado, é a necessidade de informações geométricas e de materiais do equipamento (curvas de saturação). Uma medida errada ou uma curva de saturação imprecisa pode influenciar nos parâmetros da máquina.

Foram utilizados na modelagem do gerador todos os dados geométricos e curvas de projeto fornecidos pelo fabricante. Os dados complementares necessários foram estimados.

Segundo dados do fabricante da máquina, a elevação de temperatura do gerador é de 69,2 °C. Para definir a temperatura de operação do gerador foi adotada uma temperatura ambiente média de 32°C (temperatura da água do trocador de calor), resultando em uma temperatura de operação da máquina de aproximadamente 100°C.

Esta definição de temperatura de operação é importante, pois a resistência dos enrolamentos do gerador muda com a temperatura de operação da máquina. A resistência dos enrolamentos é fator determinante no decaimento da componente CC durante o evento transitório sendo de fundamental importância para o estudo do fenômeno de Zeros Atrasados, conforme apresentado no capítulo 2.

O método de Elementos Finitos necessita que seja definida uma condição de contorno. Normalmente para análise de geradores e motores, é definida a extremidade do estator como condição de contorno, sendo adotado o valor do Vetor Potencial Magnético (\vec{A}) como zero nesta extremidade [29].

Ao reduzir a geometria do problema, o programa faz uma interpolação para definir o valor da condição de contorno na geometria reduzida, conforme mostra a figura 16.

Tal figura também apresenta a divisão da malha triangular utilizada no método de Elementos Finitos. Observa-se que o tamanho do elemento diminui nas regiões onde é necessário um maior detalhamento dos campos envolvidos na análise.

A modelagem real e precisa do gerador necessitaria de um trabalho conjunto com o fabricante para verificar com precisão os dados geométricos e características de saturação. A limitação de modelar os canais de ventilação do rotor também implica em um pequeno erro no resultado da simulação, conforme pode ser verificado na figura 17.

Para validar o resultado encontrado através da modelagem por Elementos Finitos serão apresentadas comparações entre os dados disponíveis do projeto da máquina e os dados simulados.

A figura 17 mostra a curva em vazio retirada do software de Elementos Finitos sendo feita uma comparação com relação à curva de projeto da máquina fornecida pelo fabricante.

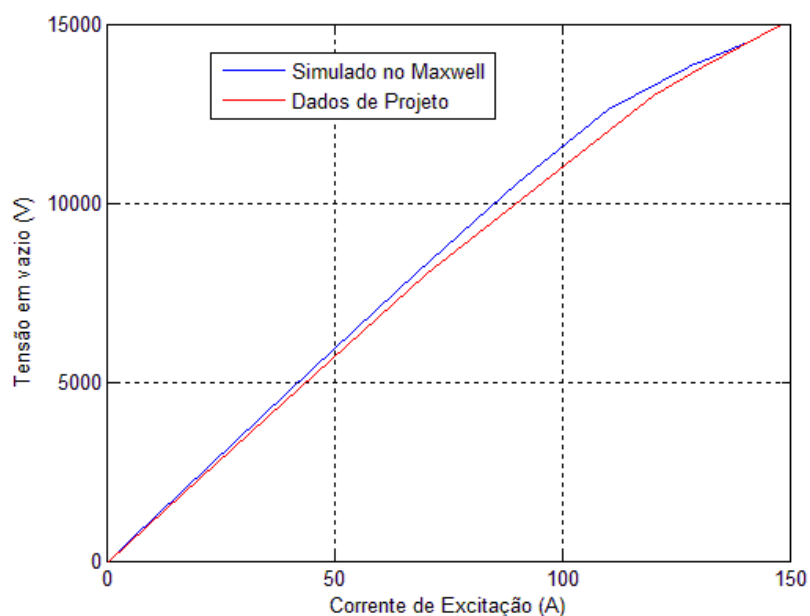


Figura 17: Comparação da Curva em Vazio de projeto e a simulada no Maxwell.

Pela figura 17 é possível notar que o comportamento em vazio do gerador simulado pelo método de Elementos Finitos está muito próximo da curva em vazio fornecida pelo fabricante.

A corrente de excitação que fornece tensão nominal (13800V) quando os

terminais do gerador estão a vazio, obtido na simulação pelo software Maxwell, foi de 127,8A.

A figura 18 mostra a comparação da curva de curto-circuito informada pelo fabricante no projeto da máquina e a calculada no software pelo método de Elementos Finitos (somente foram utilizados dois pontos de simulação devido a característica linear da curva).

Pela figura 18 observamos que a simulação pelo método de Elementos Finitos está representando fielmente o comportamento da curva de curto-circuito da máquina em comparação aos dados de projeto.

O valor da corrente de excitação calculada no software pelo método de Elementos Finitos que fornece corrente nominal de 1307A na curva em vazio é de 210,8A.

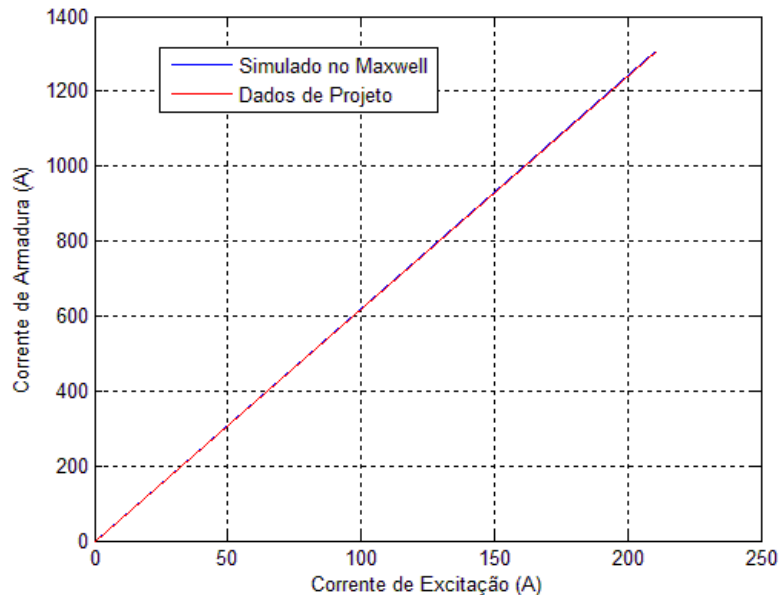


Figura 18: Comparação da curva de Curto-Circuito de projeto e a simulada no Maxwell.

Das curvas em vazio e em curto-circuito é possível se obter a relação de curto-circuito (R_{cc}) pela seguinte expressão [22]:

$$R_{cc} = \frac{I_{exc_vazio}}{I_{exc_curto}} \quad (3.1)$$

onde: I_{exc_vazio} é a corrente de excitação que fornece tensão nominal na curva em vazio (considerando a saturação) e I_{exc_curto} é a corrente de excitação que fornece corrente nominal na curva de curto-circuito.

Utilizando os valores encontrados na simulação por elementos finitos, obtemos

a seguinte relação de curto-circuito:

$$R_{cc} = \frac{127,8}{210,8} = 0,606262 \quad (3.2)$$

O inverso da relação de curto-circuito fornece o valor da reatância síncrona saturada em p.u. [22]. Pelo valor de R_{cc} encontrado temos o seguinte valor para a reatância em regime permanente em p.u.:

$$x_s = \frac{1}{R_{cc}} = \frac{1}{0,606262} = 1,6494 \text{ pu} \quad (3.3)$$

Através da modelagem pelo método de Elementos Finitos é possível levantar os parâmetros transitórios e em regime permanente da máquina. A tabela a seguir resume os parâmetros do gerador obtidos na modelagem analítica através do RMXprt e confirmados pelo método de Elementos Finitos no Maxwell.

Tabela 3: Parâmetros do gerador calculado pelo método de Elementos Finitos em P.U.

R_a	0,003148	x''_d	0,1441
x_d	1,6494	x''_q	0,1850
x_q	1,6453	$T_{d0} \text{ (s)}$	3,48
x_l	0,06	$T_{q0} \text{ (s)}$	1,74
x'_d	0,2451	$T''_{d0} \text{ (s)}$	0,01602
x'_q	0,2451	$T''_{q0} \text{ (s)}$	0,02353

É possível observar que os valores de reatância obtidos na simulação estão de acordo com o que normalmente é encontrado na literatura para geradores de polos lisos deste porte [23].

3.5 EFEITO DA SATURAÇÃO DO GERADOR

Uma grande vantagem na utilização do método de Elementos Finitos em comparação à modelagem analítica de Park, apresentada no capítulo 2, é o efeito da variação da saturação da máquina.

Para descrever o correto comportamento da máquina ao longo de um fenômeno de curto-circuito é necessário levar em consideração que a máquina pode estar saturada, ou não, e esse efeito da saturação vai se alterando ao longo do curto-circuito.

Através da figura 13 observamos que pela curva de saturação modificada, utilizada na simulação pelo método de Elementos Finitos, o efeito da saturação

começa com aproximadamente 1,2 T.

A figura 19 mostra que o método de Elementos Finitos é capaz de contabilizar a variação da saturação da máquina ao longo do tempo para um curto-circuito trifásico franco no gerador a vazio.

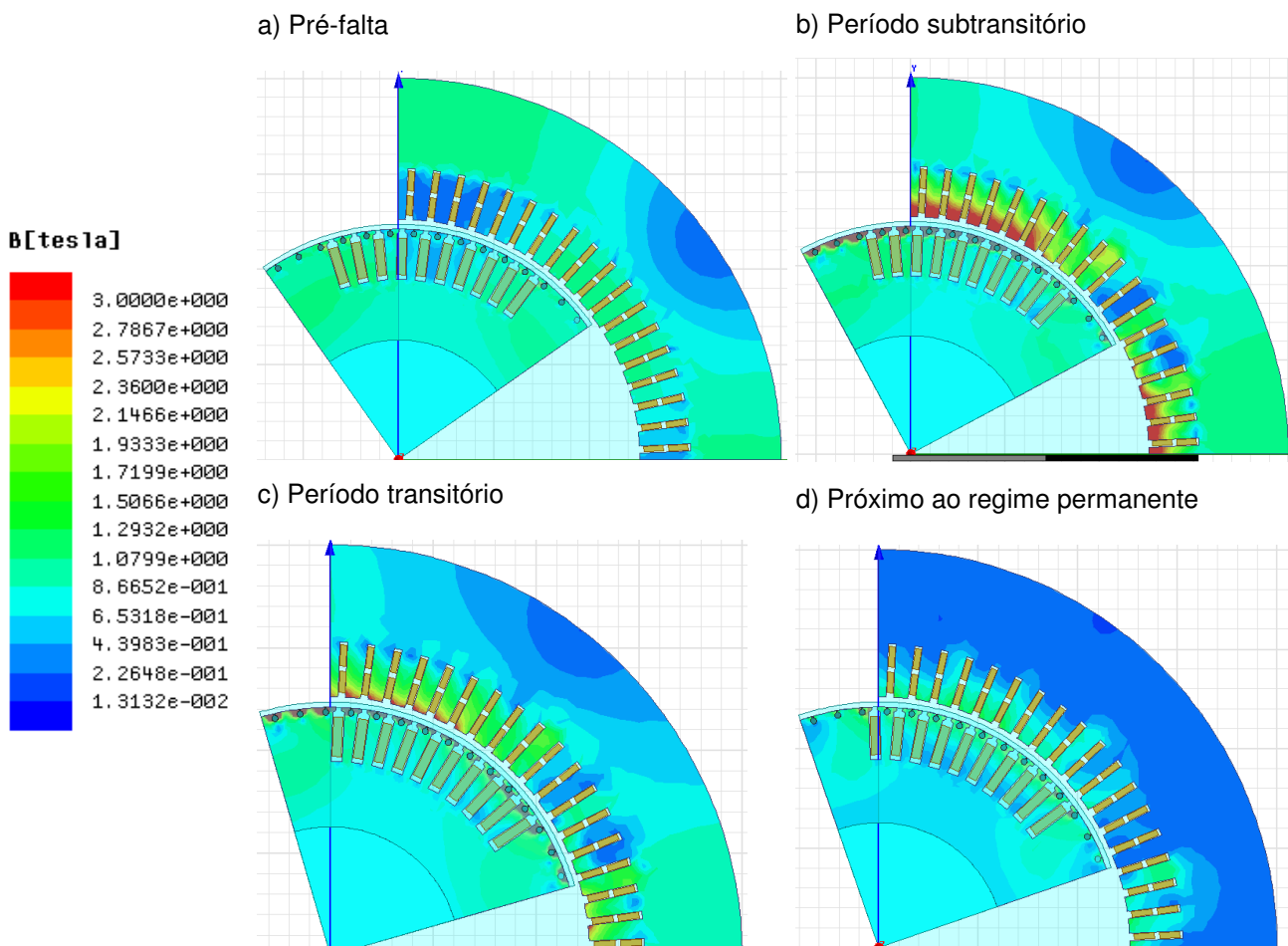


Figura 19: Comparação do efeito de saturação da máquina durante o curto-circuito.

Pela figura 19 observamos que o método de Elementos Finitos calcula a densidade de fluxo magnético da máquina equivalente ao comportamento de uma máquina real, ou seja, existem trechos onde o aço está saturado e outros trechos onde o aço está com um campo bem baixo. O efeito não-uniforme da distribuição de campo é facilmente visível nas chapas do estator.

É possível concluir que durante a operação normal do gerador, figura 19 a), o gerador está operando em média com a densidade de campo de 1,2T, ou seja, no joelho da curva de saturação.

Ao ocorrer o curto-circuito nos terminais do gerador é possível notar a saturação da máquina aumente consideravelmente em alguns trechos, principalmente

próximo às bobinas estatóricas, figura 19 b).

Após o período subtransitório, a densidade de campo magnético tende a reduzir, figura 19 c) e finalmente quando é alcançado o regime permanente a máquina tende a ficar com um campo relativamente muito baixo, ou seja, não saturada.

Concluimos pela figura 19 que o método de Elementos Fintos é capaz de fazer simulações transitórias da máquina simulando a variação de fluxo magnético ao longo do tempo, equivalente a uma máquina real.

As utilizações das impedâncias medidas em fábrica nos modelos tradicionais, como as de Park, naturalmente representam esta variação de saturação na máquina ao longo do curto-circuito. Entretanto, a medição em fábrica das reatâncias do gerador é difícil de ser obtida nas condições nominais da máquina e, muitas vezes, os dados são extrapolados ou até mesmos realizados com tensão reduzida, implicando em uma medição de reatância não saturada, o que não necessariamente é a condição operacional pré-falta, conforme mostrado na figura 19.

Como para a análise do fenômeno de Zeros Atrasados o valor das reatâncias subtransitórias e transitórias são de fundamental importância, a correta utilização das reatâncias saturadas e não saturadas podem implicar em alguma diferença no resultado.

Devido à dificuldade de medições dos parâmetros das máquinas em fábrica, o método de Elementos Finitos se mostra uma boa opção quando é necessária uma análise criteriosa dos fenômenos transitórios, pois uma vez bem modelado o comportamento da simulação é equivalente ao comportamento real da máquina.

CAPÍTULO 4 – CENÁRIOS EM QUE PODEM OCORRER O FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS

De posse de um modelo de gerador feito pelo método de Elementos Finitos, é possível realizar simulações computacionais para verificar e analisar o que influencia no fenômeno de Zeros Atrasados e confrontar com o que está estabelecido na literatura técnica.

Este capítulo estuda vários cenários de forma a evidenciar a influência de diversas condições operacionais no fenômeno de Zeros Atrasados.

Foram realizados os seguintes testes organizados em 8 cenários:

- Cenário 01 – Gerador a vazio;
- Cenário 02 – Gerador com carregamento nominal indutivo;
- Cenário 03 – Gerador com carregamento nominal capacitivo;
- Cenário 04 – Variação do Fator de Potência;
- Cenário 05 – Resistência de arco em disjuntores a vácuo;
- Cenário 06 – Efeito da abertura da primeira fase;
- Cenário 07 – Contribuição do motor de indução;
- Cenário 08 – Tipos de curto-circuito.

É fato que a confirmação da existência ou não de problemas no sistema elétrico devido ao fenômeno de Zeros Atrasados é uma combinação de diversas condições, tais como: momento da aplicação do curto-circuito, carregamento do sistema, efeito da abertura do disjuntor, etc.

Com intuito de entender melhor o problema, as características que podem influenciar o fenômeno de Zeros Atrasados foram estudadas individualmente e posteriormente, no capítulo 5, foi feita uma análise global do fenômeno em uma planta real *offshore*.

Inicialmente foram considerados para os cenários iniciais curtos-circuitos trifásicos sem impedância de falta e somente no cenário 8 foram explorados os diversos tipos de curto-circuito e sua aplicação no fenômeno de Zeros Atrasados.

Como não foi modelada a dinâmica da turbina nas simulações, foi considerada a velocidade do gerador como constante em todos os casos.

CENÁRIO 01 – GERADOR A VAZIO

Nas principais referências sobre Zeros Atrasados, principalmente em referências voltadas para sistemas de potência, é comum ser considerada a pior condição para o fenômeno a condição operacional do gerador a vazio [3].

Para simular um curto-circuito no software Ansys Maxwell foi utilizado o recurso *Circuit Editor*. Nesta ferramenta do programa é possível inserir chaves controladas para escolher o melhor momento para a aplicação do curto-circuito.

A figura 20 mostra como foi feito o controle do curto-circuito para o cenário 1.

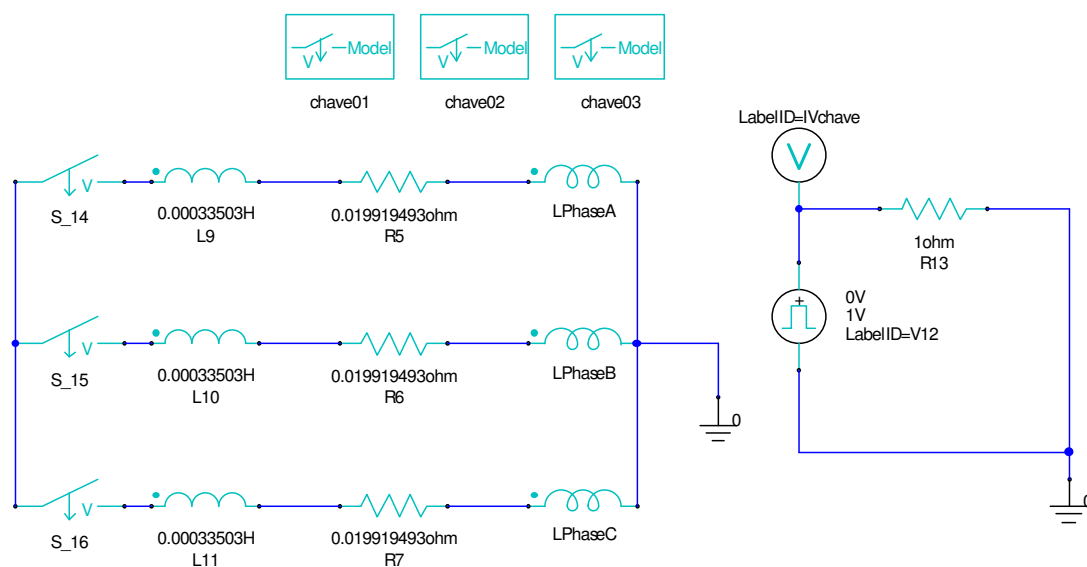


Figura 20: Circuit Editor para o cenário 1.

As bobinas LPhase A, B e C na figura 20 representam os enrolamentos do estator. Como o Maxwell 2D não simula a cabeça de bobina do estator do gerador, é necessário inserir a sua indutância no Circuit Editor (0,335mH) e a resistência de armadura (0,0199 Ω) em série com a bobina.

Vale ressaltar que a resistência de armadura deve estar de acordo com a temperatura de operação do estator do gerador (por volta de 100°C) para descrever mais fielmente possível o decaimento da componente CC do curto-circuito.

O circuito com a onda quadrada à direita é utilizado para controlar o fechamento das chaves S_14, S_15 e S_16. Para este cenário, estas chaves serão fechadas simultaneamente, simulando um curto-circuito trifásico franco.

O software sempre inicializa a simulação considerando a velocidade nominal

da máquina constante e as correntes de armadura com valor zero, portanto é necessário esperar um determinado tempo para ter certeza de que o gerador entrou em regime permanente antes de aplicar qualquer tipo de curto-circuito. O tempo de espera para o gerador entrar em regime depende do tipo de carga do gerador.

Foi feita uma excursão em todos os pontos da tensão senoidal da fonte de forma a comprovar que o pior caso para o fenômeno de Zeros Atrasados, para este cenário, é quando a tensão está passando por zero.

Foram apresentados somente os resultados da aplicação do curto-circuito no zero de tensão e no pico de tensão (para comparações futuras).

a.1) Chaveamento do curto-circuito no zero de tensão

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,8kV;
- Corrente de campo pré falta: 127,8A (de acordo com a curva em vazio);
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1064,1597A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 82,19ms de zero atrasado na fase A.

As figuras 21, 22 e 23 mostram respectivamente o comportamento da corrente de campo no momento da aplicação do curto-circuito, a tensão nos terminais do gerador no momento da aplicação do curto-circuito e a corrente de armadura do gerador.

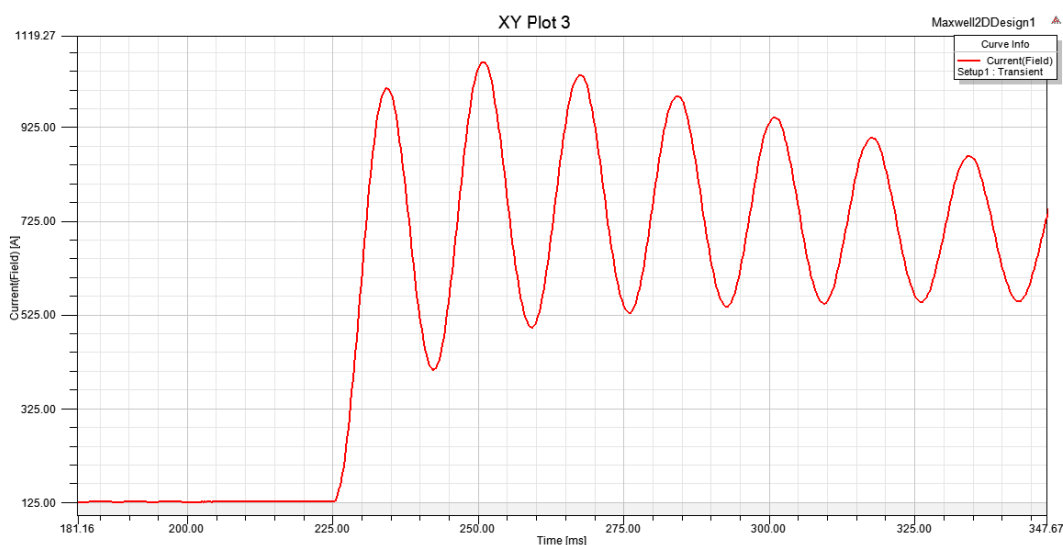


Figura 21: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - a.1).

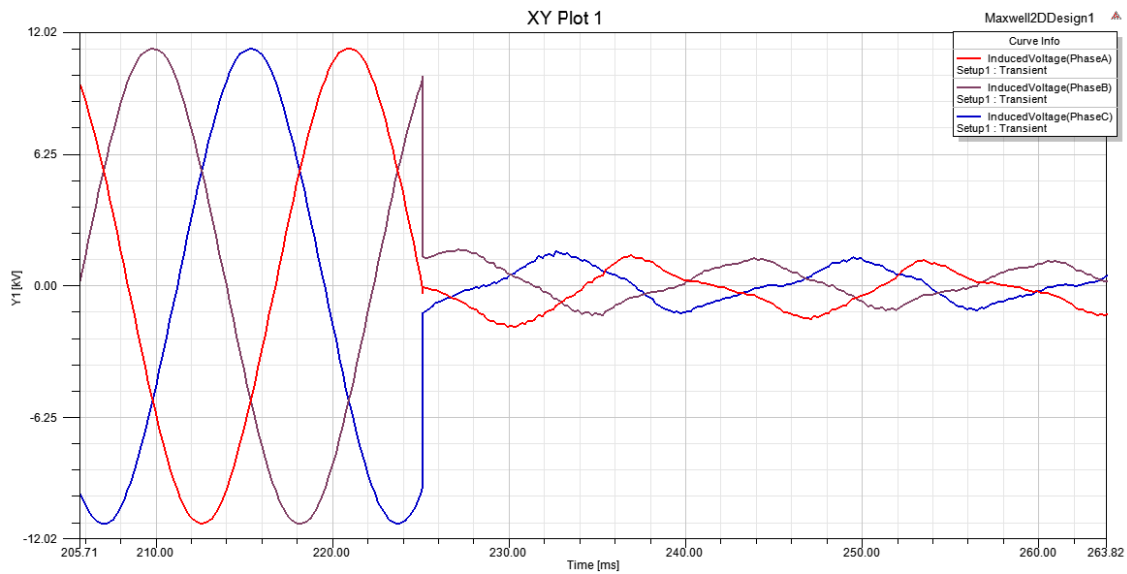


Figura 22: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - a.1).

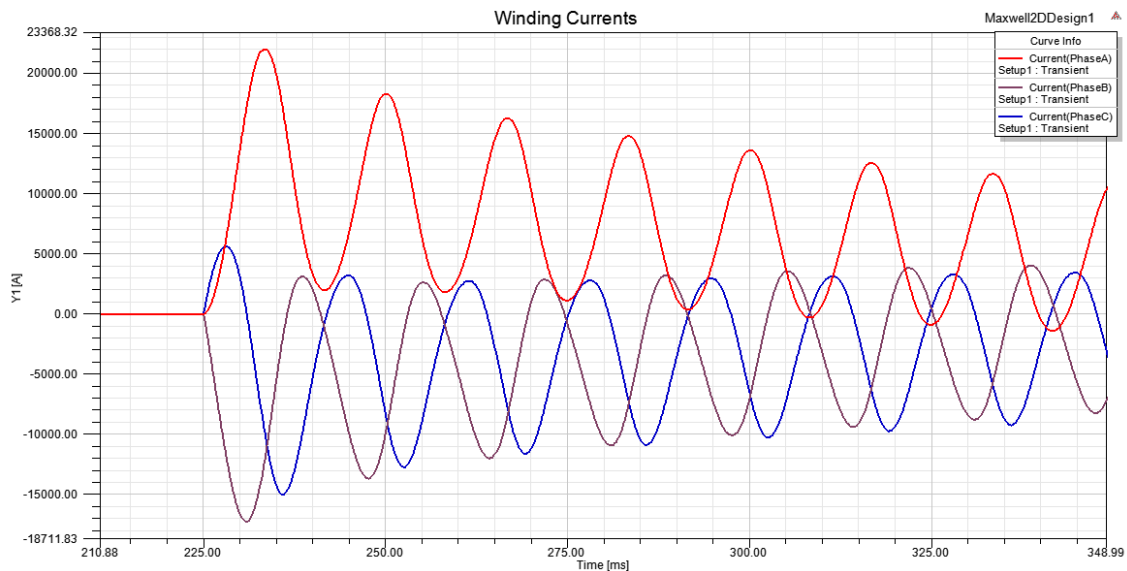


Figura 23: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - a.1).

Com o resultado da simulação é possível confrontar o tempo encontrado para que corrente da fase A cruze o zero (82,19ms) com a equação 2.7 e 2.8. Com os parâmetros da tabela 3 encontramos o seguinte tempo máximo para a corrente passar por zero segundo a equação 2.7:

$$t_{max} = \frac{T'_d \cdot T_a}{T'_d - T_a} \ln \left[\frac{x'_d}{x''_d} \right] = \frac{0,5171 \cdot 0,13865}{0,5171 - 0,1386} \ln \left[\frac{0,2451}{0,1441} \right] = 100,62ms \quad (4.1)$$

O resultado encontrado está com uma diferença, em comparação ao simulado pelo método de Elementos Finitos, de um pouco mais de um ciclo. Vale lembrar que a equação 2.7 foi deduzida utilizando a premissa que x''_d é igual a x''_q , que pela tabela 3

observamos não ser verdade para este caso.

Apesar de o resultado analítico não ter sido igual ao encontrado na simulação, a equação 2.7 é uma boa referência para se estimar de maneira rápida a ordem de grandeza do tempo em que a corrente da pior fase demorará para alcançar o zero.

a.2) Chaveamento do curto no zero de tensão (tensão terminal maior que 1pu)

Para avaliar o comportamento do fenômeno de Zeros Atrasados em condições fora das nominais, uma simulação adicional foi realizada verificando a influência da tensão terminal da máquina no instante da passagem da corrente por zero.

Foi constatado que somente com a tensão terminal em 17,53kV (1,27pu) existiu alguma alteração no resultado do tempo da passagem da corrente de curto-circuito por zero.

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase terminal pré-falta: 17,52kV;
- Corrente de campo pré falta: 235A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1415,7035A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 66,20ms de zero atrasado na fase A.

Para simulação do cenário 1 - a.2) é idêntica ao a.1), mas a tensão terminal do gerador está acima da sua tensão nominal e conseqüentemente a corrente de campo do gerador também aumentou (235A).

Com o aumento da corrente de campo e conseqüentemente a tensão terminal do gerador, a corrente de curto-circuito do gerador passou por zero antes.

Com isso podemos chegar a uma conclusão parcial: quanto maior for a tensão terminal do gerador menor será o tempo para que a corrente passe por zero.

A figura 24 mostra o gráfico da corrente de curto-circuito para tensão terminal de 1,27pu.

Os resultados da simulação deste cenário estão no ANEXO 1.

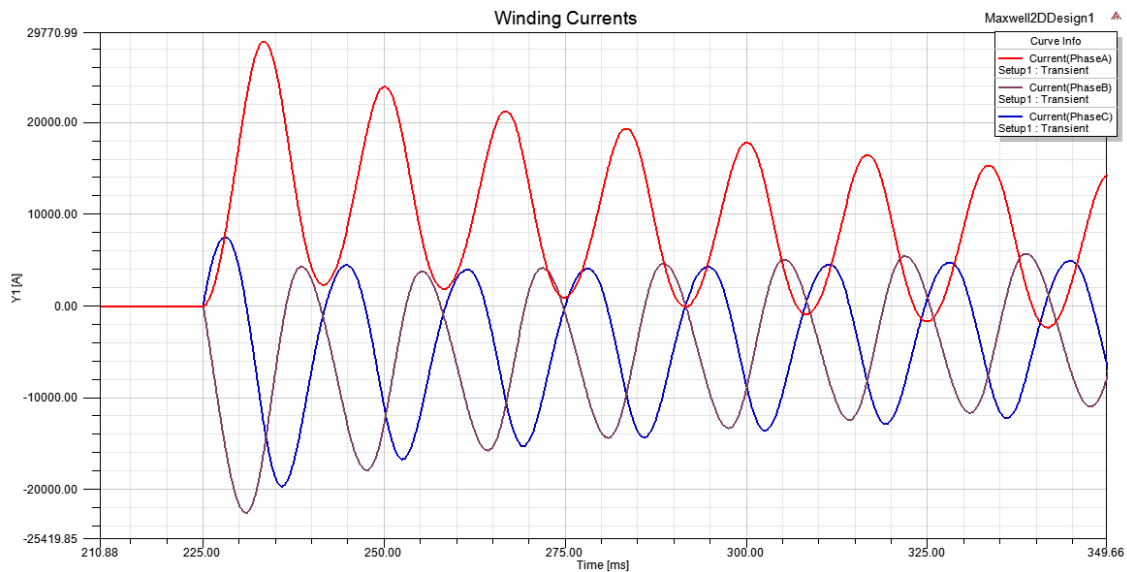


Figura 24: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - a.2).

b) Chaveamento do curto no pico de tensão

O curto-circuito no pico de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,82 kV;
- Corrente de campo pré-falta: 127,8A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1064,1597A
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 66,997ms de zero atrasado na fase B.

O curto-circuito no pico de tensão da fase A faz com que a corrente desta fase tenha assimetria muito reduzida, conforme pode ser observado na figura 25.

As outras fases apresentaram assimetria e a fase B demorou 67ms para cruzar o zero, inferior ao cenário 1 - a).

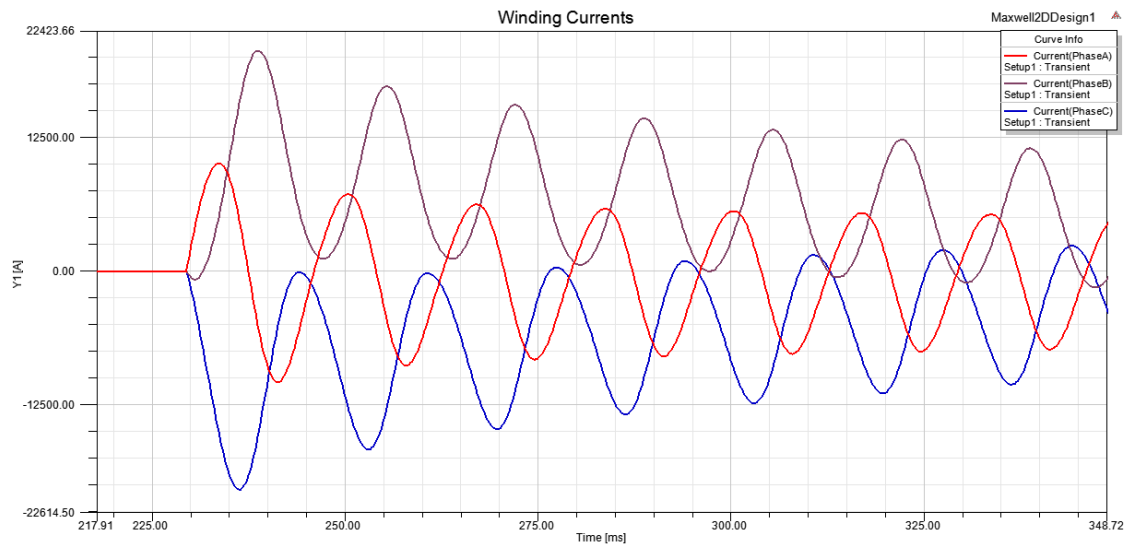


Figura 25: Corrente de curto-circuito para o cenário 1 - b).

Os resultados complementares da simulação deste cenário estão no ANEXO 1.

CENÁRIO 02 – GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL INDUTIVO

Neste cenário foi abordado o efeito do carregamento do gerador no fenômeno de Zeros Atrasados.

Inicialmente, foi adotado o carregamento nominal do gerador com uma carga estática (R-L) e fator de potência 0,8 indutivo.

O cálculo da impedância necessária para o gerador fornecer corrente nominal com fator de potência 0,8 indutivo é descrita na seguinte equação:

$$|Z_Y| = \frac{(13,8kV)^2}{31,25MVA} = 6,09408 \Omega \quad (4.2)$$

$$Z_Y = 4,875264 + j3,656448 \Omega \quad (4.3)$$

$$L_{Load} = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{3,656448}{377} = 9,6988 mH \quad (4.4)$$

A figura 26 mostra como foi feito o Circuit Editor para este cenário.

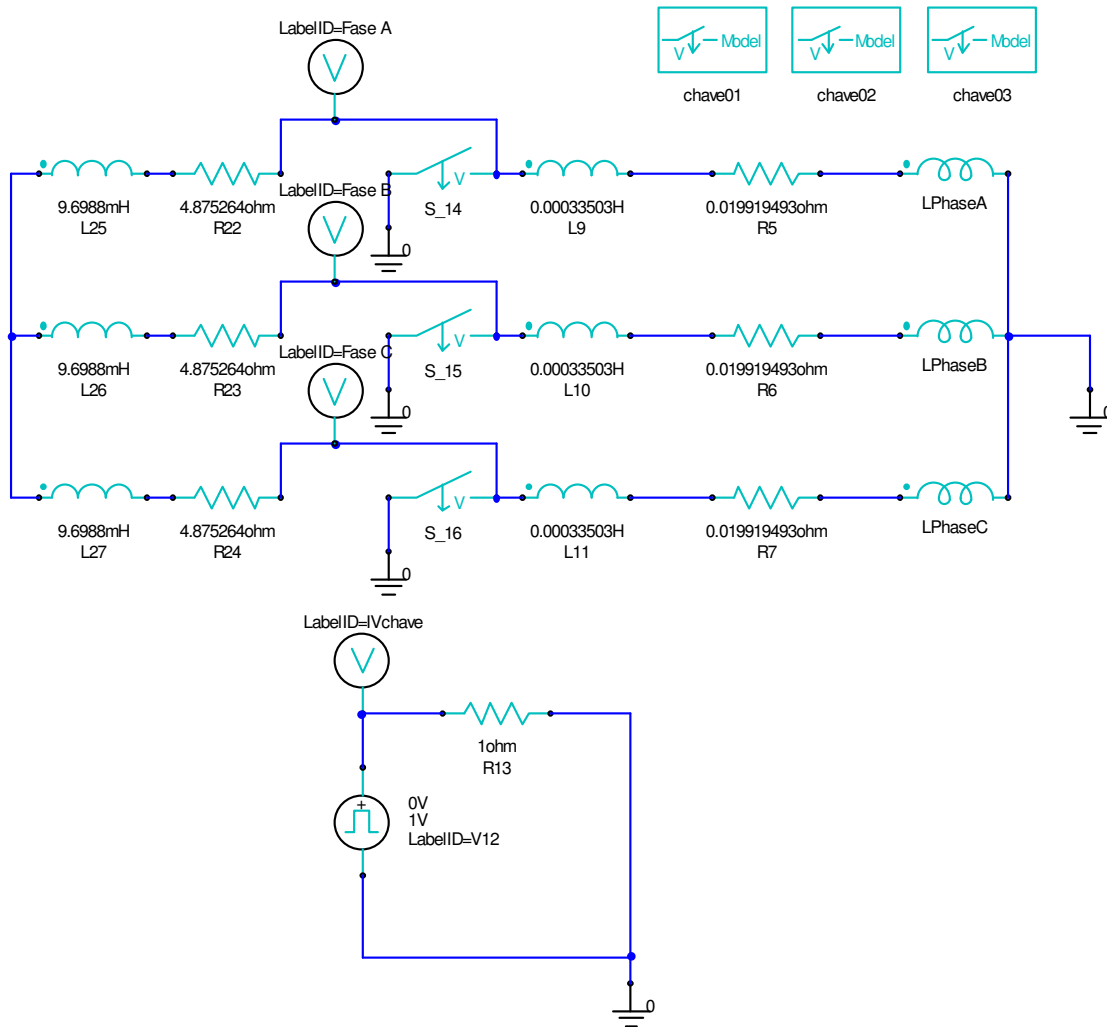


Figura 26: Circuit Editor para o cenário 2.

a) Chaveamento do curto no zero de tensão

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,839 kV;
- Tensão fase-fase induzida pré-falta: 14,066 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1294,15 A;
- Corrente de campo pré-falta: 319,4771A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1197,75A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 64,2902ms de zero atrasado na fase A.

Para o caso de máxima assimetria na fase A e com carga nominal indutiva, observa-se que a corrente de campo foi maior do que aquela do cenário 1 (127,8A) e a

corrente passou pelo zero mais rapidamente.

Os resultados da simulação deste cenário estão no ANEXO 1.

b) Chaveamento do curto no pico de tensão

O curto-circuito no pico de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,839 kV;
- Tensão fase-fase induzida pré-falta: 14,066 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1294,15 A;
- Corrente de campo pré falta: 319,4771A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1202,2372A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 46 ms de zero atrasado na fase C.

Como esperado, o tempo para cruzar o zero com mínima assimetria na fase A foi menor que o cenário anterior e a última fase a passar pelo zero foi a fase C.

Em comparação com o cenário 1 – b) observa-se que com a corrente de campo maior, devido à carga nominal, neste cenário a corrente cruzou o zero mais rapidamente.

Os resultados da simulação deste cenário estão no ANEXO 1.

CENÁRIO 03 – GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL CAPACITIVO

A referência [3] indica que o pior carregamento do gerador possível para o fenômeno de Zeros Atrasados seria com carga capacitiva.

Para um sistema industrial *offshore* onde as principais cargas do sistema são motores de indução, e não existem bancos de capacitores, a possibilidade deste cenário se concretizar na prática é muito remota. Apesar de ser uma simulação com condição operacional apenas teórica, o resultado da simulação pode ser muito útil para entender o que influencia no gerador para a carga capacitiva.

Considerando que o gerador está com carga nominal capacitiva e fator de potência nominal de 0,8, temos as seguintes expressões para determinar a impedância necessária para inserir no Circuit Editor:

$$|Z_Y| = \frac{13,8^2}{31,25} = 6,09408 \Omega \quad (4.5)$$

$$Z_Y = 4,875264 - j3,656448 \Omega \quad (4.6)$$

$$C_{Load} = \frac{1}{2\pi f \cdot x_C} = \frac{1}{377,3,656448} = 0,725436 \text{ mF} \quad (4.7)$$

A figura do Circuit Editor para este cenário está no ANEXO 1.

a) Chaveamento do curto no zero de tensão

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,8 kV;
- Tensão fase-fase induzida pré-falta: 13,618 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1328,35 A;
- Corrente de campo pré-falta: 176,7914A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 734,6169 A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 195,8ms de zero atrasado na fase A.

Para cargas capacitivas o gerador está subexcitado (13,62kV) e a corrente de campo necessária para fornecer tensão terminal nominal de 13,8kV é bem inferior quando comparado com carga indutiva.

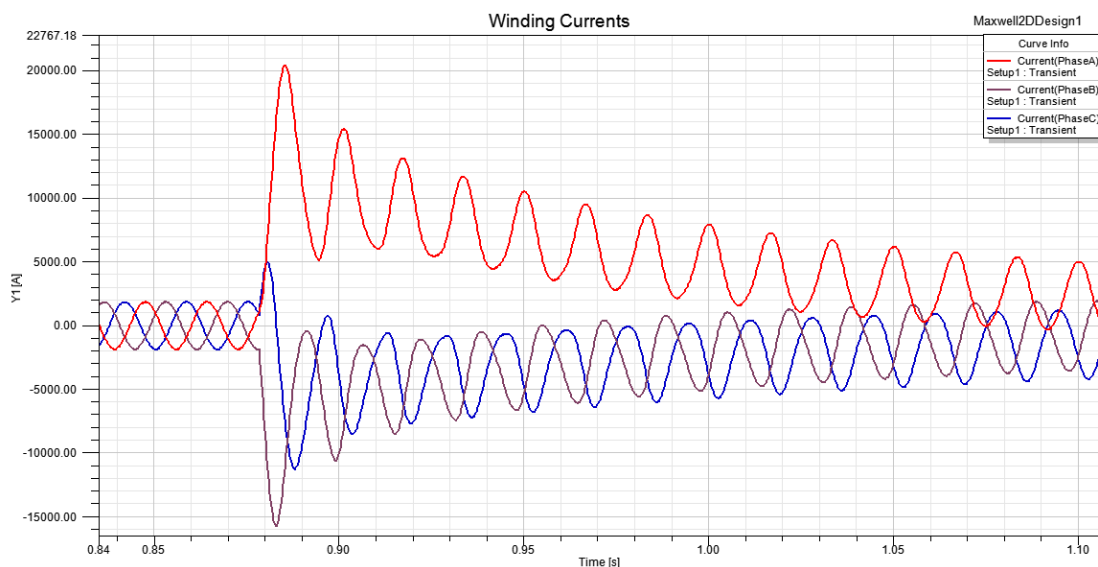


Figura 27: Corrente de curto-circuito para o cenário 3 - a).

A figura 27 mostra que, de acordo com a literatura, um curto-circuito trifásico com fator de potência capacitivo realmente implica em um elevado tempo para que a corrente passe por zero.

Os resultados da simulação deste cenário estão no ANEXO 1

b) Chaveamento do curto no pico de tensão

O curto-circuito no pico de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,80 kV;
- Tensão fase-fase induzida pré-falta: 13,618 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1328,35 A;
- Corrente de campo pré-falta: 176,7914 A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 740,5180 A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 181,2ms de zero atrasado na fase B.

Como esperado, o curto-circuito trifásico gera mínima assimetria na fase A e um fenômeno de Zeros Atrasados de menor tempo, se comparado ao curto-circuito no zero de tensão, mas o resultado também foi expressivo, ao ponto de superar o valor encontrado nos cenários anteriores.

Os resultados da simulação deste cenário estão no ANEXO 1.

CENÁRIO 04 – VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Com os resultados dos cenários anteriores verificamos que o fator de potência influencia diretamente no tempo em que a corrente demora para passar por zero. Neste cenário será abordada uma variação no fator de potência indutivo do gerador a plena carga.

Apesar de o fator de potência capacitivo ser o pior caso, até o momento, a variação deste caso não será abordada, já que para uma planta real *offshore* não existe a possibilidade de o sistema operar subexcitado.

Foram estudados os seguintes fatores de potência indutivos:

- Fator de Potência 0,8 indutivo, já simulado no cenário 2;
- Fator de Potência 0,95 indutivo;

- Fator de Potência 0,5 indutivo;
- Fator de Potência 1,0.

As seguintes cargas foram calculadas e inseridas no Circuit Editor para cada simulação:

- Fator de Potência 0,5 indutivo:

$$Z_Y = 3,047 + j5,2776\Omega \quad (4.8)$$

$$L_{Load} = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{5,2776}{377} = 13,9989mH \quad (4.9)$$

- Fator de Potência 0,95 indutivo:

$$Z_Y = 5,789376 + j1,902875\Omega \quad (4.10)$$

$$L_{Load} = \frac{x_L}{2\pi f} = \frac{1,902875}{377} = 5,0474mH \quad (4.11)$$

- Fator de Potência 1,0 puramente resistivo:

$$Z_Y = \frac{13,8^2}{31,25} = 6,09408\Omega + j0 \quad (4.12)$$

A tabela 4 mostra os resultados das simulações dos cenários 2, 3 e 4 e os gráficos de cada simulação e o Circuit Editor podem ser verificados no ANEXO 1.

Tabela 4: Resultado das simulações do Cenário 4.

	Momento da aplicação do curto-circuito	Tensão terminal pré-falta (kV)	Tensão induzida pré-falta (kV)	Corrente de armadura pré-falta (A)	Corrente de campo pré-falta (A)	Valor máximo da corrente de campo pós-curto (A)	Tempo de zero atrasado na pior fase (ms)
Cenário 02	Zero de tensão FP=0,8 indutivo	13,81	14,04	1290,31	319,48	1197,75	64,29
	Pico de tensão FP=0,8 indutivo	13,81	14,04	1290,31	319,48	1202,24	46,00
Cenário 03	Zero de tensão FP=0,8 capacitivo	13,78	13,59	1324,41	176,79	734,62	195,80
	Pico de tensão FP=0,8 capacitivo	13,78	13,59	1324,41	176,79	740,52	181,20
Cenário 04	Zero de tensão FP=0,5 indutivo	13,81	14,08	1273,36	338,16	1254,43	48,37
	Pico de tensão FP=0,5 indutivo	13,80	14,07	1275,09	338,18	1259,91	14,20
	Zero de tensão FP=0,95 indutivo	13,79	13,96	1312,89	296,36	1117,04	80,53
	Pico de tensão FP=0,95 indutivo	13,81	13,98	1308,96	296,18	1121,91	63,00
	Zero de tensão FP=1 resistivo	13,81	13,87	1341,29	260,81	1044,88	112,74
	Pico de tensão FP=1 resistivo	13,81	13,87	1332,75	259,69	1048,12	81,40

Conforme esperado, quanto maior o fator de potência indutivo da carga mais resistiva ela é e conseqüentemente o gerador precisa fornecer menos reativo para o sistema, ou seja, a corrente de campo e a tensão induzida são menores para cargas de alto fator de potência.

Mais uma vez verifica-se que os curtos-circuitos trifásicos aplicados no zero de tensão implicam em maior tempo para a corrente passar pelo zero, quando comparados com curtos-circuitos aplicados no pico de tensão. Também é possível constatar que quanto menor for a tensão induzida maior será o tempo para a corrente de curto-circuito passar pelo zero.

Para sistemas indutivos, quanto maior for o Fator de Potência, menor será a tensão induzida pré-falta (conseqüentemente menor a corrente de campo pré-falta) e maior será o tempo para a corrente de curto-circuito cruzar o zero.

A figura 28 apresenta um diagrama fasorial simplificado do gerador para dois fatores de potência diferentes, apenas para exemplificar que para uma tensão terminal fixa quanto maior o fator de potência (menor o ângulo θ) menor será a tensão interna.

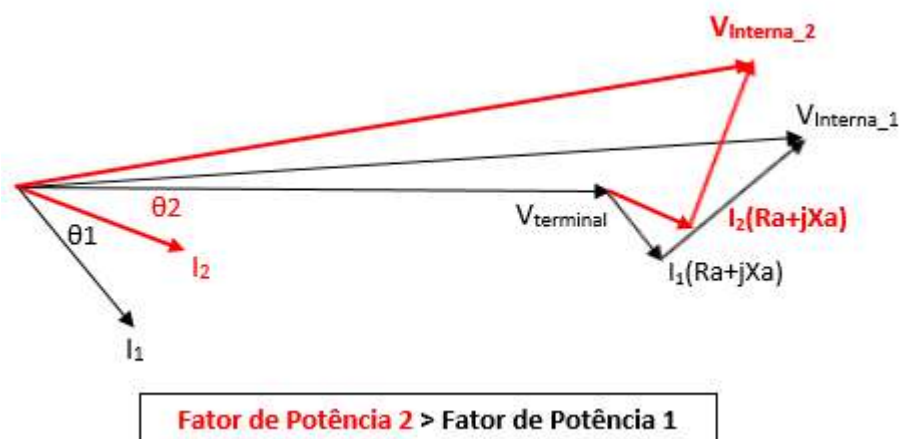


Figura 28: Diagrama fasorial simplificado para Fator de Potência indutivo.

Seguindo o mesmo raciocínio para o caso de Fator de Potência Capacitivo, quando maior for o Fator de Potência, maior será a tensão interna do gerador pré-falta (conseqüentemente maior corrente de campo pré-falta) e menor será o tempo para a corrente de curto-circuito cruzar o zero.

A figura 29 indica um diagrama fasorial simplificado do gerador para dois fatores de potência capacitivos diferentes, apenas para exemplificar que para uma tensão terminal fixa quanto maior o fator de potência (menor o ângulo θ) maior será a tensão interna.

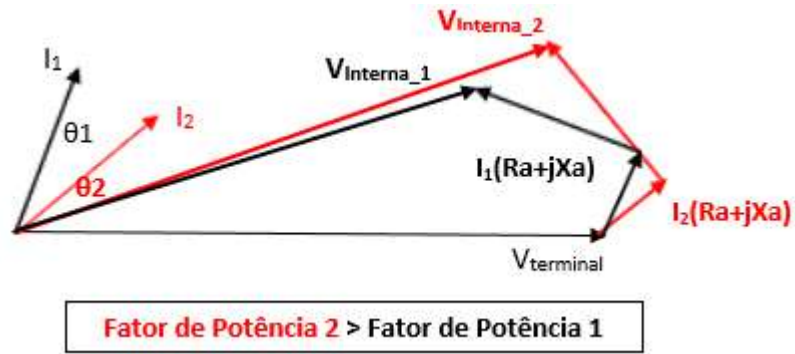


Figura 29: Diagrama fasorial simplificado para Fator de Potência capacitivo.

A figura 30 mostra um gráfico Fator de Potência indutivo pelo tempo máximo para a corrente cruzar o zero, para curtos-circuitos aplicados no zero de tensão e no pico de tensão.

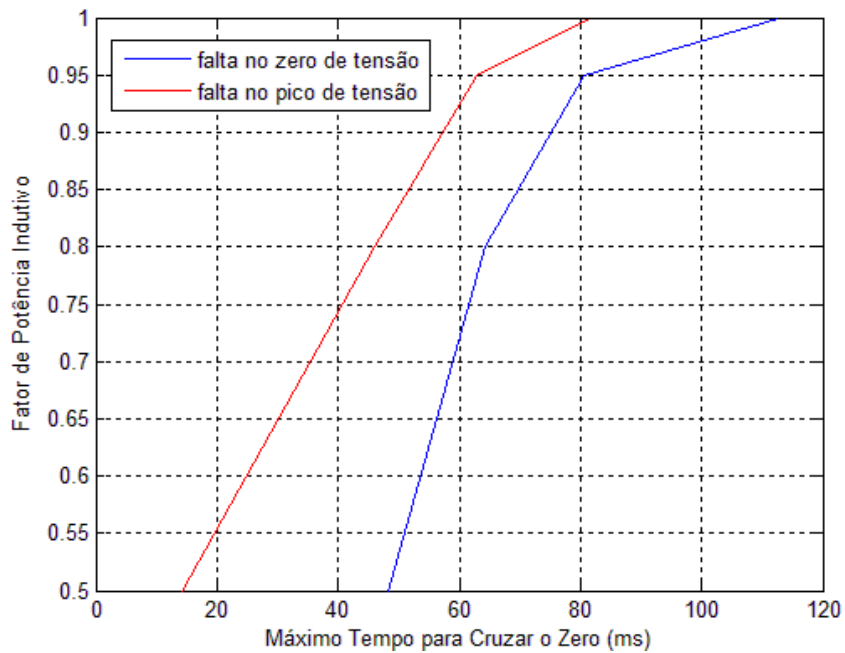


Figura 30: Comparação do Fator de Potência com o tempo para a corrente cruzar o zero.

O sistema industrial de uma plataforma de produção de petróleo é composto basicamente de motores de indução, sendo assim o Fator de Potência típico deste tipo de unidade é da ordem de 0,88.

CENÁRIO 05 – RESISTÊNCIA DE ARCO EM DISJUNTORES A VÁCUO

Conforme já mencionado no capítulo 2, o arco elétrico interno às câmaras do disjuntor possui uma propriedade não-linear e puramente resistiva.

Apesar de algumas referências utilizarem o modelo do arco como se fosse um valor médio constante [5], a caracterização do arco de maneira simplificada pode levar a uma análise não realista do fenômeno físico e conseqüentemente uma conclusão equivocada.

Apesar de saber a importância da reprodução correta dos efeitos físicos do arco elétrico para o fenômeno de Zeros Atrasados, a modelagem adequada do arco se torna muito complicada, dificultando a utilização de uma representação mais fidedigna [30].

Devido ao fato da tensão não-linear do arco em disjuntores a vácuo possuir um valor relativamente baixo, variando de 100 a 150V para o tipo TMF (*Transverse Magnetic Field*) e por volta de 50V para o tipo AMF (*Axial Magnetic Field*) [5], não é esperado que a utilização do arco elétrico nas simulações seja suficiente para evitar o atraso na passagem da corrente de curto-circuito por zero.

Para fins de simulação é possível utilizar uma premissa simplificada através da representação da tensão do arco por um valor médio e inserir uma resistência constante no momento da separação dos contatos do disjuntor. Com isso é possível para fazer uma análise qualitativa da representatividade do efeito do arco no fenômeno de Zeros Atrasados.

Para níveis de curto-circuito típicos de unidades *offshore* e considerando a tecnologia do tipo TMF para o disjuntor, a resistência elétrica típica no momento da abertura dos contatos do disjuntor é de 2 a 3,3 m Ω [5].

Para verificar o efeito da resistência do arco durante uma falta com elevada assimetria foram utilizadas duas simulações para curto-circuito em um gerador a vazio no zero de tensão:

- Impedância de falta puramente resistiva no momento do curto-circuito;
- Resistência de arco linear interno ao gerador no momento da abertura do disjuntor.

a) Impedância de falta puramente resistiva no momento do curto-circuito (curto com arco)

Foi utilizado neste caso uma resistência constante inserida no momento da aplicação do curto-circuito, impedância de falta.

A tabela 5 apresenta o pior tempo para a última fase cruzar o zero e o valor da resistência inserida.

Tabela 5: Efeito do curto-circuito com impedância de falta.

Resistência de arco (mΩ)	Tempo de Zero Atrasado (ms)
0	82,19
5	65,39
10	48,99
15	48,39
20	32,46

b) Resistência de arco interno ao gerador no momento da abertura do disjuntor

Neste caso somente foi inserida a resistência do arco no momento em que o contato do disjuntor se abre, ou seja, 55ms após o curto-circuito, conforme figura 9 do capítulo 2.

A tabela 6 apresenta o pior tempo para a última fase cruzar o zero e o valor da resistência inserida.

Tabela 6: Efeito do curto-circuito com resistência de arco no momento da abertura do disjuntor.

Resistência de arco (mΩ)	Tempo de zero atrasado (ms)
0	82,19
5	81,80
10	81,52
15	65,80
20	65,55

Pelas tabelas 5 e 6 é possível observar que uma resistência de falta pequena tem um grande efeito na passagem por zero, mas a resistência do arco interno ao disjuntor para produzir algum efeito significativo antecipando a passagem da corrente por zero tem que possuir um valor elevado, na ordem de 3 a 5 vezes o valor típico de arco para disjuntores a vácuo (2 a 3,3mΩ).

O ANEXO 1 mostra os circuitos do Circuit Editor utilizados nas simulações do cenário 5.

CENÁRIO 06 – EFEITO DA ABERTURA DA PRIMEIRA FASE

Nos cenários anteriores foram feitas simulações em que o curto-circuito é sempre mantido, isto é, não está sendo considerado o efeito da abertura do disjuntor.

Quando é aplicado um curto-circuito trifásico no sistema o relé demora por volta de 20ms para fazer o seu processamento interno e enviar o sinal de abertura do disjuntor trifásico, que por sua vez demora 35ms para separação dos contratos, os quais abrem simultaneamente. Portanto, o tempo de abertura do disjuntor demora pelo menos 55ms segundo catálogos técnicos de fabricantes de disjuntor [27].

Ao abrir os contatos, é inserida a resistência de arco e após a primeira fase da corrente passar por zero, aquela fase é extinguida e o curto-circuito passa de trifásico para bifásico, mudando completamente a dinâmica do sistema.

As simulações a seguir não levam em consideração a resistência do arco para concentrar a análise somente no processo da extinção da primeira fase.

Será utilizado o Cenário 1 como condição operacional para estudar o efeito da abertura do disjuntor, ou seja, será utilizado o gerador a vazio nas simulações.

a) Chaveamento do curto no zero de tensão

A figura 31 indica que 55ms após o curto-circuito a primeira fase a passar por zero é a fase C. Assim que a fase C abre, o curto-circuito passa de trifásico para bifásico e correntes nas fases A e B passam a possuir o mesmo módulo e sentidos contrários (curto-circuito bifásico).

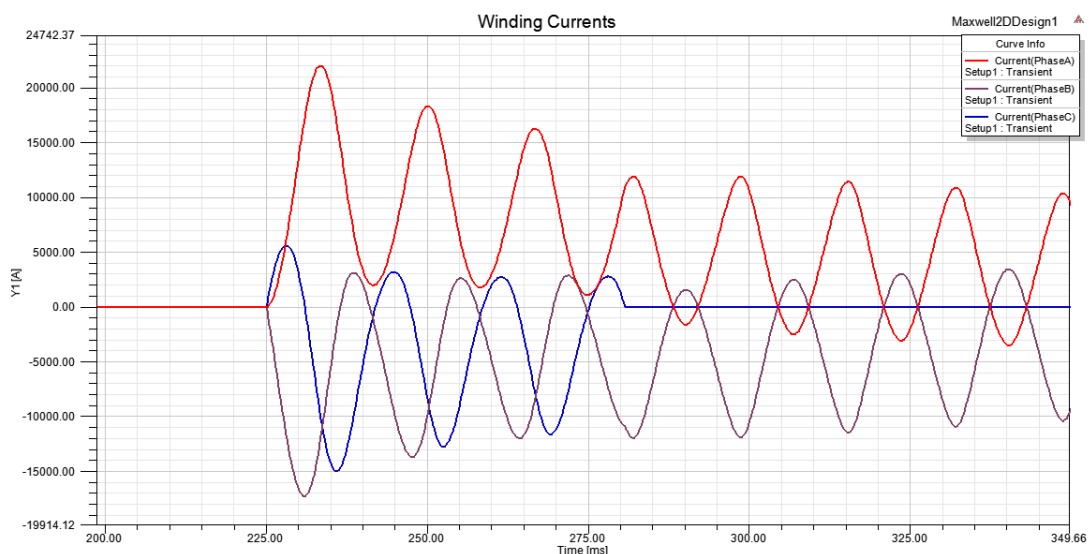


Figura 31: Corrente de curto-circuito com a extinção da fase C devido a abertura do disjuntor.

É possível notar que ao extinguir a fase C, o nível CC das correntes das fases A e B (nível CC do curto-circuito trifásico com máxima assimetria) reduz significativamente (nível CC do curto-circuito bifásico).

A figura 32 mostra o comportamento da tensão induzida da máquina ao extinguir o curto-circuito na fase C.

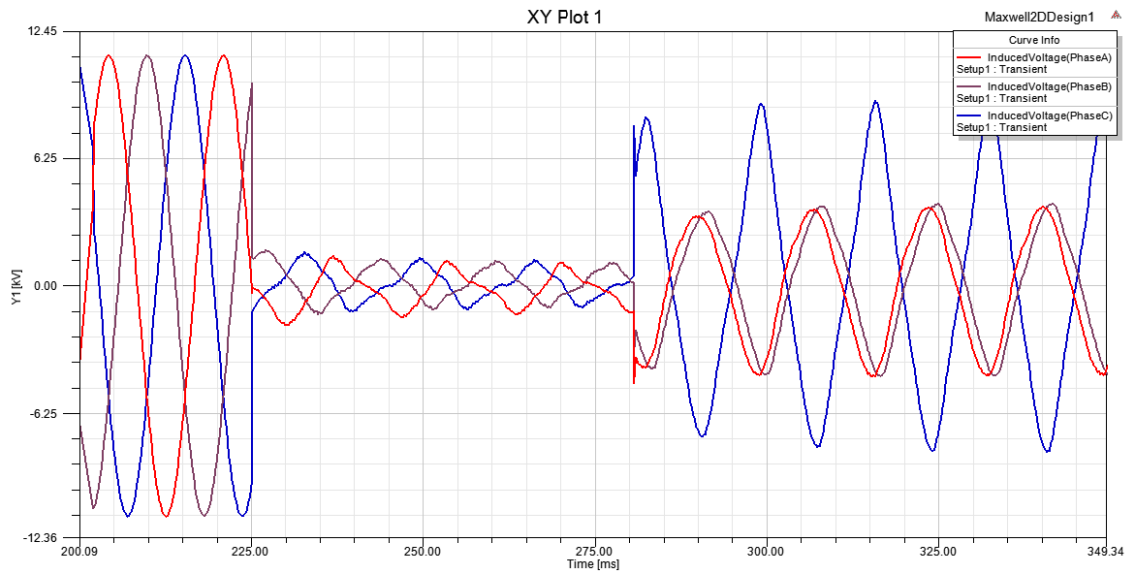


Figura 32: Tensão induzida da máquina para extinção da corrente de curto-circuito na fase C.

Na prática as outras duas fases em curto (A e B) também irão se extinguir ao passar por zero. A figura 33 mostra que após 8,10ms, após a separação dos contatos, o curto-circuito estará extinto, mesmo sem considerar a resistência do arco.

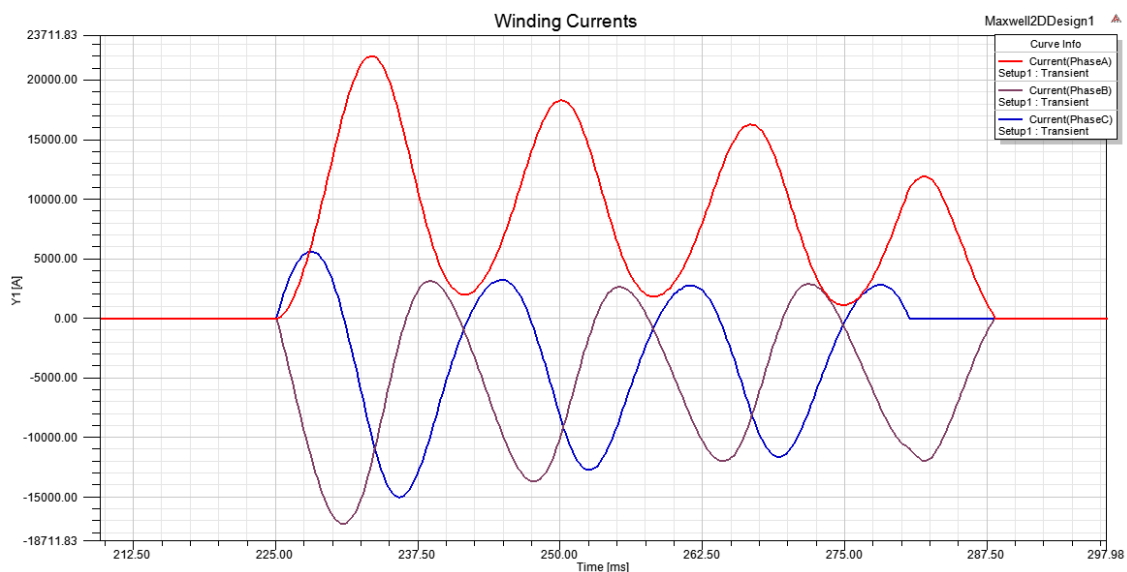


Figura 33: Corrente de armadura com a simulação da abertura do disjuntor e consequentemente extinção das fases.

Interessante destacar que a análise dos fenômenos envolvidos durante a abertura do disjuntor é de fundamental importância para caracterizar se o sistema possui problema com relação aos Zeros Atrasados.

Para o gerador a vazio e com curto-circuito no zero de tensão da fase A, não existem problemas com relação a integridade física do disjuntor já que o mesmo suporta 15ms (catálogo do fabricante [27]) e o resultado encontrado foi de 8ms de tempo de duração de arco interno às câmaras do disjuntor.

b) Chaveamento do curto no pico de tensão

A mesma simulação foi realizada com o momento da aplicação do curto-circuito no pico da tensão, ou seja, sem assimetria na fase A.

A figura 34 indica que a primeira fase a passar por zero após a abertura do disjuntor (55ms após o curto-circuito) é a fase A. Com a extinção da fase A o curto passa a ser bifásico entre as fases B e C.

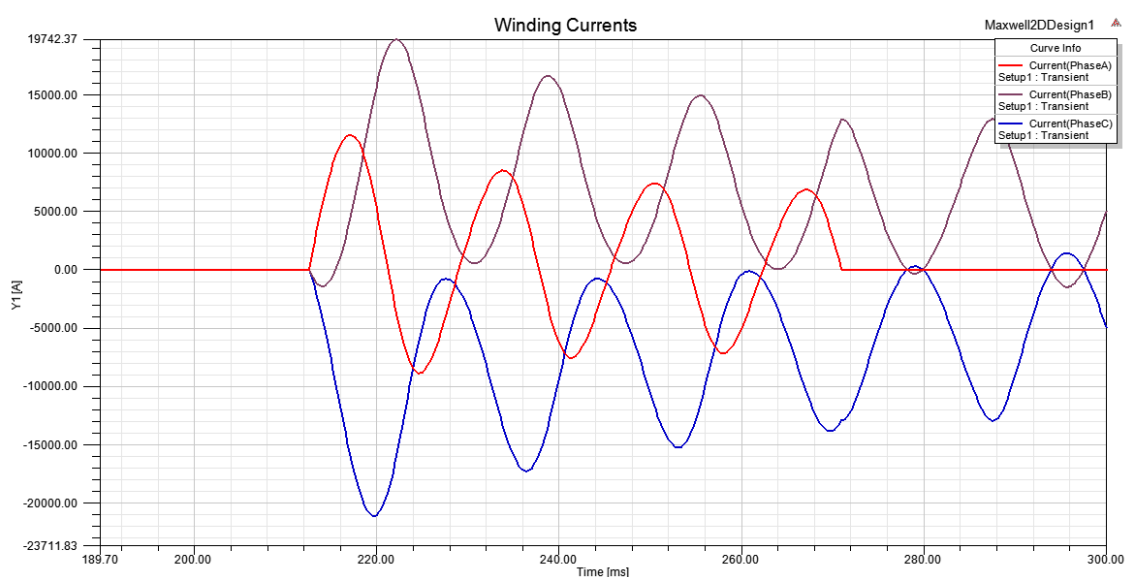


Figura 34: Corrente de curto-circuito com a extinção da fase A devido a abertura do disjuntor

É interessante verificar que comparando a figura 34 com a figura 31 observa-se que as fases remanescentes após a extinção da primeira fase possuem assimetria maior quando o curto-circuito inicialmente é aplicado no pico de tensão. Em todos os outros cenários o pior caso sempre foi com a aplicação do curto-circuito no zero de tensão, evidenciando como a dinâmica do sistema é alterada ao abrir a primeira fase.

Para este caso o curto-circuito é completamente extinto nas suas três fases

10,58ms após aplicação do curto-circuito. Apesar de estar abaixo dos 15ms sugeridos pela fabricante o resultado encontrado é maior que o cenário 6 – a), 8ms.

O ANEXO 1 mostra os resultados da simulação do cenário 6.

CENÁRIO 07 – CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Este cenário tem como objetivo verificar qual a influência do motor de indução para o fenômeno de Zeros Atrasados [4].

No momento do curto-circuito o motor de indução contribui como se fosse um gerador influenciando os primeiros instantes do curto-circuito, no entanto esta contribuição é de rápida atuação, isto é, durante o período transitório a contribuição do motor já não é tão significativa.

Esta característica do motor de indução, de contribuir para o curto-circuito no período subtransitório e depois reduzir consideravelmente a sua contribuição, pode influenciar consideravelmente o efeito de Zeros Atrasados, conforme equação (2.7).

Apesar de o método de Elementos Finitos se mostrar excelente para simulações de máquinas elétricas, tal método necessita de uma quantidade grande de informações e um elevado processamento computacional.

Para simulação da influência do motor de indução no gerador seria necessário conhecer toda a geometria do motor e fazer a simulação combinada com o gerador. Mesmo sendo possível este método se tornaria inviável para um sistema real com dezenas de máquinas.

Para efetuar a análise com o motor de indução foi utilizado o software ATP (*Alternative Transiente Program*) que se mostra muito eficaz para análises transitórias, além de ser amplamente utilizado no meio acadêmico.

COMPARAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DO ATP

De posse dos dados da máquina listados na tabela 3 foi utilizado o modelo do gerador “SM 58” para modelar o gerador.

Cabe ressaltar que para contabilizar a influência da saturação da máquina o ATP utiliza os dados da curva em vazio do gerador, figura 17, e contabiliza o efeito da saturação ao longo da simulação.

Com intuito de comparar a resposta do ATP foi feito um teste simples nas condições do cenário 1 e foi sobreposta a resposta da simulação obtida no Maxwell com a obtida com o ATP para verificar se o comportamento do gerador é equivalente.

A figura 35 apresenta como foi feita a simulação computacional do gerador operando a vazio no ATP. Foi utilizada uma chave ideal e uma resistência desprezível ligada em Y para controlar o momento da aplicação do curto-circuito. O momento do fechamento da chave ideal foi feito no zero de tensão e no pico da mesma, de forma a confrontar com os resultado encontrado no Cenário 1 a) e b).

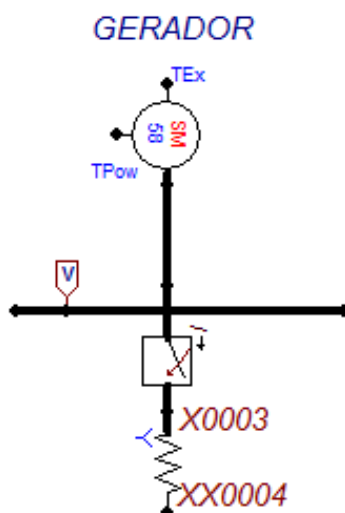


Figura 35: Modelo simples no ATP para validar a resposta dinâmica do gerador.

As figuras 36 e 37 mostram os resultados encontrados na simulação onde a corrente em azul é o resultado obtido pelo método de Elementos Finitos e o resultado em vermelho foi o obtido no ATP.

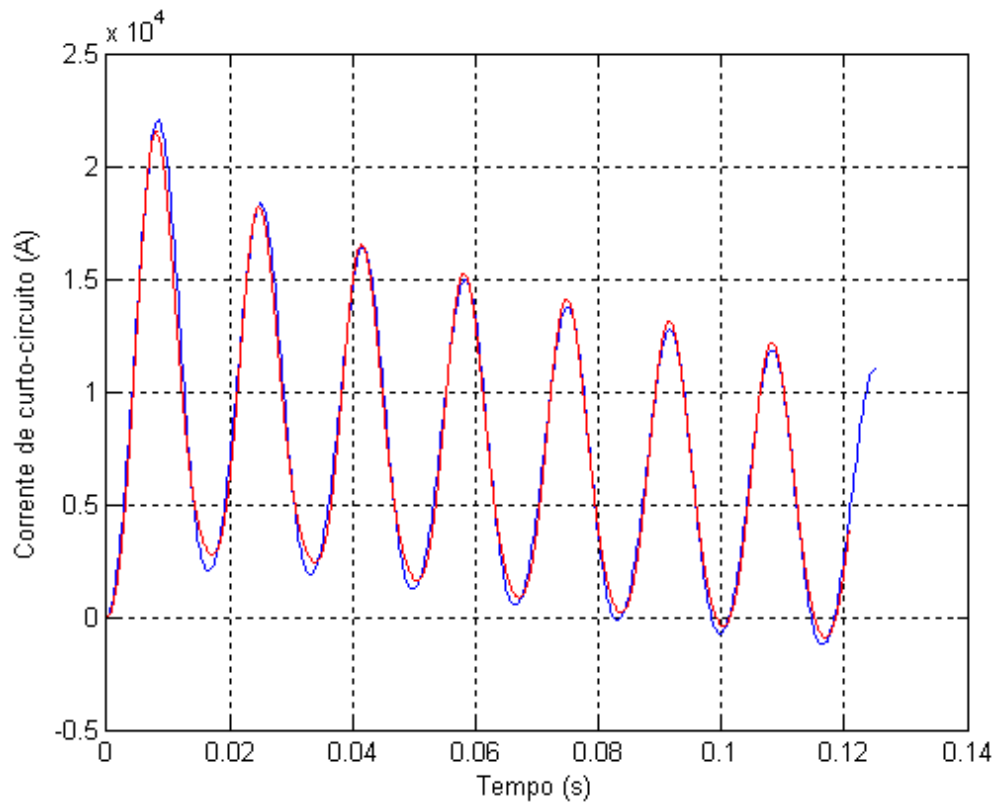


Figura 36: Comparação do método em Elementos Finitos (curva Azul) com o ATP (curva vermelha) para curto-circuito no zero de tensão.

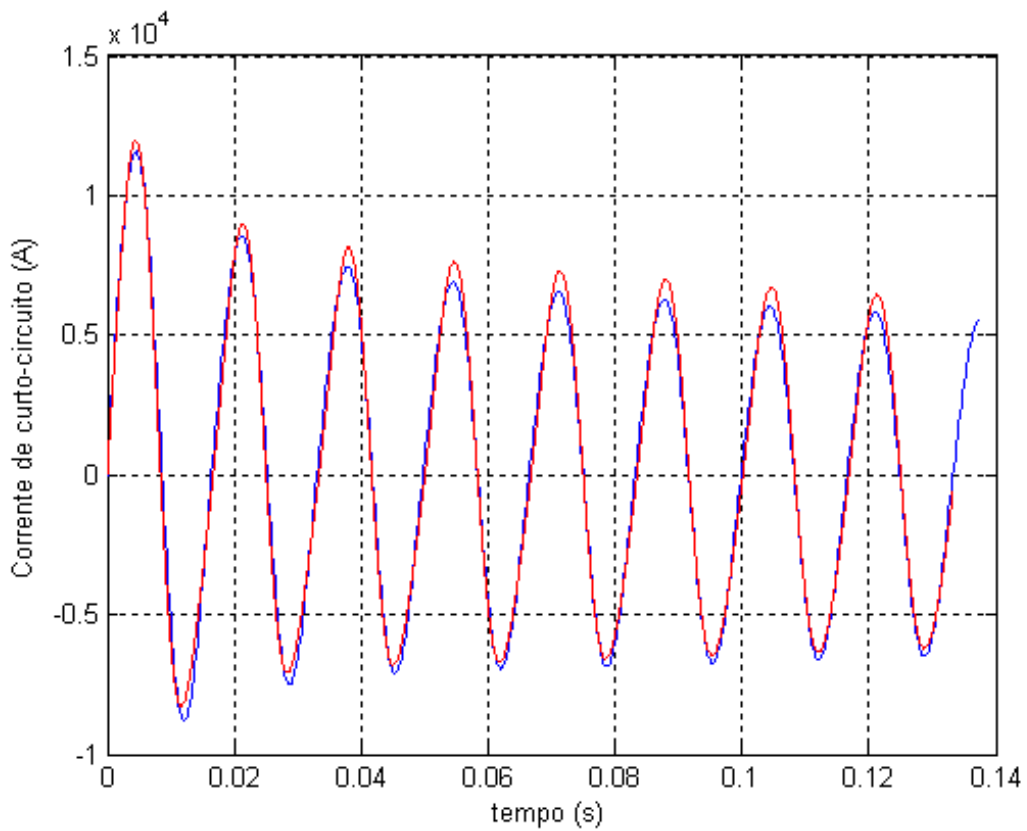


Figura 37: Comparação do método em Elementos Finitos (curva azul) com o ATP (curva vermelha) para um curto-circuito no pico de tensão.

A figura 38 apresenta a comparação da variação da corrente de campo durante a aplicação do curto-circuito para a simulação em Elementos Finitos (curva em azul) e a simulação realizada no ATP (curva em vermelho). Analisando a figura observa-se uma grande diferença no comportamento da corrente de campo quando se compar o resultado obtido pelo método de Elementos Finitos com a simulação no ATP, explicando a diferença encontrada nos resultados das figuras 36 e 37.

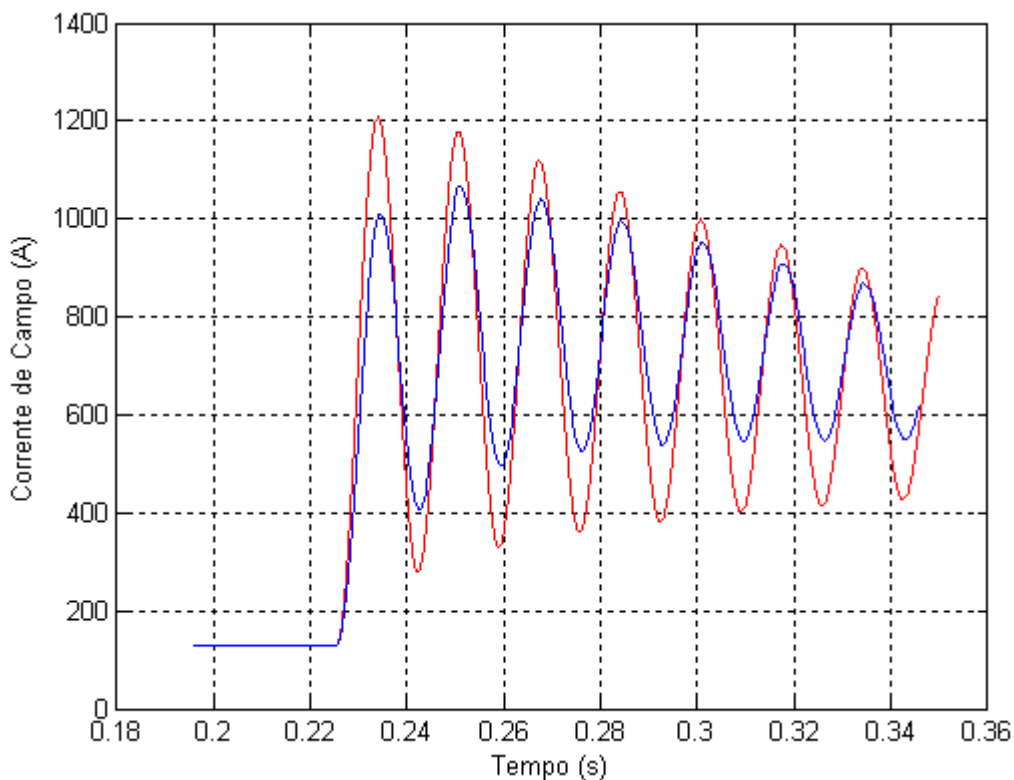


Figura 38: Comparação da corrente de campo simulada no Maxwell (curva azul) e ATP (curva vermelha) para um curto-circuito trifásico no gerador a vazio.

Apesar do modelo utilizado pelo ATP não representar o efeito dinâmico da corrente de campo do gerador com a precisão encontrada pelo método de Elementos Finitos, as figuras 36 e 37 mostram que os resultados encontrados nas simulações no ATP possuem uma resposta aceitável em comparação aos simulados no software ANSYS Maxwell.

SIMULAÇÃO COM CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO

A figura 39 mostra o circuito montado no ATP para fazer as simulações do cenário 7.

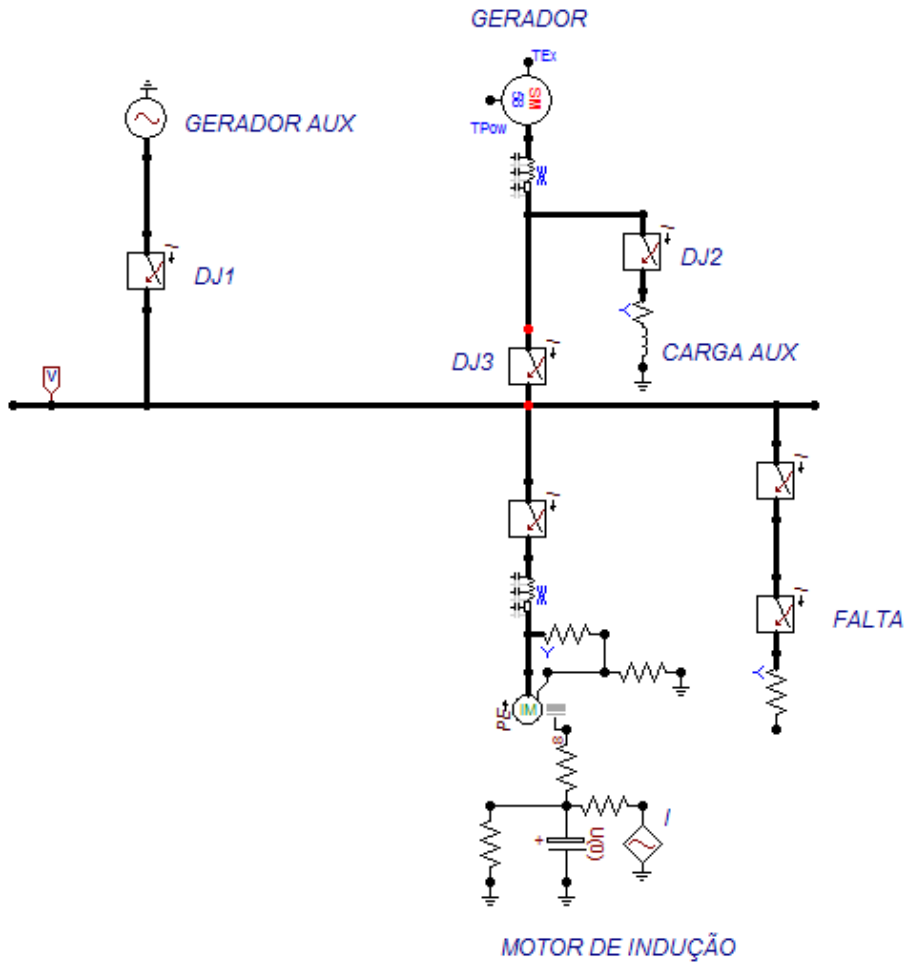


Figura 39: Circuito montado no ATP para o cenário 7.

Para o modelo do motor de indução foi utilizado o componente UM 3 (*Universal Machine*) que é a opção de motor no ATP adequada para efeitos transitórios.

Para representar as características mecânicas do motor de indução é necessário a fazer a representação das grandezas mecânicas através de um circuito elétrico, conforme figura 39, seguindo o seguinte critério [32]:

- Massa do eixo (momento de inércia): representado através da capacitância (1kg/m² equivale a 1 Farad);
- Fricção do eixo (amortecimento viscoso): representado através da condutância (1 NM/rad/s equivale 1/Ohm);
- Velocidade angular do motor: representado pela tensão inicial do capacitor (1 rad/s equivale a 1 Volt);
- Torque: representado por uma fonte de corrente (1Nm equivale a 1 Ampere).

Foi utilizado para esta simulação um motor relativamente grande, por volta de

20 MW, sem entrar no mérito de ser um sistema real e se o gerador de 25MW teria capacidade de partir esta máquina.

Para inicializar o sistema e partir o motor de grande porte é utilizado um artifício de um gerador auxiliar. Durante a partida do motor é utilizado este gerador auxiliar que é uma fonte ideal (barra infinita) e o gerador principal alimenta uma carga estática auxiliar que demanda a mesma corrente elétrica do motor em regime permanente, ou seja, as chaves DJ1 e DJ2 estão fechadas e a chave DJ3 está aberta, conforme figura 39.

Após a partida do motor e estabilização do sistema, é feita uma comutação de chaves (DJ1 e DJ2 abrem e DJ3 fecha) de forma que o gerador e a carga auxiliar saiam e o sistema fique operando em regime permanente com o gerador alimentando o motor, conforme figura 39.

Em regime permanente com o gerador alimentando a carga motórica, é possível aplicar os curtos-circuitos e analisar a resposta do sistema com a contribuição do motor.

Foram feitas 4 simulações para avaliar o sistema gerador com motor de indução:

- Curto-circuito no zero de tensão sem a abertura do disjuntor;
- Curto-circuito no zero de tensão com a abertura do disjuntor;
- Curto-circuito no pico de tensão sem a abertura do disjuntor;
- Curto-circuito no pico de tensão com a abertura do disjuntor.

Na simulação com a abertura do disjuntor não foi considerada a resistência de arco interna ao disjuntor, já que o objetivo foi analisar a mudança da dinâmica do sistema ao extinguir a primeira fase.

a) Chaveamento do curto no zero de tensão sem a abertura do disjuntor

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,80 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1226,5 A;
- Corrente de campo pré-falta: 206,3 A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1183,3 A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 214,5ms de zero atrasado na fase A.

Pela figura 40 observa-se que a simulação com o motor de indução foi a pior condição estudada até o momento, confirmando que o motor de indução realmente influencia consideravelmente no fenômeno de Zeros Atrasados.

É possível observar na figura 40 que no momento da aplicação do curto-circuito ocorrem oscilações numéricas nos primeiros instantes após a falta.

Para verificar o efeito da contribuição do motor no fenômeno de Zeros Atrasados, a figura 41 apresenta uma comparação nas contribuições para o curto-circuito do gerador (curva verde), do motor (curva azul) e a soma das contribuições que é a corrente total de curto-circuito (curva vermelha). Somente foram representadas no gráfico as correntes da fase A.

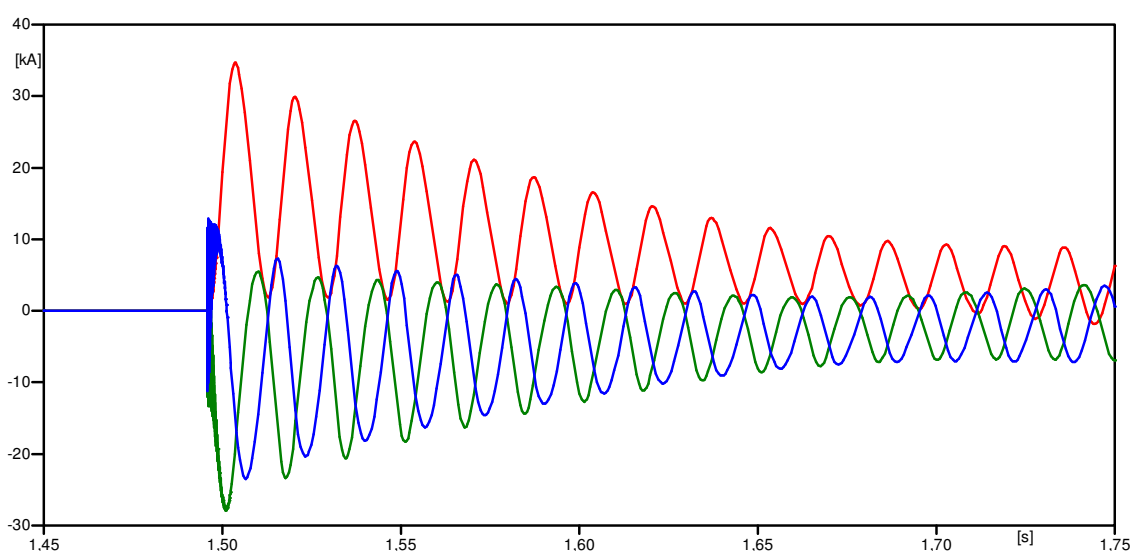


Figura 40: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - a).

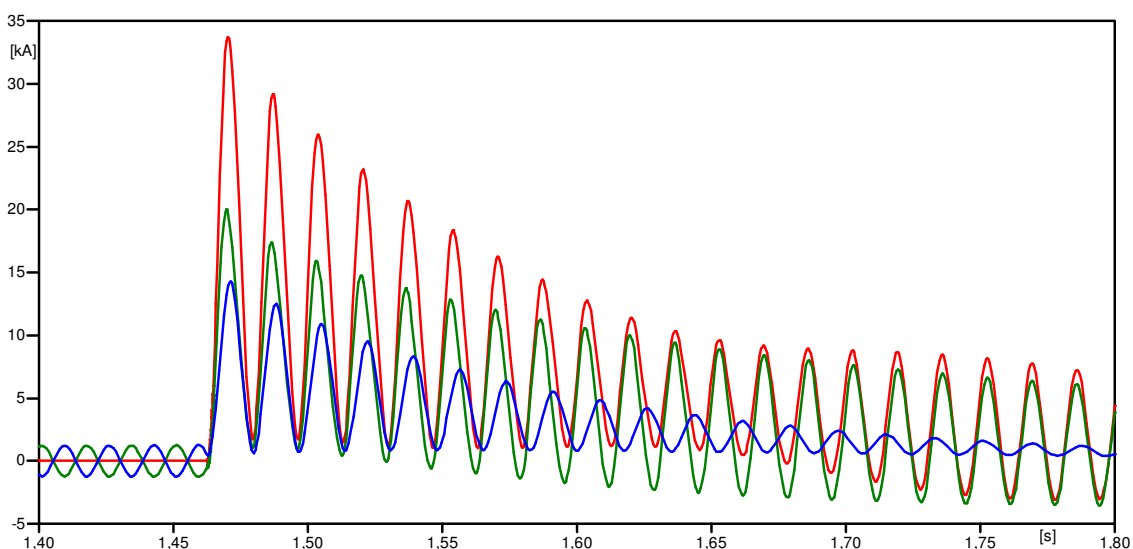


Figura 41: Comparação das correntes de curto-circuito (curva vermelha) da fase A, contribuição do gerador (curva verde) da fase A e contribuição do motor (curva Azul) da fase A.

Analisando a figura 41 observa-se que nos instantes iniciais, após a aplicação do curto-circuito, o motor de indução (curva azul) contribui para o curto-circuito total em fase com a contribuição de curto-circuito do gerador (curva verde).

É possível observar que a amplitude da corrente fornecida pelo motor vai caindo ao longo do tempo, como era esperado.

Além da redução de amplitude, com o passar do tempo o motor de indução vai perdendo velocidade e conseqüentemente a frequência da corrente de curto-circuito contribuída pelo motor vai caindo.

Por volta de 1,64s da simulação apresentada na figura 41, a contribuição do motor chegou ao ponto de ficar em oposição de fase com a contribuição do gerador. Este descasamento de frequência faz com que a corrente de curto-circuito total se afaste do zero.

A corrente de curto-circuito total neste caso passará pelo zero quando a componente CC for muito baixa ou a contribuição do motor chegar ao momento de voltar a ficar em fase com a contribuição do gerador.

b) Chaveamento do curto no zero de tensão com a abertura do disjuntor

O curto-circuito no zero de tensão (fase A) foi aplicado nas mesmas condições pré-falta do caso anterior, mas agora considerando que o disjuntor irá abrir 50ms após o curto-circuito para verificar o comportamento da mudança da dinâmica na abertura da primeira fase em um sistema com motor de indução.

Pela figura 42 observamos que quando é considerada a abertura do disjuntor a corrente passa muito rapidamente para zero, 1,3ms após a abertura do disjuntor, mesmo considerando a contribuição do motor de indução.

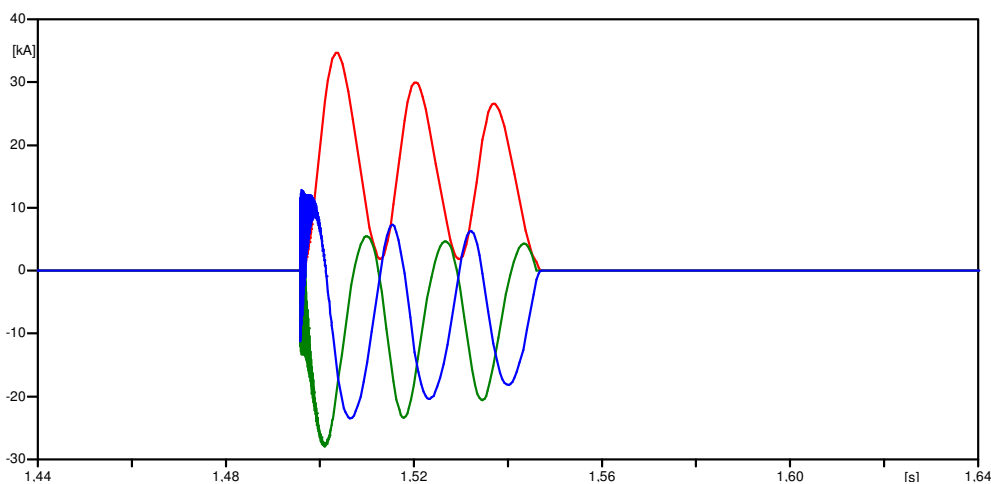


Figura 42: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - b).

c) Chaveamento do curto no pico de tensão sem a abertura do disjuntor

O curto-circuito no pico de tensão (fase A) foi aplicado nas seguintes condições operacionais:

- Tensão fase-fase pré-falta: 13,80 kV;
- Corrente de armadura pré-falta: 1226,5 A;
- Corrente de campo pré-falta: 205,55 A;
- Valor máximo da corrente de campo no momento do curto: 1184,2 A;
- Tempo para a última fase cruzar o zero: 82,2ms de zero atrasado na fase C.

A figura 43 mostra a corrente de curto-circuito possibilitando notar que a corrente da fase C é a última a cruzar o zero. Como era esperado o atraso na passagem por zero foi inferior ao simulado no cenário 7 – a), no qual foi aplicado o curto-circuito com máxima assimetria na fase A.

A figura 44 apresenta o comportamento do motor de indução a um curto-circuito trifásico. Interessante observar a característica do motor de contribuir consideravelmente no momento do curto-circuito, mas logo em seguida a sua contribuição cai consideravelmente, implicando no aumento da passagem da corrente de curto-circuito por zero.

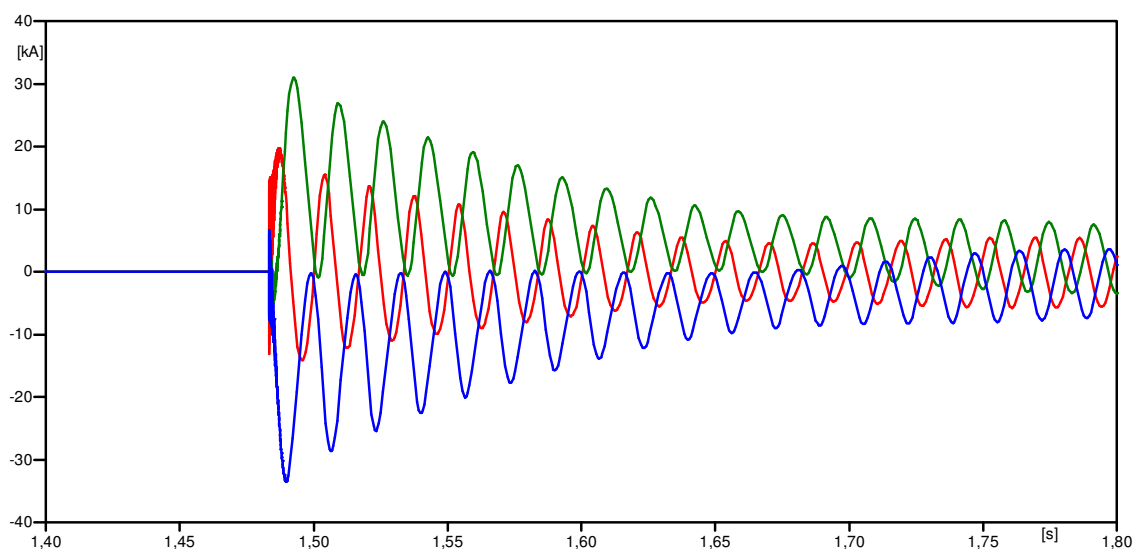


Figura 43: Corrente de curto-circuito para o cenário 7 - c).

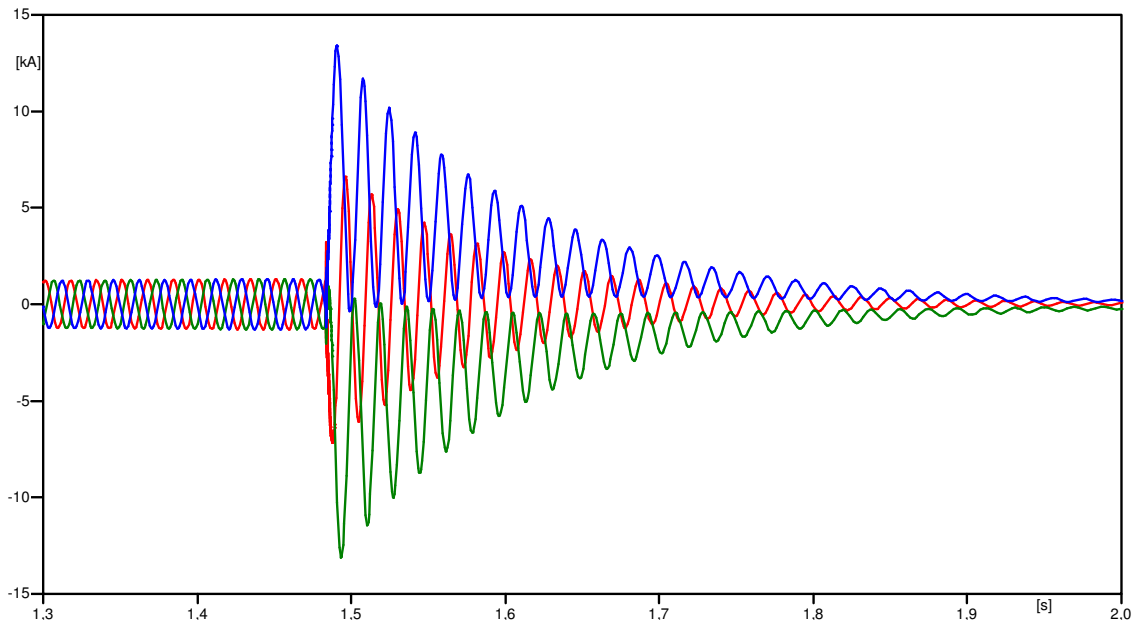


Figura 44: Contribuição do motor para o cenário 7 – c).

d) Chaveamento do curto no pico de tensão com a abertura do disjuntor

O curto-circuito no pico de tensão (fase A) foi aplicado nas mesmas condições pré-falta do caso anterior, mas agora considerando a abertura do disjuntor.

A figura 45 revela que para que as últimas fases passem pelo zero existe uma demora de 32,7ms após a abertura do disjuntor, ou seja, o disjuntor estaria sujeito a um arco elétrico dentro de suas câmaras por 32,7ms. Segundo o catálogo de fabricantes o disjuntor suporta 15ms de arco interno [27].

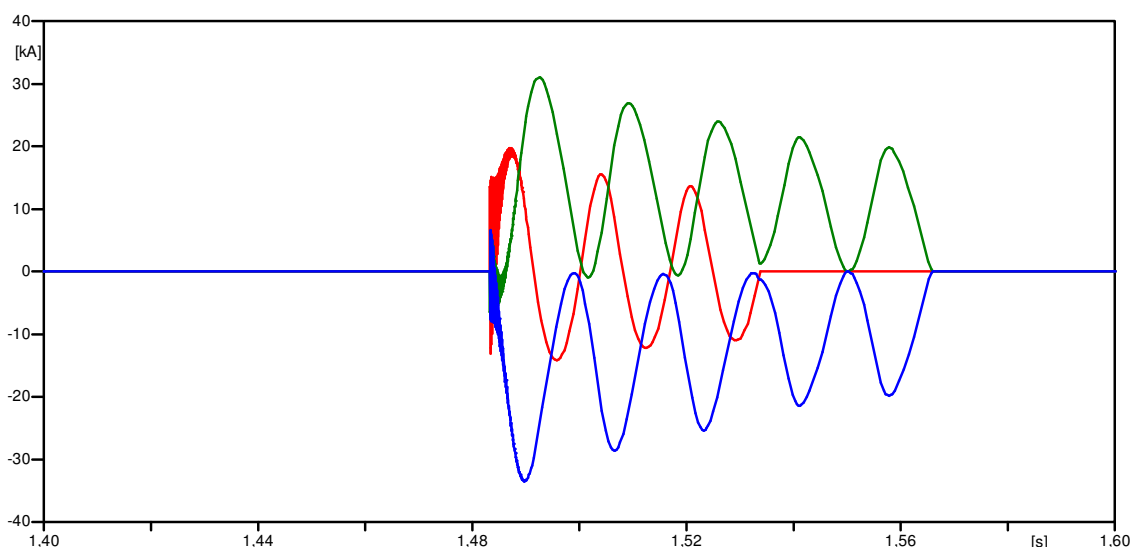


Figura 45: Corrente de curto-circuito do cenário 7 - d).

Esta simulação corrobora com o resultado encontrado no cenário 6 – b), ou seja, considerando a mudança da dinâmica devido a extinção da primeira fase, para o fenômeno de Zeros Atrasados, o pior momento para ocorrer o curto-circuito não é no zero de tensão e sim no pico, ao contrário do que é dito em diversas referências técnicas sobre o assunto.

Podemos chegar às seguintes conclusões preliminares depois dos resultados encontrados neste cenário: o motor de indução realmente intensifica o fenômeno de Zeros Atrasados devido à redução de amplitude e de frequência da contribuição de corrente do motor, e para um curto-circuito trifásico, considerando a abertura do disjuntor, o pior momento para que ocorra a falta é no pico de tensão

CENÁRIO 08 – TIPOS DE CURTO-CIRCUITO

Diversas referências afirmam que o curto-circuito evolutivo apresenta o pior resultado com relação ao atraso da passagem da corrente por zero. Neste último cenário foi testado o comportamento do fenômeno de Zeros atrasados para diversos tipos de curto-circuito e foi feita a comparação entre eles a fim de estabelecer qual seria a pior condição de curto-circuito para o disjuntor.

Como já foi validado nos cenários anteriores, a abertura do disjuntor influencia consideravelmente na dinâmica do sistema e é realmente a condição real a ser estudada, já que a preocupação do fenômeno de Zeros Atrasados seria a integridade física dos disjuntores no momento da sua abertura.

Por este motivo, no cenário 8, somente serão estudados os diversos tipos de curtos-circuitos considerando a abertura do disjuntor 50 ms após a aplicação do curto-circuito.

Sabendo que o motor de indução também é um componente que piora o fenômeno de Zeros Atrasados, neste cenário foram simulados o mesmo circuito gerador e motor do cenário 7, figura 39. Assim, apesar de ser um circuito simples, com este cenário se chegará à conclusão do pior tipo de curto-circuito em uma condição típica industrial: gerador localizado próximo das cargas motóricas e considerando a abertura do disjuntor.

Foram testados os seguintes tipos de curto-circuito:

- Curto trifásico, já testado no cenário 7;
- Curto monofásico;
- Curto bifásico;
- Curto evolutivo monofásico-bifásico;
- Curto evolutivo monofásico-trifásico;
- Curto evolutivo monofásico-bifásico-trifásico;
- Curto evolutivo bifásico-trifásico.

Como foi estudado o curto-circuito monofásico, foi necessário incluir na modelagem o esquema de aterramento típico de um gerador de unidades *offshore*.

Em unidades deste tipo normalmente o gerador é aterrado por alta resistência, limitando a corrente de curto-circuito para um valor na ordem de 25A. Por questões de dimensionamento do resistor de aterramento, muitas unidades optam por utilizar um transformador de aterramento no neutro do gerador de forma a ser possível dimensionar um resistor de menor impedância e, quando o mesmo for refletido para o primário, esta impedância aumentaria proporcionalmente ao quadrado da relação de transformação.

Foi inserido no ATP o valor da resistência de aterramento refletida no primário, assim como a reatância do transformador.

Até o momento foram adotados dois pontos para aplicar o curto-circuito nos quais eram considerados os piores casos para o fenômeno de Zeros Atrasados: no zero de tensão e no pico de tensão.

Para o curto-circuito bifásico ainda existe um terceiro ponto possível que pode implicar em uma condição pior para o fenômeno de Zeros Atrasados, que seria no ponto mínimo de interseção entre as fases que estão sujeitas ao curto-circuito.

A investigação completa de qual curto-circuito provoca o pior tempo para a passagem por zero implica uma combinação de diversos pontos onde serão aplicados os curtos-circuitos. A análise para o curto-circuito evolutivo ainda se torna pior devido as diversas possibilidades de instantes de evolução de curto-circuito.

Como premissa para o curto-circuito evolutivo, além dos pontos de zero de tensão, pico de tensão e mínimo entre as fases no caso do curto-circuito trifásico, será adotada a premissa de que o curto-circuito evolui o mais rapidamente possível e sem a presença de arco elétrico, o que fisicamente não é razoável de ser considerado.

Para os curtos-circuitos analisados foram encontradas 36 possíveis

combinações de curto-circuito com base no resultado das simulações anteriores. A tabela 7 resume o resultado encontrado.

Na tabela 7 ainda foi inserida uma coluna indicando se o tempo para que o disjuntor consiga extinguir o curto ultrapassa o tempo máximo de suportabilidade de arco interno de 15 ms permitido pelo fabricante.

Tabela 7: Resultado do cenário 8 com os diversos tipos de curto-circuito.

Tipo de Curto-Circuito	Zero Atrasado?	Tempo para cruzar o zero após a abertura do DJ (ms)
Trifásico (zero de tensão)	Não	1,3
Trifásico (pico de tensão)	Sim	32,7
Monofásico (zero de tensão)	Não	3,7
Monofásico (pico de tensão)	Não	1,3
Bifásico A-B (zero fase A)	Não	0,6
Bifásico terra A-B (zero fase A)	Não	0,6
Bifásico A-B (pico fase A)	Não	0
Bifásico terra A-B (pico fase A)	Não	0,1
Bifásico A-B (mínimo comum entre A e B)	Não	1,4
Bifásico terra A-B (mínimo comum entre A e B)	Não	1,4
Monofásico (zero A) para bifásico (zero B)	Não	6
Monofásico (zero A) para bifásico (pico B)	Não	2,4
Monofásico (zero A) para bifásico (mínimo entre fases B e C)	Não	4,3
Monofásico (pico) para bifásico (zero)	Não	4,9
Monofásico (pico) para bifásico (pico)	Não	1,8
Monofásico (zero A) para trifásico (zero B)	Sim	23,9
Monofásico (zero A) para trifásico (pico B)	Não	3
Monofásico (zero A) para trifásico (mínimo entre fases B e C)	Sim	20,9
Monofásico (pico A) para trifásico (zero B)	Sim	36,3
Monofásico (pico) para trifásico (pico)	Sim	19,5
Monofásico (zero A) para bifásico (zero B) para trifásico (zero C)	Sim	192,1
Monofásico (zero) para bifásico (pico) para trifásico (zero)	Não	2,9
Monofásico (zero) para bifásico (mínimo entre fases A e B) para trifásico (zero)	Sim	61,8
Monofásico (pico) para bifásico (zero) para trifásico (zero)	Sim	183,6
Monofásico (pico) para bifásico (pico) para trifásico (zero)	Sim	172
Monofásico (zero) para bifásico (zero) para trifásico (pico)	Não	10,1
Monofásico (zero) para bifásico (pico) para trifásico (pico)	Não	3,1
Monofásico (zero) para bifásico (mínimo entre fases A e B) para trifásico (pico)	Não	6
Monofásico (pico) para bifásico (zero) para trifásico (pico de tensão)	Sim	32,5

Monofásico (pico) para bifásico (pico) para trifásico (pico)	Não	4,6
Bifásico (zero A) para trifásico (zero C)	Sim	167,4
Bifásico (pico) para trifásico (zero)	Sim	72
Bifásico (mínimo entre fases A e B) para trifásico (zero)	Não	185
Bifásico A-B (zero A) para trifásico (pico C)	Não	1,9
Bifásico (pico) para trifásico (pico)	Não	3,4
Bifásico (mínimo entre fases A e B) para trifásico (pico)	Não	2,7

Pela tabela 7 concluí-se que, de acordo com a literatura técnica, os curtos-circuitos evolutivos apresentam os piores cenários com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados, mesmo considerando a abertura do disjuntor.

O efeito do curto-circuito evolutivo é basicamente o contrário do efeito da abertura do primeiro polo do disjuntor. Quando aplicamos um curto-circuito trifásico e a primeira fase se extingue, fazendo o curto-circuito virar bifásico, a componente CC da corrente cai levando as outras fases para zeros mais rapidamente e conseqüentemente reduzindo o fenômeno de Zeros Atrasados.

Quando um curto-circuito evolui de bifásico para trifásico, por exemplo, a componente CC do curto-circuito bifásico aumenta quando a falta vira trifásica, aumentando o tempo para que a corrente passe por zero.

O pior caso encontrado para os Zeros Atrasados foi para o curto evolutivo monofásico (zero de tensão A) para bifásico (no zero de tensão da fase B) e para trifásico (zero de tensão na fase C), levando ao disjuntor um tempo de exposição de arco interno de 192,1ms que é muito superior aos 15ms informados no catálogo do fabricante. As figuras 46 e 47 mostram, respectivamente, a tensão e a corrente no disjuntor que vai extinguir o curto-circuito.

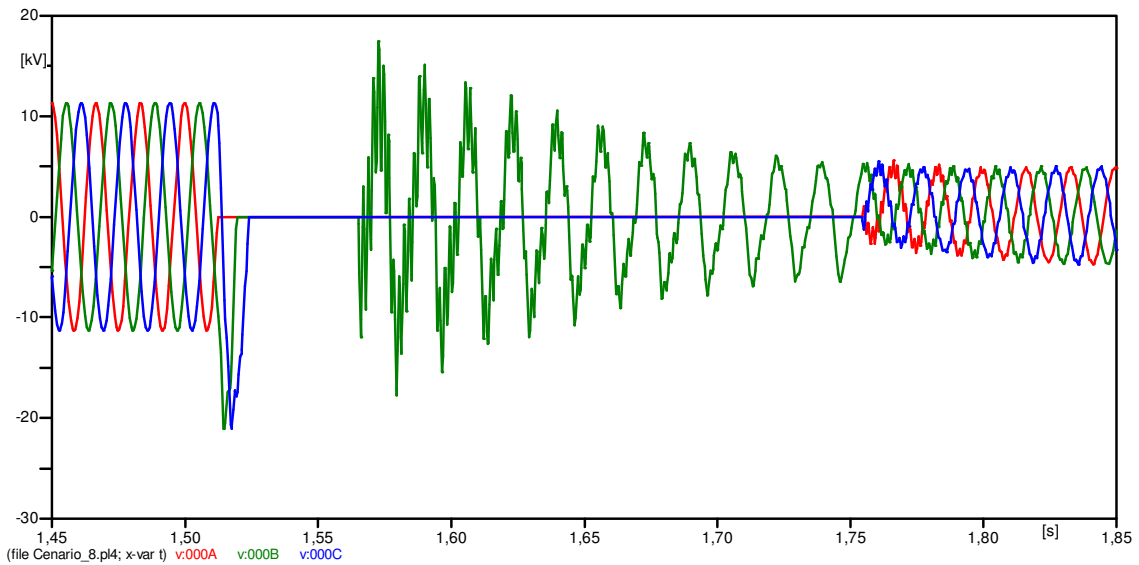


Figura 46: Tensão terminal para o pior caso encontrado no cenário 8.

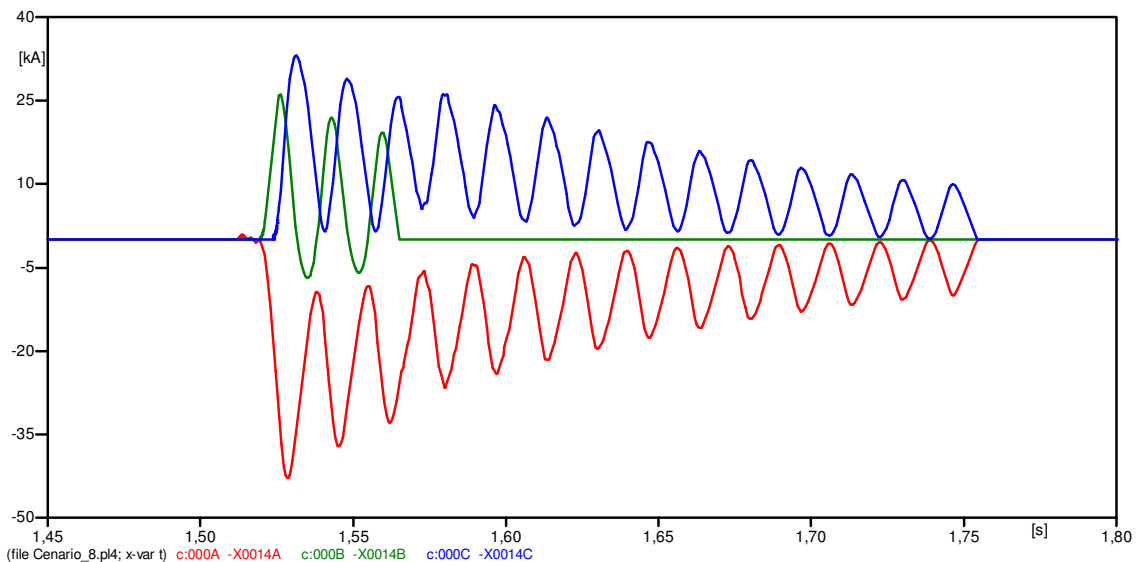


Figura 47: Corrente de curto-circuito para o pior caso encontrado no cenário 8.

Vale ressaltar que os curtos-circuitos evolutivos testados neste cenário foram extremamente teóricos e não foi considerada que a evolução do curto-circuito normalmente é devida ao arco elétrico entre as fases. Ao surgir o arco elétrico o efeito do fenômeno de Zeros Atrasados seria mitigado ou até mesmo anulado.

Além deste efeito foi considerada a evolução do curto-circuito no momento exato que implica a pior condição de assimetria. Um curto-circuito em uma unidade real que seguisse exatamente a combinação exata do momento de evolução e sem a presença de arco elétrico é altamente improvável de ocorrer.

CONCLUSÕES SOBRE OS CENÁRIOS

Este capítulo estudou vários fatores que influenciam o fenômeno de Zeros Atrasados. A tabela 8 mostra um resumo de todos os resultados encontrados nos diversos cenários estudados.

Tabela 8: Resumos dos cenários estudados.

	Momento da aplicação do curto-circuito	Tensão terminal pré-falta (kV)	Tensão induzida pré-falta (kV)	Corrente de armadura pré-falta (A)	Corrente de campo pré-falta (A)	Valor máximo da corrente de campo pós-curto (A)	Tempo de zero atrasado na pior fase (ms)	
Cenário 01	a.1) Zero de tensão	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	82,19	
	a.2) Zero de tensão	17,52	17,52	0	235	1415,70	66,20	
	Pico de tensão	13,79	13,79	0	127,80	1064,16	66,99	
Cenário 02	Zero de tensão FP=0,8 ind	13,81	14,04	1290,31	319,48	1197,75	64,29	
	Pico de tensão FP=0,8 ind	13,81	14,04	1290,31	319,48	1202,24	46,00	
Cenário 03	Zero de tensão FP=0,8 cap	13,78	13,59	1324,41	176,79	734,62	195,80	
	Pico de tensão FP=0,8 cap	13,78	13,59	1324,41	176,79	740,52	181,20	
Cenário 04	Zero de tensão FP=0,5 ind	13,81	14,08	1273,36	338,16	1254,43	48,37	
	Pico de tensão FP=0,5 ind	13,80	14,07	1275,09	338,18	1259,91	14,20	
	Zero de tensão FP=0,95 ind	13,79	13,96	1312,89	296,36	1117,04	80,53	
	Pico de tensão FP=0,95 ind	13,81	13,98	1308,96	296,18	1121,91	63,00	
	Zero de tensão FP=1	13,81	13,87	1341,29	260,81	1044,88	112,74	
	Pico de tensão FP=1	13,81	13,87	1332,75	259,69	1048,12	81,40	
Cenário 05	a)	$R_{arc} = 5 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1048,05	65,39
		$R_{arc} = 10 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1032,66	48,99
		$R_{arc} = 15 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1017,97	48,39
		$R_{arc} = 20 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1003,95	32,46
	b)	$R_{arc} = 5 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	81,80
		$R_{arc} = 10 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	81,52
		$R_{arc} = 15 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	65,80
		$R_{arc} = 20 \text{ m}\Omega$	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	65,55
Cenário 06	Zero de tensão	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	8,10	
	Pico de tensão	13,80	13,80	0	127,80	1064,16	10,58	
Cenário	a.1) Zero de	13,80	-	867,27	206,3	1183,3	214,5	

07 (simulação ATP)	tensão						
	b.1) Pico de tensão	13,80	-	867,27	205,55	1184,2	82,2
	a.2) Zero de tensão + abertura do DJ	13,80	-	867,27	206,3	1183,3	1,3
	b.2) Pico de tensão + abertura do DJ	13,80	-	867,27	205,55	1184,2	32,7

O cenário 1 estudou o gerador a vazio que, segundo diversas referências bibliográficas, é considerado o pior caso para o fenômeno de Zeros Atrasados.

Foi evidenciado que se o gerador for submetido a um curto-circuito com sua tensão terminal superior a nominal, a corrente de curto-circuito pode passar por zero mais rapidamente.

Os cenários 2, 3 e 4 se dedicaram a verificar a influência da carga no fenômeno de Zeros Atrasados. É possível concluir que quando a tensão induzida pré-falta do gerador for maior (corrente de campo maior), mais rapidamente a corrente passará por zero.

Sempre que a tensão interna pré-falta for pequena (menor corrente de campo) significa que a alimentação do curto-circuito é menor e conseqüentemente a componente de corrente alternada será menor, implicando em um achatamento da componente CA enquanto a componente CC decai de acordo com as condições iniciais no instante da falta. Esta característica de enfraquecer a componente CA no período transitório é o que faz o fenômeno de Zeros Atrasados se intensificar.

Para exemplificar graficamente este fenômeno, foi realizada uma simulação adicional com dois geradores alimentando cargas de mesma impedância, mas de fatores de potência diferentes.

A figura 48 mostra a corrente de campo no momento de um curto-circuito nessas duas cargas com fatores de potência diferentes, sendo a carga representada pela cor verde com fator de potência menor do que a carga de cor vermelha.

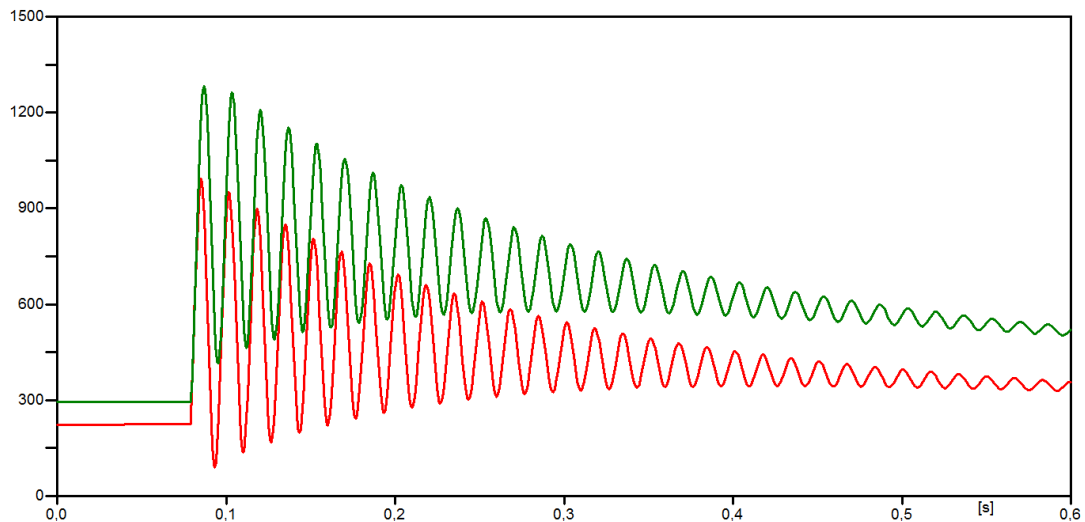


Figura 48: Comparação da corrente de campo (em ampere) de duas cargas de mesma impedância e fatores de potência diferentes (curva superior representa a carga com fator de potência menor).

A figura 49 mostra as correntes de curto-circuito destas cargas. É possível concluir que a carga que possui maior corrente de campo (verde) possui maior corrente na componente transitória, ou seja, está alimentando mais o curto-circuito neste momento e, conseqüentemente, esta corrente passará por zero antes que a carga em vermelho (menor energia no campo).

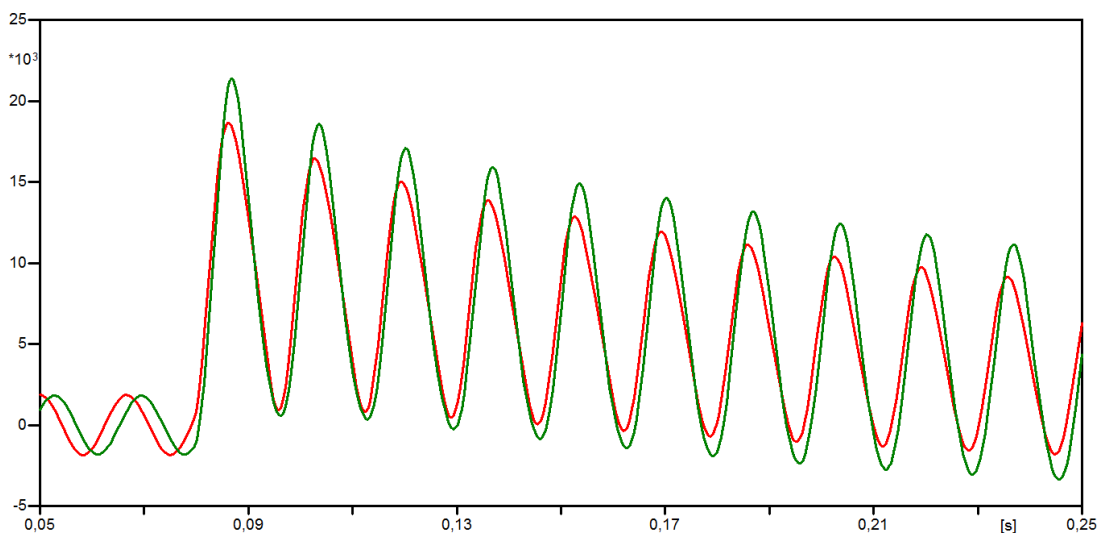


Figura 49: Comparação da corrente de curto-circuito de duas cargas de mesma impedância e fatores de potência diferentes.

Com esta conclusão do efeito da tensão interna (corrente de campo), na intensidade do fenômeno de Zeros Atrasados, se confirma a preocupação de modelar o gerador com o efeito da saturação. A saturação da máquina implica que é necessária uma maior corrente de campo para fornecer a mesma tensão terminal, ou seja, ao se

modelar a saturação da máquina, a condição pré-falta está com uma corrente de campo maior e, conseqüentemente, a corrente de curto-circuito passará por zero mais rapidamente.

É possível fazer uma correlação deste efeito da corrente de campo com o tipo de excitação da máquina. No caso *offshore*, o sistema de excitação é o *brushless* com ímã permanente e a excitação na máquina continua a contribuir para o curto-circuito enquanto o eixo estiver rodando, o que é bom para reduzir o fenômeno de Zeros Atrasados.

Em alguns casos de sistema de potência, a excitação do gerador é derivada da sua própria tensão de linha e posteriormente retificada. Para estes casos, se não existir nada que mantenha a excitação da máquina quando ocorrer um curto-circuito nos terminais do gerador, a corrente de excitação cairá e a corrente de curto-circuito poderá demorar vários ciclos para cruzar o zero [3].

O cenário 5 estudou o efeito da resistência de arco interno ao disjuntor e pode-se concluir que o valor típico para essa resistência (de 2 a 3,2m Ω [3]) não influenciará consideravelmente o fenômeno, podendo ajudar a adiantar a passagem por zero em alguns ciclos em algum caso limite.

O cenário 6 apresentou que a dinâmica do sistema muda consideravelmente no momento da extinção da primeira fase durante o processo de abertura do disjuntor e o pior momento de aplicação do curto-circuito não é mais no zero de tensão para esses casos e sim no pico de tensão.

O fenômeno apresentado na figura 49 é muito parecido com o comportamento do motor de indução, que enfraquece a sua contribuição no período transitório fazendo com que a corrente de curto-circuito demore mais a passar por zero, conforme foi evidenciado no cenário 7.

Além do enfraquecimento da contribuição do motor, foi apresentado no cenário 7 que a frequência da contribuição de corrente do motor vai caindo com o passar do tempo podendo ficar em oposição de fase com a contribuição do gerador, fazendo que neste momento a corrente de curto-circuito total se afaste do zero.

Portanto, através do cenário 7, foi possível concluir que o motor de indução influencia consideravelmente o fenômeno de Zeros Atrasados.

O cenário 8 mostrou que o pior caso para ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados é para curtos-circuitos evolutivos, mas que fisicamente são extremamente difíceis de ocorrer em uma situação real.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE OFFSHORE TÍPICA

Com os resultados das simulações do capítulo 4 e sabendo os fatores que influenciam no fenômeno de Zeros Atrasados, é possível aplicar todo o conhecimento adquirido em uma avaliação de uma planta real de uma unidade marítima de produção.

Por causa da quantidade de geradores e motores de uma planta industrial típica *offshore*, fica inviável fazer a modelagem pelo método de Elementos Finitos e a análise foi feita mais uma vez através do software ATP, que já se mostrou ser adequado para o estudo do fenômeno de Zeros Atrasados.

5.1 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA OFFSHORE TÍPICO

O sistema elétrico de uma plataforma de produção possui algumas características peculiares em comparação a um sistema de potência ou unidade industrial terrestre.

Em razão das longas distâncias envolvidas entre a unidade de produção e a costa, existe uma tendência de utilizar antigos navios petroleiros como planta industrial. A parte do casco do navio é utilizada basicamente para comportar o óleo retirado e sistemas de emergência. Na parte superior do navio, normalmente denominada de *topside*, é instalada toda uma planta industrial responsável por gerar energia para a unidade e fazer todo o processamento primário do produto retirado do poço: óleo, gás, água e resíduos.

Como para realizar o suprimento de energia elétrica da unidade pela terra exigiriam cabos submarinos de elevadas distâncias, normalmente as unidades de produção *offshore* possuem geração própria através de turbo-geradores alimentados pelo próprio gás retirado do poço.

Por requisitos ambientais as plataformas de produção possuem limitação de geração de energia de 100MW, portanto nas unidades de grande porte são instalados quatro geradores de 25MW cada.

Por questões de confiabilidade e flexibilidade para manutenção, é esperado que estejam operando somente três geradores durante a operação e o quarto gerador fique como reserva.

O sistema elétrico possui como principal função acionar as bombas e compressores necessários para o processamento de óleo, tendo como cargas típicas motores de indução com partida direta.

A figura 50 mostra um diagrama unifilar simplificado de uma unidade de produção offshore típica.

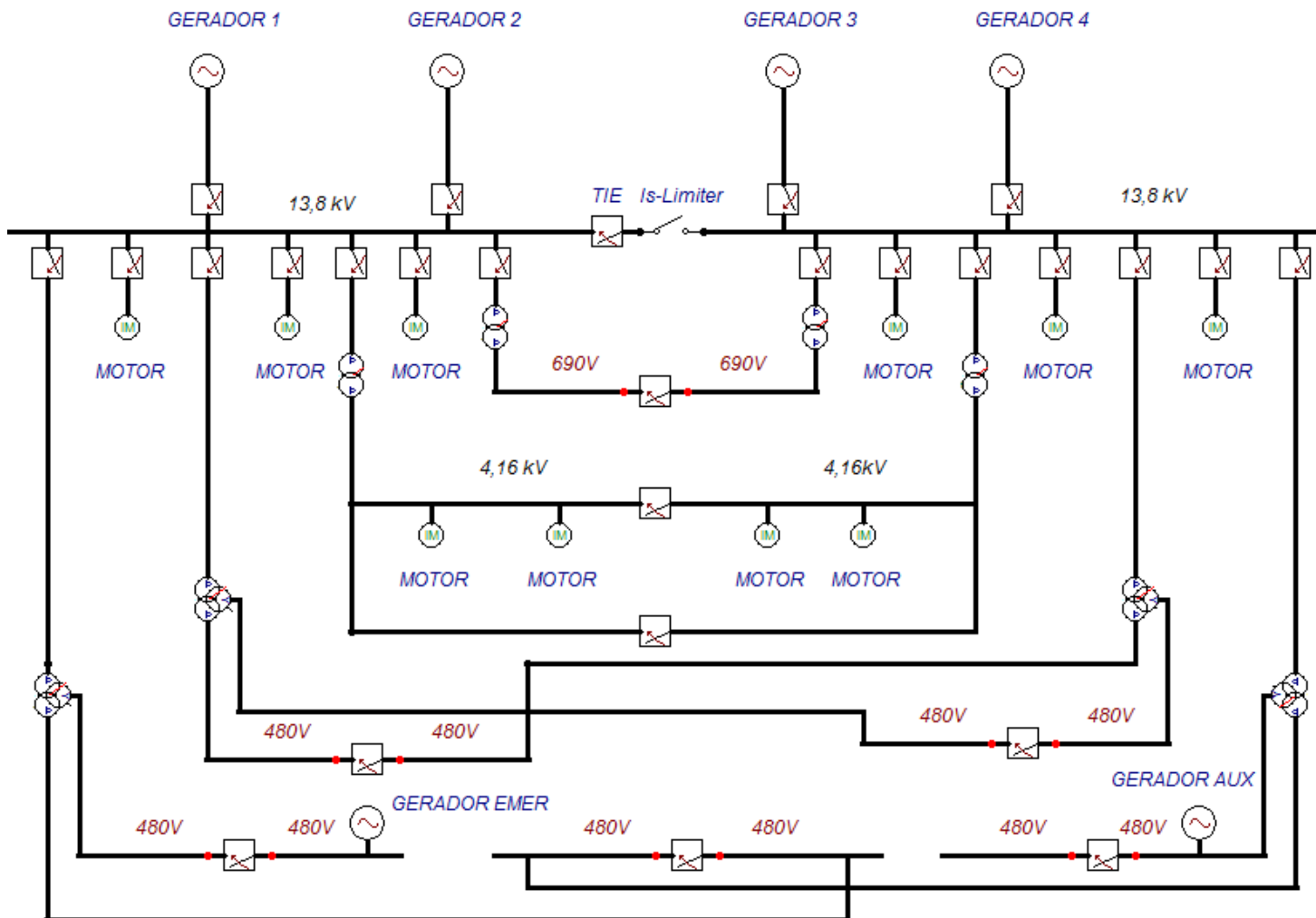


Figura 50: Diagrama unifilar simplificado de uma unidade offshore típica.

A unidade é composta de quatro geradores principais de 13,8 kV e dois geradores em baixa tensão, um de emergência e outro auxiliar. Os geradores de baixa tensão em 480V somente são utilizados em caso de perda da geração principal.

O sistema possui a seguinte distribuição de tensão:

- 13,8 kV: motores de grande porte, podendo chegar a 11MW;
- 4,16 kV: motores de médio porte, normalmente até 1200kW;
- 690 V: aquecedores elétricos;

- 480V: motores de pequeno porte, iluminação e cargas pequenas.

Ao contrário de sistemas de potência, as cargas de maior porte são ligadas diretamente com o gerador principal com distâncias relativamente curtas, na ordem de 200m. Os níveis de tensão inferiores são alcançados através de transformadores abaixadores (de dois e três enrolamentos) redundantes operando normalmente a meia carga. Em caso de contingência, ou manutenção, é possível desenergizar um dos transformadores redundantes e o sistema é capaz de continuar operando.

Para possibilitar esta manobra são utilizados disjuntores de interligação entre os painéis, denominados de disjuntores *TIE*, conforme pode ser observado na figura 50.

Devido ao elevado número de motores de grande porte ligados diretamente no mesmo barramento do gerador principal, o sistema de 13,8kV possui um nível de curto-circuito bastante elevado para um sistema de média tensão industrial deste porte, superior a 50kA.

Para mitigar o efeito do elevado nível de curto-circuito é utilizado um dispositivo limitador de curto-circuito. Este dispositivo limitador não apresenta um nome técnico oficial, sendo mais conhecido pelo nome comercial: Is-Limiter.

De uma forma simplificada, o Is Limiter funciona com uma unidade condutora principal de cobre ligada em paralelo a um fusível de alta capacidade de ruptura. Em condições normais o fluxo de corrente passa através da barra principal, que possui cargas explosivas e um detonador ativado por um sensor. Em caso de disparo, o sensor atua no detonador, do condutor principal, interrompendo-o e fazendo a corrente comutar para o fusível em paralelo, de alta capacidade de ruptura. Devido a característica de utilizar cargas explosivas, estes dispositivos são classificados como dispositivos pirotécnicos [31].

O dispositivo limitador de curto-circuito é muito rápido, atuando em 2ms e tem a capacidade de interromper completamente o circuito muito rapidamente, no primeiro quarto de ciclo (5 ms a 10 ms), quando comparado com o disjuntor que interrompe de 3 a 5 ciclos (50 ms a 80 ms) [31].

A aplicação do Is-Limiter na unidade é de segregar as semi-barras do sistema no momento do curto-circuito evitando a contribuição dos geradores e motores da outra semi-barra, reduzindo assim o nível de curto-circuito de 50 kA para aproximadamente 30 kA.

5.2 PREMISSAS PARA O ESTUDO DE ZEROS ATRASADOS FEITO NO ATP

Para implementar o sistema offshore real no ATP foram adotadas algumas premissas para realizar a melhor modelagem possível.

a) Modelagem com cabos elétricos do sistema:

Como foi apresentado nos capítulos anteriores, a resistência influencia diretamente no fenômeno de Zeros Atrasados e, portanto, os cabos do sistema foram inseridos com os comprimentos e impedância reais para contabilizar o seu efeito amortecedor e mensurar o fenômeno da maneira mais realista possível.

A tabela 9 resume as características dos cabos utilizados nas simulações retirados dos catálogos técnicos da Nexans e Wirex.

Tabela 9: Parâmetros elétricos dos cabos de 15kV - isolação XLPE

Seção Transversal [mm ²]	Parâmetros Elétricos				Classe de tensão	Fabricante
	R1 [Ω/km]	R0 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	X0 [Ω/km]		
70	0,3449	0,5443	0,1334	0,3441	8,7/15kV	Wirex (Tripolar)
95	0,2495	0,3927	0,1271	0,3265	8,7/15kV	Wirex (Tripolar)
120	0,1988	0,3122	0,119	0,3265	8,7/15kV	Nexas (Tripolar)
300	0,0799	0,1271	0,1186	0,3017	8,7/15kV	Nexans (Unipolar)
185	0,1294	0,2039	0,1243	0,2993	3,6/6kV	Wirex (Unipolar)

b) Geradores:

Os geradores foram implementados com as mesmas características de impedância e saturação modelados pelo método de Elementos Finitos e simulado nos cenários do capítulo 4.

c) Motores de 13,8kV:

Os motores de 13,8kV foram modelados individualmente com os valores do circuito equivalente, escorregamento e dados mecânicos de acordo com o informado pelo fabricante.

Como os motores possuem comprimentos de cabos diferentes, potência diferentes, características elétricas diferentes e cargas mecânicas diferentes, o comportamento dos motores no momento do curto-circuito não será igual para todos

os motores. Esta variação de comportamento dos motores faz com que exista um descasamento das contribuições dos motores, podendo influenciar o fenômeno de Zeros Atrasados.

Portanto é importante a modelagem individual dos motores a fim de contabilizar este efeito no momento do curto-circuito.

Para os motores de indução foi utilizado o mesmo modelo do cenário 7 e 8 do capítulo 4.

Como na planta real existe a necessidade de modelar vários motores de indução, o ATP apresenta erro de convergência quando se utiliza mais de três motores do tipo *Universal Machine*.

Para evitar este erro de convergência é necessário inserir um componente auxiliar (*Stub Line*) entre cada motor e a barra. Trata-se de uma linha trifásica transposta que deve ser inserida com o menor comprimento possível, para não interferir no sistema, e com os seus parâmetros de forma que o tempo de propagação de onda da linha seja menor que o passo de integração utilizado na simulação [32].

O passo de integração utilizado no sistema foi de 1×10^{-5} , portanto para escolher os parâmetros do *Stub Line* adequado é necessário que o tempo de propagação neste trecho de linha seja menor que o passo de integração utilizado na modelagem.

Visando adequar a escolha de forma que o trecho de linha interfira o mínimo possível no sistema, foi definido que o tamanho da linha de apenas 10m.

De acordo com [32] o tempo de propagação da linha é dado pela seguinte expressão:

$$tempo = \sqrt{L \cdot C} \cdot comprimento \quad (5.1)$$

e a velocidade de propagação da onda e a impedância característica da linha são dadas pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$v = 1/\sqrt{LC} \quad (5.2)$$

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.3)$$

onde L e C são as indutâncias e capacitâncias da linha de transmissão por unidade de comprimento, respectivamente.

Portando para que a escolha do *Stub Line* esteja adequada, tempo de

propagação da onda na linha de transmissão deve ser inferior a 1×10^{-5} (passo de integração) e de acordo com a expressão 5.1, \sqrt{LC} precisa ser superior a 1×10^{-6} (considerando o comprimento da linha de 10m) e conseqüentemente deve ser escolhida uma velocidade de propagação inferior a 1×10^6 de acordo com a expressão 5.2.

Considerando que \sqrt{LC} deve ser superior a 1×10^{-6} , a impedância para a linha de transmissão, equação 5.3, deve ser escolhida respeitando esta relação.

Qualquer parâmetro para a linha de transmissão trifásica transposta (*Stub Line*) que obedeça às relações calculadas acima são adequadas para garantir a convergência do sistema quando são utilizados mais de três motores do tipo UM3 (*Universal Machine*) no ATP.

Para verificar se o *Stub Line* está influenciando a resposta do sistema foi feita uma comparação do circuito da figura 39 (um gerador e um motor) com e sem o *Stub Line* e a diferença encontrada foi mínima, mostrando que o trecho de linha escolhido não está influenciando consideravelmente no resultado.

d) Sistema de 4,16kV:

O sistema de 4,16kV possui motores de médio porte e, devido ao transformador abaixador, não é esperado que esses motores influenciem consideravelmente no fenômeno de Zeros Atrasados para curtos-circuitos no sistema de 13,8kV.

Para manter o conservadorismo da análise, os motores de 4,16kV foram modelados como motores equivalentes e sem cabos, de forma a ter a pior contribuição possível desse sistema de média tensão.

e) Sistema de baixa tensão:

O sistema de baixa tensão da unidade possui motores de pequeno porte e transformadores que mitigarão o efeito do fenômeno de Zeros Atrasados, portanto todo o sistema de baixa tensão foi modelado como uma carga R-L com impedância e fator de potência de forma a consumir uma corrente do gerador equivalente ao sistema real.

f) Regulador de tensão:

Tendo em mente que o gerador em questão possui sistema de excitação *Brushless* com ímã permanente e que a resposta do regulador de tensão é na ordem de 120ms, para análise do fenômeno de Zeros Atrasados, não é necessário a modelagem dos reguladores de tensão e velocidade, já que quando estes começarem a influenciar o sistema o fenômeno já terá ocorrido.

O efeito do regulador de tensão para um curto-circuito é de aumentar a corrente de campo do gerador e, como já foi concluído no capítulo 4, esse efeito tende a acelerar a passagem da corrente por zero. Portanto, o fato de não utilizar o regulador de tensão na simulação é uma medida conservadora com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados.

g) Resistência de arco interno ao disjuntor:

Para a simulação real serão considerados os dados do catálogo do disjuntor a vácuo os quais são ensaiados para sistemas de distribuição. Segundo o catálogo do fabricante, a tecnologia para a extinção do arco é a TMF (*Transverse Magnetic Field*) [27].

Mesmo sabendo que a tensão do arco é não-linear, é possível considerar que a tensão média de arco é da ordem de 100V a 150V para a tecnologia TMF.

Para níveis de curto-circuito típicos de unidades offshore e considerando a tecnologia TMF para o disjuntor, a resistência elétrica típica no momento da abertura dos contatos do disjuntor é na ordem de 3m Ω para arco de 150V e 2m Ω para arco de 100V [5].

Segundo o catálogo do fabricante [27], o disjuntor a vácuo em questão suporta o arco interno por um tempo máximo de 15ms sem danificar o equipamento.

Devido à dificuldade de representar de maneira realista a o arco elétrico, as simulações realizadas no ATP serão feitas sem a utilização de resistência interna do disjuntor e, caso o valor de tempo de arco seja superior os 15ms, será inserida uma resistência de arco somente para a verificar se a mesma é eficaz a fim de solucionar o problema de Zeros Atrasados, mesmo sabendo que a representação linear não representa fisicamente o comportamento do arco elétrico.

h) Tempo de abertura do disjuntor

O disjuntor real utilizado na plataforma é um disjuntor trifásico a vácuo. Para fins de simulação no ATP foi utilizado chaves monofásicas ideais que abrem simultaneamente no instante de abertura do disjuntor.

Segundo o catálogo do fabricante e relatório de testes, o disjuntor demora de 33 a 63ms para a fazer a abertura dos seus contatos [27] [33].

Quando ocorre um curto-circuito o relé precisa de um tempo para processar antes de enviar o comando de abertura do disjuntor, portanto além do tempo de abertura dos contatos do disjuntor, é necessário aguardar por volta de 17ms para o processamento do relé [34].

Com isso, o tempo para que o disjuntor abra seus contatos e comece o efeito do arco interno à câmara do disjuntor varia de 50ms a 80ms.

i) Atuação do Is-Limiter

O Is-Limiter é utilizado para reduzir o nível de curto-circuito do painel de 13,8kV para níveis suportáveis.

Se a condição operacional for somente com um ou dois geradores no sistema não existe a necessidade de atuação do Is-Limiter e o mesmo é bloqueado.

Portanto, o Is-Limiter será simulado somente para as condições operacionais com 3 e 4 geradores.

O dispositivo real de limitação de curto-circuito sensibiliza em 2ms e extingue completamente o curto-circuito em 4ms, ilhando o sistema seccionando o painel principal de 13,8kV.

Para fins de simulação não será representado o efeito de extinção do curto-circuito pelo Is-Limiter e será ajustada a abertura ideal da chave para ilhar as semi-barras do sistema de 13,8kV 2ms após a aplicação do curto-circuito.

5.3 SIMULAÇÃO FEITA NO ATP E RESULTADOS

Para verificar se os disjuntores a vácuo da unidade estão sujeitos a problemas com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados, foram feitas várias simulações com o intuito de constatar em cada condição operacional a existência do fenômeno.

A condição operacional do gerador operando a vazio foi simulada no cenário 6 do capítulo 4 e foi constatado que o tempo de arco é inferior aos 15ms informados no catálogo do fabricante.

Para averiguar as diversas condições operacionais do sistema, serão simulados os seguintes casos da planta industrial *offshore*:

- Caso 1: 4 geradores sem atuação do Is-Limiter;
- Caso 2: 4 geradores com atuação do Is-Limiter;
- Caso 3: 3 geradores sem atuação do Is-Limiter;
- Caso 4: 3 geradores com atuação do Is-Limiter e 1 geradores na barra A;
- Caso 5: 3 geradores com atuação do Is-Limiter e 2 geradores na barra A;
- Caso 6: Planta com 2 geradores e demanda do sistema de acordo com a geração (sem atuação do Is-Limiter).

Os casos 1 e 3 não precisariam ser realizados uma vez que foi estabelecida a premissa que o Is-Limiter está habilitado com 3 e 4 geradores. Estes casos foram simulados para verificar se existe a influência da atuação do Is-Limiter no fenômeno de Zeros Atrasados.

Além das condições operacionais foi necessário avaliar as piores posições de aplicação de curto-circuito no sistema e verificar qual disjuntor apresenta risco de dano devido ao tempo prolongado de arco interno.

Os seguintes pontos devem ser verificados:

- A) Na barra A, na saída de um transformador;
- B) Na barra B, na saída de um transformador;
- C) Nos terminais do motor com menor resistência de cabo, simulando um curto-circuito e atuação da proteção instantânea diferencial auto-balanceda do motor (função ANSI 87);
- D) Entre o gerador e a barra, simulando a abertura da função diferencial ou direcional instantânea do gerador (funções ANSI 87 e 67 respectivamente).

A figura 51 mostra um diagrama unifilar resumido, indicando os pontos onde foram aplicados os curtos-circuitos.

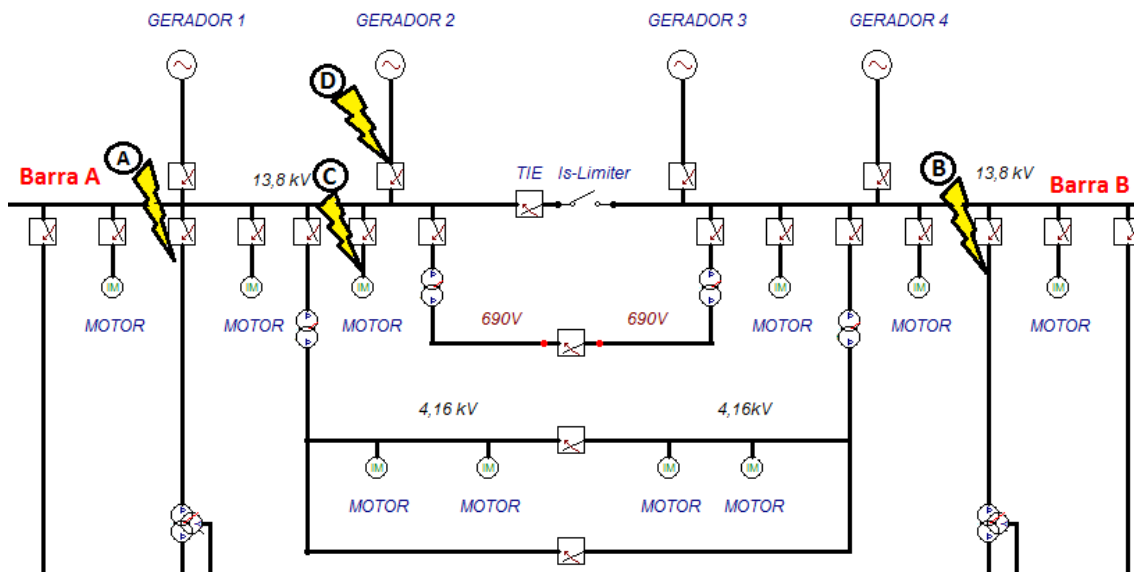


Figura 51: Aplicação dos curtos-circuitos na simulação da planta real Offshore.

Em cada caso foram aplicados o curto-circuito trifásico e o pior curto-circuito evolutivo constatado no capítulo 4: evolução do curto-circuito monofásico (no zero de tensão) para curto-circuito bifásico (no zero de tensão) para curto-circuito trifásico (no zero de tensão).

A figura 52 apresenta o diagrama unifilar montado no ATP para a planta real a ser estudada.

Da mesma maneira que foi feita nos cenários 7 e 8, foi utilizada uma fonte ideal auxiliar para partir todo o sistema (AUX-GEN na figura 52) e os geradores se encontram alimentando cargas auxiliares com a mesma impedância equivalente e fator de potência do sistema em regime permanente.

Após a partida de todos os motores, o sistema auxiliar é retirado da simulação e os geradores passam a alimentar os motores.

Este artifício foi utilizado para não precisar fazer a modelagem dos reguladores de tensão (AVR) e velocidade (Governador).

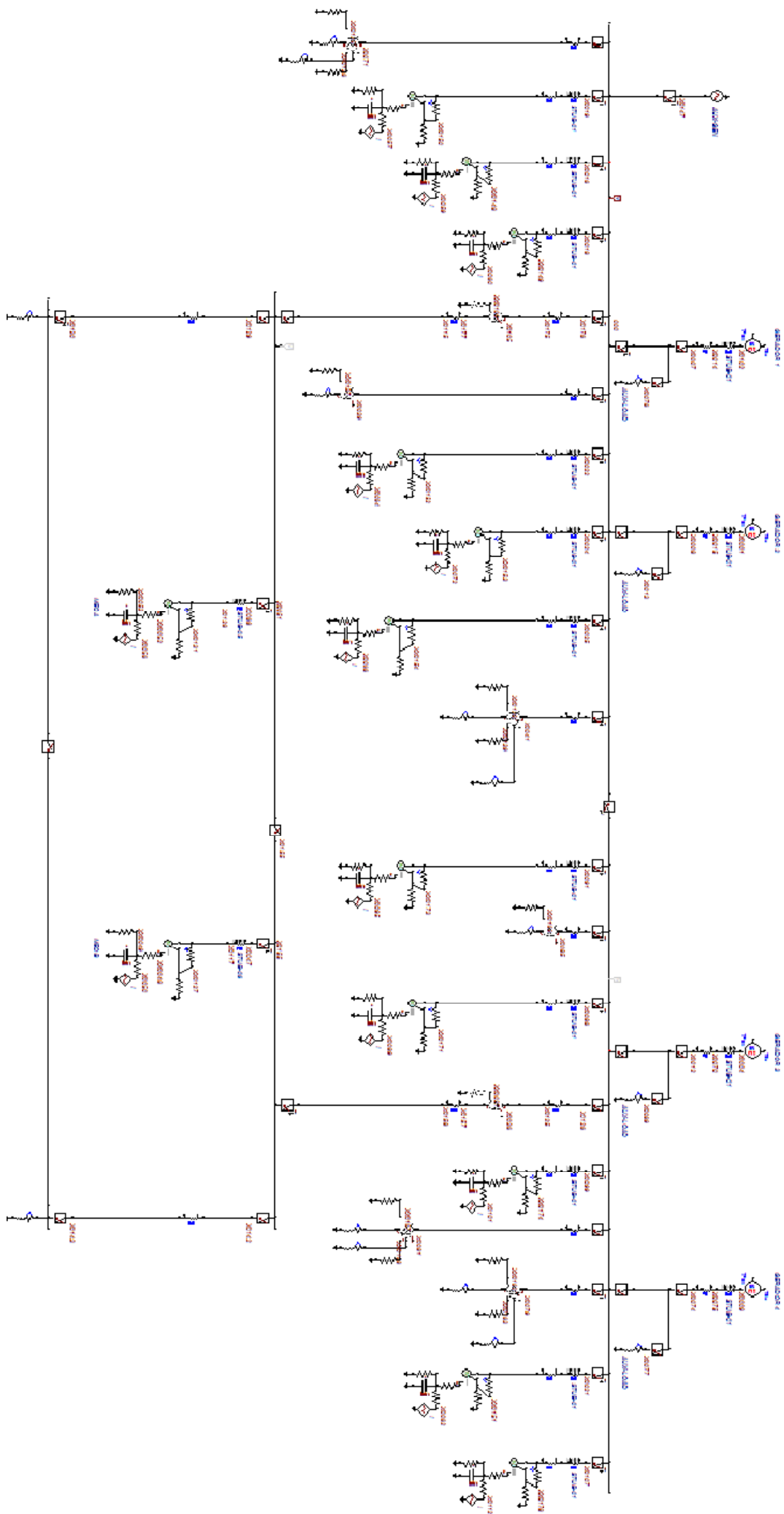


Figura 52: Montagem da simulação no ATP.

Teoricamente, a pior localização para ocorrer a falta no sistema em análise é a posição D da figura 51. Neste ponto a passagem da corrente pelo disjuntor será a contribuição de todos os motores do sistema (ou da semi-barra, se considerar a abertura do Is-Limiter) e o gerador vizinho ao terminal onde está ocorrendo a falta, já que o gerador em que ocorre a falta não contribui com corrente para aquele disjuntor.

Neste caso haverá uma grande quantidade de motores para e somente um gerador, fazendo com que o peso da contribuição dos motores se agrave implicando uma maior probabilidade de ocorrer o fenômeno de Zeros Atrasados devido à características dos motores de indução destacados nas figuras 41 e 44.

Com isso era esperado que os casos 2.D, 5.D e 6.D sejam os piores cenários para a ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados.

Sabendo que existe uma grande incerteza com relação ao momento da abertura do disjuntor, de 50ms a 80ms, foi necessário fazer uma análise de qual seria a pior condição de abertura do disjuntor. Se a abertura do disjuntor ocorrer o mais rápido possível (50ms) estaríamos em uma condição de alta componente CC, mas caso ocorra a abertura mais lenta possível (80ms) estaríamos com a mínima contribuição motórica no sistema e possivelmente com a contribuição do motor em oposição de fase com a contribuição do gerador, conforme apresentado na figura 41.

Antes de ser feita a análise dos curtos-circuitos nos casos estabelecidos foi feito um estudo visando entender o comportamento do curto-circuito em toda a gama de possibilidades de abertura do disjuntor, ou seja, foram aplicados curtos-circuitos trifásicos francos no caso 2.D (teoricamente um dos piores cenários), no pico de tensão da fase A, variando o momento da abertura do disjuntor na simulação de 50ms a 80ms, com passos de 2ms.

A figura 53 mostra a corrente de curto-circuito trifásica para um tempo de abertura do disjuntor de 50ms para o caso 2.D. Observando o resultado, tem-se 10,2ms de tempo de arco, o que é inferior ao recomendado pelo fabricante, levando à conclusão de que não existe problemas com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados para este caso.

A figura 54 mostra a corrente de curto-circuito trifásica para as mesmas condições aplicadas na figura 53, mas considerando o tempo de abertura do disjuntor de 52ms.

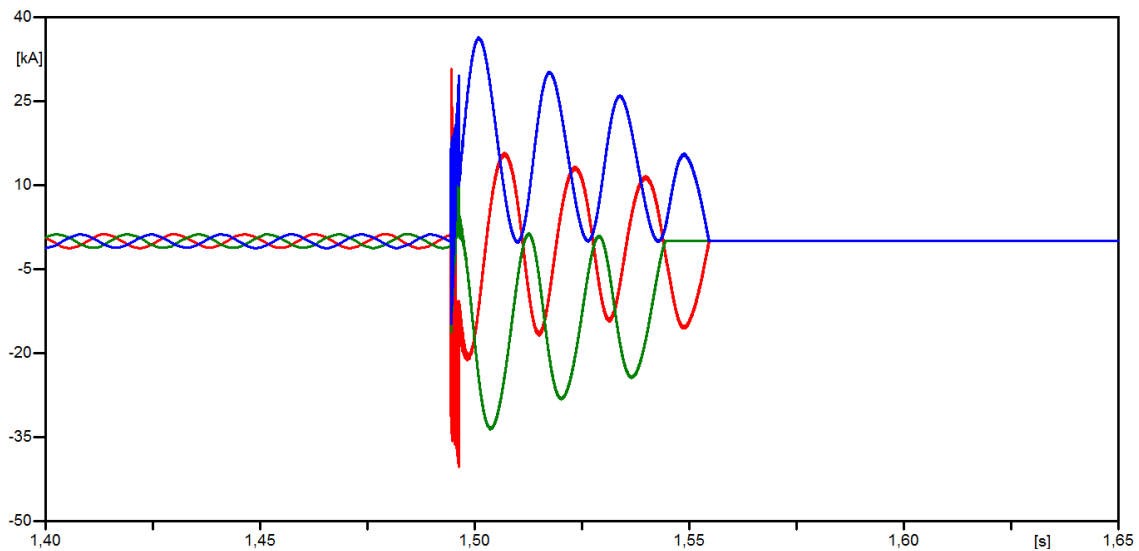


Figura 53: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 50ms (vermelho fase A, verde fase B e azul fase C).

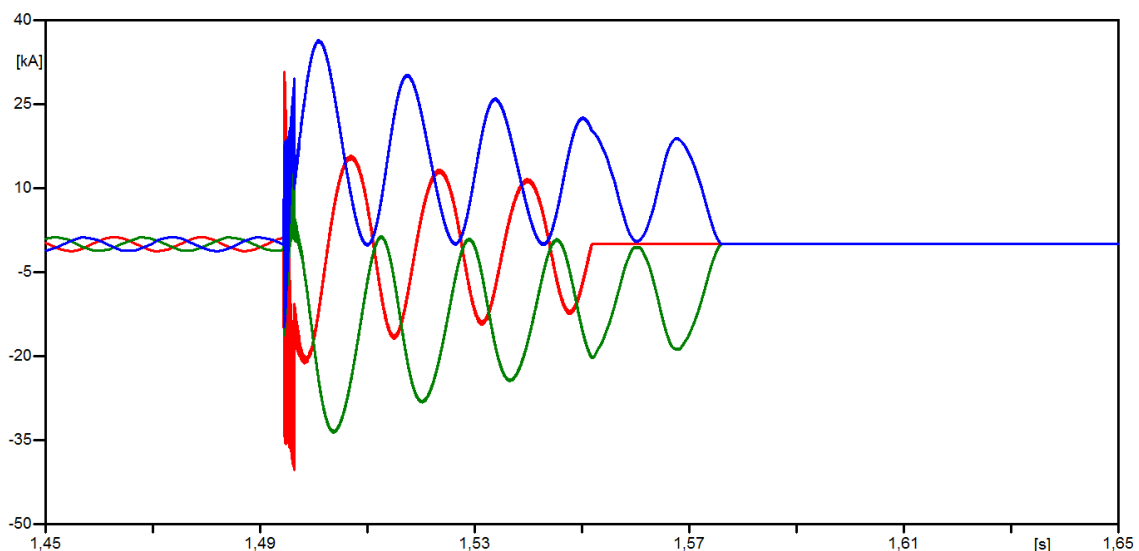


Figura 54: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 52ms (vermelho fase A, verde fase B e azul fase C).

Pela figura 54 observa-se a existência de um tempo de arco interno ao disjuntor de 29,5ms, praticamente o dobro do suportado pelo disjuntor no catálogo do fabricante.

A diferença no tempo de abertura entre as figuras 53 e 54 é de 2ms e este período não seria suficiente para que o decaimento CC ou a contribuição dos motores mudassem consideravelmente. A explicação para a mudança expressiva com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados é que na figura 53 a primeira fase a se extinguir é a fase B e na figura 54 a primeira fase a se extinguir é a fase A, mesma fase onde foi aplicado o curto-circuito no pico de tensão.

O ANEXO 2 mostra os resultados das simulações para toda a gama de

possibilidades de abertura do disjuntor, variando o tempo entre as simulações de 2 em 2ms.

Analisando os resultados do ANEXO 2 conclui-se que se a primeira fase a se extinguir for a mesma fase onde foi aplicado o curto-circuito, no pico de tensão, ocorre o máximo fenômeno de Zeros Atrasados.

A tabela 10 apresenta um resumo dos resultados encontrados para este estudo de caso específico, deixando claro que, ao modificar o tempo de abertura do disjuntor, a abertura da primeira fase pode ser a mesma onde foi aplicado o curto-circuito e, conseqüentemente, ocorre o fenômeno de Zeros Atrasados. Caso a primeira fase a se extinguir não for aquela em que ocorreu o curto-circuito (fase A), o fenômeno de Zeros Atrasados não é tão expressivo.

Tabela 10: Resultados para o caso 2.D considerando as possibilidades de tempo de abertura do disjuntor.

Tempo de abertura do disjuntor (ms)	Tempo para última fase passar por zero (ms)
50	10,2
52	30,0
54	27,6
56	25,5
58	8,0
60	6,0
62	4,0
64	2,0
66	10,5
68	8,5
70	138,2
72	136,1
74	8,3
76	6,4
78	4,3
80	2,3

Pela tabela 10 somente 31% dos curtos-circuitos aplicados apresentaram tempo de arco superior ao suportado pelo disjuntor. Além disso, o curto-circuito foi aplicado em um momento específico da curva de tensão (pico de tensão), mostrando que a probabilidade de ocorrer um curto-circuito com Zeros Atrasados é muito baixa.

A figura 55 mostra o caso da abertura do disjuntor com 70ms, implicando um tempo para que a última fase passe por zero de 138,7ms, sendo o pior caso encontrado devido à redução da contribuição dos motores na componente CA do curto-circuito e o descasamento de frequência da contribuição do gerador com a contribuição dos motores.

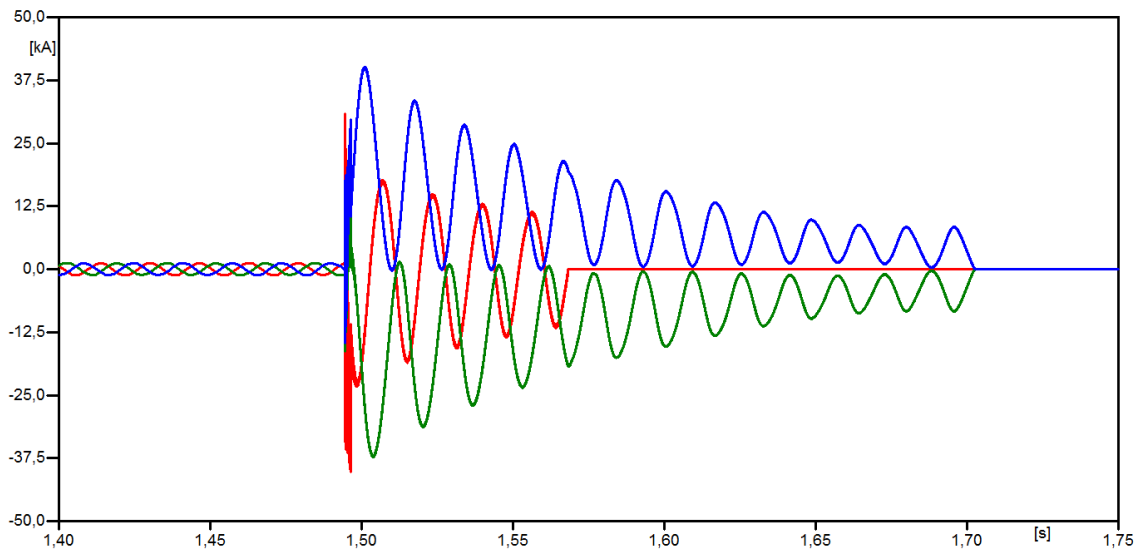


Figura 55: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 70ms.

Com esta análise adicional foi possível concluir que, para inferir se o fenômeno de Zeros Atrasados existe, é necessário analisar, devido à incerteza do tempo de abertura do disjuntor, qual é a primeira fase a ser extinta e ponderar o que é mais predominante no sistema: máxima componente CC ou redução da frequência e amplitude da contribuição da componente CA dos motores.

Para o cenário 2.D a redução da frequência e amplitude na contribuição dos motores pesou mais no fenômeno de Zeros Atrasados que o curto-circuito no momento de maior componente CC.

Portanto, para avaliar se existe o fenômeno de Zeros Atrasados em cada caso da planta *offshore* em questão, é necessário verificar a aplicação do curto-circuito em pelo menos dois pontos:

- Momento de máxima componente CC e extinção da primeira fase igual à fase onde foi aplicado o curto-circuito no pico de tensão (próximo de 50ms);
- Momento de mínima contribuição motórica e extinção da primeira fase igual à fase onde foi aplicado o curto-circuito no pico de tensão (próximo de 80ms).

A tabela 11 mostra os resultados dos casos com os curtos-circuitos trifásicos, considerando os extremos de abertura do disjuntor e extinção da primeira fase igual à fase onde foi aplicado o curto-circuito no pico de tensão.

Foi inserida na tabela 11 uma coluna informando se existem problemas com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados, utilizando o critério do disjuntor estar sujeito a um arco elétrico interno por um tempo superior a 15ms [27] e/ou ser necessário a

utilização de uma resistência de arco superior a 3,2mΩ, que é o limite de resistência de arco [5].

Tabela 11: Resultado para os sistema real e curtos-circuitos trifásicos.

Caso		Abertura tempo mínimo do disjuntor (ms)	Tempo para cruzar o zero (ms)	Abertura tempo máximo do disjuntor (ms)	Tempo para cruzar o zero (ms)	R _{arco} (mΩ)	Zero Atrasado?
1	A	52	12,7	70	10,7	-	NÃO
	B	52	12,7	70	10,7	-	NÃO
	C	54	7,7	70	7,8	-	NÃO
	D	52	13,2	70	11,1	-	NÃO
2	A	52	28,7	70	11,4	-	SIM
	A	52	12,9	-	-	2	NÃO
	B	52	12,2	70	9,0	-	NÃO
	C	54	8,4	70	8,4	-	NÃO
	D	52	30,0	70	138,2	-	SIM
	D	52	29,1	70	27,7	3,2	SIM
3	A	52	12,4	68	12,2	-	NÃO
	B	52	12,4	68	12,2	-	NÃO
	C	54	7,4	80	4,8	-	NÃO
	D	52	28,5	68	28,2	-	SIM
	D	52	12,6	68	13,1	2	NÃO
4	A	52	153,5	68	122,1	-	SIM
	A	52	28,7	68	28,5	3,2	SIM
	B	52	11,5	68	11,0	-	NÃO
	C	54	8,6	80	4,5	-	NÃO
	D	52	48	68	32,1	-	SIM
	D	52	30,8	68	31,6	3,2	SIM
5	A	52	12,5	68	12,8	-	NÃO
	B	52	12,0	68	11,8	-	NÃO
	C	54	7,7	80	4,1	-	NÃO
	D	52	44,7	68	122,1	-	SIM
	D	52	28	68	29,3	3,2	SIM
6	A	54	26,7	72	7,9	-	SIM
	A	54	11,2	72	-	2	NÃO
	B	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	C	54	8,5	80	3,4	-	NÃO
	D	54	120,6	72	101,0	-	SIM
	D	54	27,3	72	71,0	3,2	SIM

Pela tabela 11 foram encontrados diversos casos onde é possível a ocorrência de um tempo de arco interno superior ao limite do disjuntor.

O tempo de abertura do disjuntor foi variado em cada caso, pois para simular a pior condição para o fenômeno de Zeros Atrasados é necessário que a primeira fase a ser extinta seja a mesma em que ocorreu o curto-circuito trifásico no pico de tensão

Todos os casos simulados para o curto-circuito trifásico franco localizado na

posição C, ou seja, nos terminais do motor, não indicaram problemas relacionados ao fenômeno de Zeros Atrasados.

Como era esperado, os curtos-circuitos localizados na posição D foram os piores casos encontrados, mostrando que o disjuntor que está sujeito à pior condição de assimetria é o que protege o gerador.

Comparando o caso 1 com o caso 2, observa-se que a simulação da abertura do Is-Limiter influencia no resultado da simulação.

O pior caso encontrado analisado, sem considerar a resistência de arco para o sistema, foi a falta no lado da geração (posição D) para o caso 2, conforme figura 55. Considerando a resistência de arco interna ao disjuntor, o pior caso encontrado foi o 6.D.

Pelos resultados da tabela 11 observa-se que a utilização da modelagem do arco de maneira linear ajudou em alguns casos, mas não foi suficiente para evitar que ocorresse um tempo elevado para corrente passar por zero.

A figura 56 apresenta a contribuição para o curto-circuito da corrente da fase A para três motores diferentes simulados no caso 1.D, demonstrando a importância da modelagem individual dos motores do sistema de 13,8kV.

É possível observar que devido à inércia, potência e parâmetros diferentes dos motores o descasamento de frequência, após o curto-circuito, para cada motor ocorre em instantes diferentes e essa característica influencia diretamente no fenômeno de Zeros Atrasados.

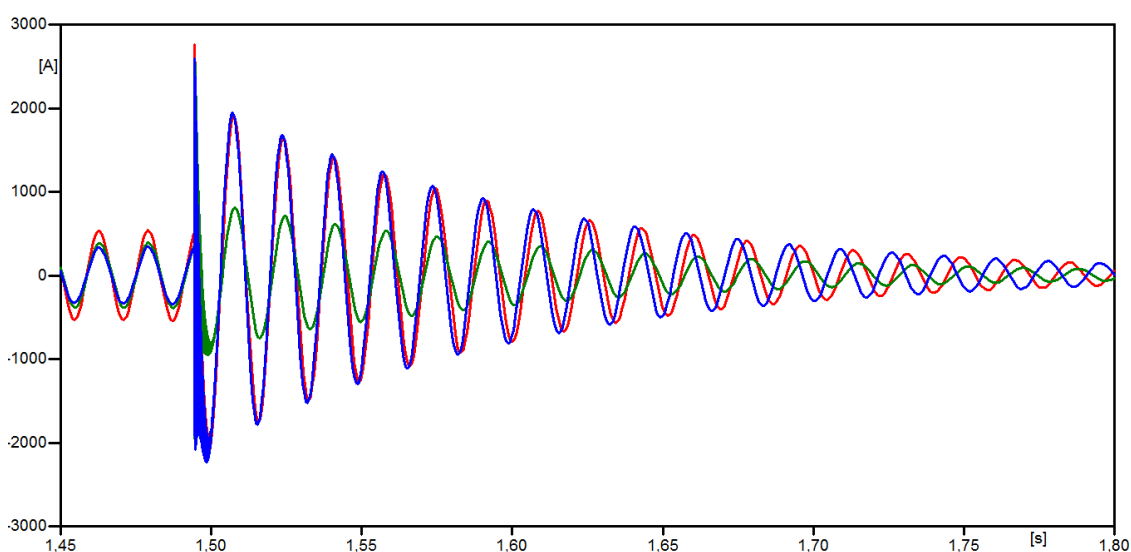


Figura 56: Contribuição para curto-circuito da fase A para três diferentes motores para o caso 1.D.

A tabela 12 mostra os resultados com o curto-circuito evolutivo. Da mesma maneira que foi feito com o curto-circuito trifásico foi inserido na tabela um indicativo para verificar se existem problemas com o fenômeno de Zeros Atrasados, utilizando neste caso o critério do disjuntor estar sujeito a um arco elétrico interno por um tempo superior a 15ms [27]. Como já foi constatado que o curto-circuito evolutivo é a pior condição para o fenômeno de Zeros Atrasados, não será feita a investigação da incerteza do momento da abertura do disjuntor nestes casos, sendo avaliada somente a abertura em 55ms.

Tabela 12: Resultados o sistema real e curtos-circuitos evolutivos.

Caso	Tempo de abertura do disjuntor (ms)	Tempo para cruzar o zero (ms)	Zero Atrasado?	
1	A	55	84,7	SIM
	B	55	77	SIM
	C	55	8,7	NÃO
	D	55	109,1	SIM
2	A	55	108,8	SIM
	B	55	60,8	SIM
	C	55	9,4	NÃO
	D	55	172,9	SIM
3	A	55	115,4	SIM
	B	55	115,4	SIM
	C	55	3,6	NÃO
	D	55	162,3	SIM
4	A	55	177,8	SIM
	B	55	67,5	SIM
	C	55	3,0	NÃO
	D	55	455	SIM
5	A	55	99,7	SIM
	B	55	131,1	SIM
	C	55	2,6	NÃO
	D	55	178	SIM
6	A	55	113,8	SIM
	B	N.A.	N.A.	N.A.
	C	55	2,3	NÃO
	D	55	160,2	SIM

Para o curto-circuito evolutivo, foram encontrados problemas com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados em várias condições operacionais, podendo existir um arco interno ao disjuntor por um período de aproximadamente 180ms.

Pela tabela 12 observamos que apesar do curto-circuito evolutivo apresentar uma pior condição do fenômeno, as faltas localizadas nos terminais dos motores não evidenciaram que tal fato é um problema.

Vale destacar que para ocorrer um curto-circuito evolutivo em um sistema

industrial de acordo com o que foi simulado, é necessária uma sequência específica de eventos fazendo com que a análise destes casos se torne muito teórica e de baixíssima probabilidade real de ocorrer.

Devido à remota ocorrência dos curtos-circuitos evolutivos, não foi feita a análise de sensibilidade para observar se a resistência de arco interno seria suficiente para mitigar o fenômeno.

A figura 57 mostra a simulação do caso 6.D, sendo possível notar como o curto-circuito evolutivo agrava o fenômeno de Zeros Atrasados em comparação à figura 55 para curto-circuito trifásico.

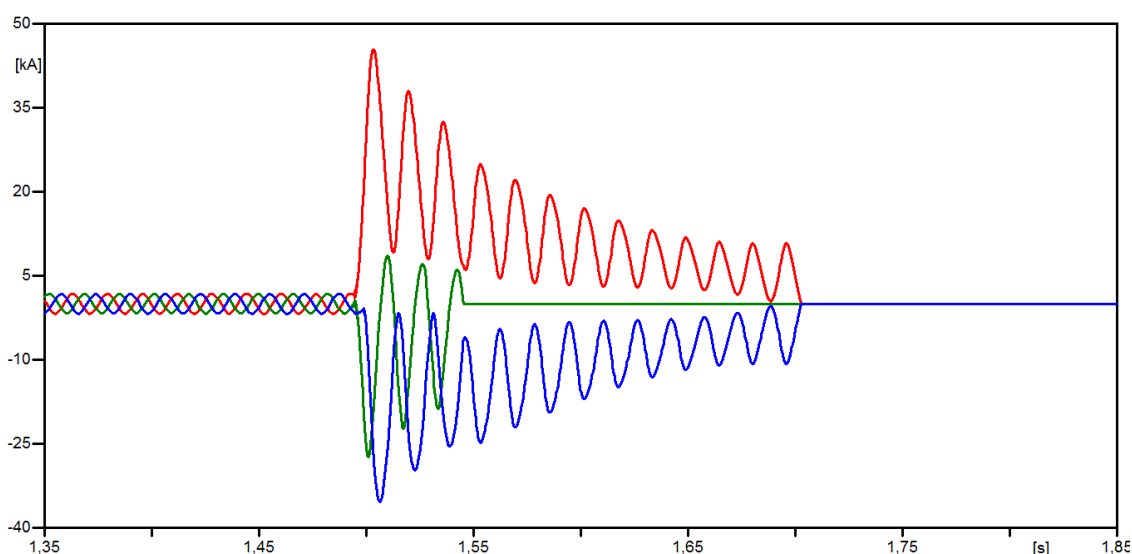


Figura 57: Simulação do caso 6.D para curto-circuito evolutivo.

5.4 POSSÍVEIS SOLUÇÕES PARA EVITAR O PROBLEMA DO FENÔMENO DE ZEROS ATRASADOS

Pelos resultados das simulações de uma unidade real *offshore* conclui-se que, apesar de ser baixa, existe a probabilidade da ocorrência de curtos-circuitos com altas assimetrias que podem danificar o disjuntor e comprometer o sistema elétrico da plataforma.

A fim de solucionar o problema é possível adotar algumas medidas para que o fenômeno de Zeros Atrasados não comprometa a integridade física do disjuntor:

- **Atraso intencional na proteção instantânea:** a solução de menor impacto econômico seria introduzir atrasos intencionais na proteção instantânea de

forma a esperar o nível CC cair a valores onde seria segura realizar a abertura do disjuntor.

- ✓ A desvantagem desta solução seria deixar os equipamentos elétricos sujeitos a um maior tempo de exposição ao curto-circuito, o que pode implicar em maiores danos as máquinas.
- ✓ O atraso intencional da proteção deve ser investigado de maneira criteriosa, pois segundo a tabela 10, dependendo da condição operacional do sistema, o disjuntor que abrir o curto-circuito em um tempo maior pode piorar o fenômeno de Zeros Atrasados.
- **Utilização de disjuntores de geradores:** a inclusão de disjuntores de geradores testados para suportar altos arcos internos seria outra solução aceitável para o fenômeno de Zeros Atrasados. Desta forma, o disjuntor estaria preparado para suportar as altas assimetrias do sistema.
 - ✓ A desvantagem desta solução é a restrição de espaço das unidades *offshore*, já que disjuntores de geradores são normalmente bem maiores que disjuntores de distribuição.
 - ✓ Outra desvantagem com relação ao uso de disjuntores de geradores é o aspecto econômico.
- **Utilização de disjuntores a SF6:** os disjuntores a SF6 possuem a tensão de arco muito superior aos disjuntores a vácuo, inserindo uma resistência maior e conseqüentemente fazendo com que a corrente de curto-circuito cruze o zero mais rapidamente.
 - ✓ Para verificar a possibilidade de implementação desta solução é necessário fazer uma pesquisa de mercado de forma a confirmar a existência de disjuntores a SF6 para 50 kA.
 - ✓ A desvantagem deste tipo de solução é ir contra a tendência de mercado de substituir os disjuntores a SF6 por disjuntores a vácuo.
- **Escolha dos parâmetros do gerador:** uma medida mitigadora que poderia ser tomada é a escolha adequada dos parâmetros do gerador no momento da compra da máquina, desta forma poderia ser otimizada o X/R do gerador e a relação $x'd/x''d$.
 - ✓ Devido a topologia do sistema, mesmo escolhendo características mais favoráveis para o gerador é possível que o fenômeno de Zeros Atrasados continue ocorrendo devido a contribuição dos motores de indução.
- **Uso de Inversores de Frequência:** a utilização de inversores de frequência que não contribuem para curto-circuito é uma solução para evitar a

contribuição dos motores de indução e conseqüentemente reduzir o efeito de Zeros Atrasados da planta industrial.

- ✓ Desvantagem desta solução é o tamanho necessário para os painéis dos Conversores de Frequência deste porte. Necessário avaliar disponibilidade física de espaço na plataforma.
- **Resistência de pré-inserção:** Para adiantar a passagem de corrente por zero poderiam ser inseridas resistências somente no momento do curto-circuito e conseqüentemente adiantar a passagem da corrente por zero.
 - ✓ É necessário avaliar a viabilidade técnica e econômica deste tipo de solução, principalmente devido à restrição de espaço das unidades.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a teoria básica com relação ao fenômeno de Zeros Atrasados, mostrando a modelagem básica analítica existente na literatura e as implicações da ocorrência de tal fenômeno em uma planta industrial *offshore*.

Foram apresentadas resumidamente as diferenças de topologia de um sistema de potência e um sistema industrial isolado com relação ao que pode influenciar na ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados. Destaca-se também a característica do sistema industrial possuir motores de indução muito próximos à geração e a utilização de disjuntores a vácuo fabricados para sistemas de distribuição a fim de proteger os geradores.

Para analisar o que influencia o fenômeno, foram utilizados os dados construtivos do gerador, fornecidos pela Weg, de forma a possibilitar a modelagem da máquina através do método de Elementos Finitos.

De posse de um modelo coerente do gerador, foram feitas diversas simulações, divididas em cenários, de forma a analisar mais detalhadamente os aspectos que influenciam o fenômeno de Zeros Atrasados.

Para a topologia estudado de uma unidade *offshore*, o gerador a vazio não é o pior cenário possível para a ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados.

Foram constatadas que as condições pré-faltas de corrente de campo e tensão interna do gerador são de fundamental importância para a passagem da corrente por zero.

Além disso, observou-se também que a dinâmica da abertura do disjuntor muda drasticamente a análise do fenômeno, inserindo resistência no momento da abertura e mudando a componente CC do sistema ao abrir a primeira fase e transformar o curto-circuito trifásico em bifásico.

A presença de um número grande de motores de indução em sistemas industriais faz com que a análise de Zeros Atrasados tenha uma atenção especial em comparação aos sistemas de potência.

Finalmente, depois de todas as conclusões obtidas através das simulações com apenas um gerador e motor, foi feita uma análise em uma planta industrial isolada real de uma plataforma de produção para verificar a existência do problema.

Os resultados para curtos-circuitos trifásicos trouxeram uma preocupação principalmente para faltas localizadas entre o gerador e o painel principal da plataforma, onde foram encontrados um tempo de arco interno às câmaras do disjuntor superior ao limite informado pelo fornecedor em diversos casos.

O critério para evidenciar problemas no disjuntor, 15ms, foi baseado em informações de catálogos técnicos, mas não existe um ensaio real mostrando qual é o valor exato de suportabilidade do equipamento para a planta analisada. Em [5] foi apresentado um ensaio de laboratório com valores de suportabilidade para disjuntores a vácuo superiores ao encontrado em catálogos técnicos, indicando que o valor de 15ms pode ser muito conservador.

Para curtos-circuitos evolutivos foram encontradas diversas condições operacionais nas quais o tempo de arco interno ao disjuntor foi superior ao limite estabelecido na literatura técnica e até mesmo no ensaio realizado em [5].

Apesar do curto-circuito evolutivo se mostrar a pior condição de falta para a ocorrência do fenômeno de Zeros Atrasados, a probabilidade de o mesmo ocorrer no tempo simulado sem a presença de arco elétrico é muito remota, fazendo com que as análises destes casos se mostrassem muito teóricas.

Embora tenha sido evidenciado este problema em diversos casos, não é comum encontrar relatos de danos em disjuntores em plataformas de produção. A explicação pode estar relacionada ao fato de a maioria dos curtos-circuitos serem monofásicos e com impedância que mitigam consideravelmente o fenômeno.

A baixa probabilidade de ocorrer curtos-circuitos trifásicos francos nas condições de pior assimetria do sistema faz com que a existência do fenômeno de Zeros Atrasados, a ponto de implicar riscos à planta industrial, seja remota.

Devido aos novos desafios da retirada de petróleo em águas cada vez mais profundas e a longas distâncias da costa, o crescimento da planta industrial *offshore* é uma realidade em um futuro próximo e o fenômeno de Zeros Atrasados pode se mostrar uma preocupação ainda maior.

TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho fez a análise do fenômeno de Zeros Atrasados utilizando chaves ideais para representar os disjuntores a vácuo trifásicos. A tensão de arco, devido à

dificuldade da sua modelagem, foi considerada constante apenas para realizar uma análise qualitativa, não permitindo que sejam feitas conclusões sobre a mitigação do fenômeno de Zeros Atrasados devido ao arco elétrico interno as câmaras do disjuntor.

Para melhorar a análise do fenômeno de Zeros Atrasados apresentado e verificar a influência do disjuntor na simulação, seria necessário fazer a modelagem mais realista do disjuntor a vácuo considerando a não-linearidade do arco elétrico.

Além disso poderia ser avaliada a modelagem exata da abertura do Is-Limiter de forma a simular o sistema elétrico o mais próximo possível da realidade.

Outro ponto que pode influenciar consideravelmente no estudo do fenômeno de Zeros Atrasados é o efeito da saturação dos TCs (transformadores de corrente) responsáveis por fazer a leitura da corrente de curto-circuito e enviar para o processamento do relé.

Ao considerar o efeito da saturação dos TCs, a corrente RMS de curto-circuito lida pelo relé é menor e conseqüentemente pode existir um atraso no momento da abertura do disjuntor, o que poderia beneficiar a passagem da corrente por zero já que a contribuição CC estaria mais baixa.

Outra preocupação em sistemas industriais *offshore* é com relação ao TRV ou TRT (tensão de reestabelecimento transitória). Como trabalho futuro poderia ser investigado o efeito do TRT no sistema elétrico da plataforma.

Outro assunto não abordado neste trabalho é sobre a reignição do arco elétrico. Está sendo considerado que ao cruzar o zero a corrente de curto-circuito se extinguirá, mas pode ocorrer o fenômeno de reignição e conseqüentemente a falta não ser extinta no instante da passagem da corrente por zero.

Por último, poderia ser sugerido como trabalho futuro a verificação experimental da suportabilidade do disjuntor a vácuo para correntes de curto-circuito com assimetrias semelhantes as encontradas neste trabalho. Desta forma seria possível conhecer os limites do disjuntor e as conseqüências destrutivas de um arco elétrico interno as câmaras do disjuntor por um tempo elevado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kulicke, B.; Schramm, H. H. **Clearence of short-circuits with delayed current zeros in the Itaipu 550kV – Substation.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, Nº 4, Julho/Agosto 1980.
- [2] IEEE Std C37.013. **IEEE Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis,** setembro de 2008.
- [3] Lim, L.S; Smith, I.R. **Turbogenerator short circuits with delayed current zeros.** Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Proc. IEEE, Vol. 124, Nº 12, Dezembro 1977.
- [4] Kulicke, B.; Schramm, H. H. **Application of Vacuum Circuit-Breaker to Clear Faults With Delayed Current Zeros.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol3, Nº4, Outubro 1988.
- [5] SMITH, R.K.; LONG, R.W.; BURMINGHAM, D.L. **Vacuum Interrupters for Generator Circuit Breakers. They're Not Just For Distribution Circuits Breakers Anymore.** 17th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Barcelona, Maio de 2003.
- [6] Hernades, L.; Marques, F. Z.; Vasconcellos, A. S. **Delayed Current Zeros in FPSO Offshore Units.** IEEE Trabalho nº. PCIC BR 2014-20.
- [7] Long, R.W.; Smith, R. K. **Are All Circuit Breakers Created Equal? Certainly NOT When it Comes to Generator Circuits!** Eaton Technology and Quality Center, Pittsburgh, PA, USA, Fevereiro de 2003.
- [8] Canay, I. M.; Braun, D.; Koppl, G. S. **Delayed Current Zeros Due to Out-of-Phase Synchronizing.** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, Nº. 2, Junho 1998.
- [9] Brito, P. M. **Análise Paramétrica da Rede Elétrica no Estudo de Zeros Atrasados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Março, 2014.
- [10] Palazzo, M.; Delfanti, M. **Application of Laplace Transform to Analyse Dalayed Current Zeros in Power Stations Which Employ Three-Windind Step-UP Transformers.** IEEE – EuroCon 2013 - Zagreb, Croatia. Julho 2013.
- [11] Fenske, S. **Delayed current zeros close to generator terminals.** Department if Power Distribution and High-Voltage Technology – Brandenburg Technical University Cottbus - Germany. Maio 2010.

- [12] Dufournet, D; Willieme, J. M. **Recent Devolpments in Generator Circuit Breakers.** IEEE 2002.
- [13] Cossé, R. E.; Hanzel, T. G.; Thomasset, G. **IEC Medium-Voltage Circuit-Breaker Interrupting Ratings – Unstated Short-Circuit Considerations.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, N°3, Maio/Junho 2000.
- [14] Silva, F.; Bak, C. L.; Gudmundsdottir, U. S.; Wiechowski, W.; Knardrupgard, M. R. **Methods to Minimize Zero-Missing Phenomenon.** IEEE PES Transactions on Power Delivery, 2010.
- [15] Ban, D.; Zarko, D.; Maljkovic, Z. **The Analysis of Saturated Reactances of the 247 MVA Turbogenerator by Using the Finite Element Method.** University of Zagreb, 1998.
- [16] Weeber, K. **Determination of Dynamic Parameters of Large Hydro-Generators by Finite-Elementt Simulation of Three-Phase Sudden Short-Circuit Tests.** IEEE - GE Hydro, Generator Engineering, Peterborough, Canada, 1997.
- [17] Susnjic, L. **Finite-element Simulation of a Synchronous Generator under the Case of Symmetrical Sudden Short-circuit in Q-axis.** IEEE - Department of Electrical Engineering, Uljanik-Tesu Electric Machines Company, Croatia, 1997.
- [18] Schmidt, E.; Grabner. C; Traxler-Samek. G. **Determination of Reactances of Large Hydro-Generators using Finite Elements and Domain Decomposition.** IEEE Vienna University of Technology, Institute of Electrical Drives and Machines. Austria, 2001.
- [19] Xinzhen, C. H. **Identification of Synchronous Generator Parameters Based on 3-Phase Sudden Short-Circuit Current.** Electrical Engineering Department, Qingdao University. Qingdao, China, 2011.
- [20] Schmidt, E.; Grabner. C; Traxler-Samek. G. **Reactance Calculation of a 500 MVA Hydro-Generator using a Finite Element Analysis with Superelements.** IEEE Vienna University of Technology, Institute of Electrical Drives and Machines. Austria, 2001.
- [21] HARTMAN, C. N. **Understanding Asymmetry,** IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, N° 4, 1985.
- [22] Fitzgerald. A. E.; Kingsley. C; and Umans, S. D., **Máquinas Elébricas.** Editora Bookman, 6ª edição, 2008.

- [23] Kimbark, E. W. **Synchronous Machines**, Editora Dover Publications, INC., New York, 1956.
- [24] Mello, F. P. **Dinâmica das Máquinas Elétricas I Volume 4**. Universidade Federal de Santa Maria, 1979.
- [25] Sriharan, S.; Oliveira, S. E. M. **Analysis of synchronous generator sequential short circuits**. Proceedings of the Institute of Electrical Engineers, Vol. 124, no. 6, pp 549 a 553, Junho 1977.
- [26] Lorenz, J.; Fowler, J. T. **Synchronous Generator Subtransient Reactance Prediction Using Transient Circuit Coupled Electromagnetic Analyses & Odd Periodic Symmetry**. Kato Engineering Inc., North Mankato, MN, 2006.
- [27] VD4 Disjuntores de média tensão a vácuo 12...36 kV - 630...3150 A - 16...50 kA. Catalogo Técnico da ABB. 2012.
- [28] Shindo, R. **Cálculo de Parâmetros de Motor de Indução Trifásico Utilizando o Método de Elementos Finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Março, 2003.
- [29] Salon, S. J. **Finite Element Analysis of Electrical Machines**. 1 ed. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [30] Asencios, O. W. G. **IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS DE ESTIMACÃO DE ESTADOS E PARÂMETROS**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Julho de 2009.
- [31] ABB AG. Calor Emag Medium Voltage Products. **Limitador Is**. Catálogo Técnico da ABB 2243 02 PT. 24 p. 2006.
- [32] Rifaldi, A; Lastra, R. B. **Electronic Edition of the ATP Rulebook in PDF Format**. Revista Iberoamericana del ATP – Ano 4, Vol. 3, Número 4 – Dezembro de 2001.
- [33] Type Test Certificate od Short-Circuit Performace. VD4 1731-50. Teste disjuntor a vácuo da ABB realizado pelo Kema High-Power Laboratory, Holanda. 29 de abril de 2008
- [34] G60 relay. Catálogo técnico da GE. 2015.

ANEXO 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO CAPÍTULO 4

CENÁRIO 01 - GERADOR A VAZIO

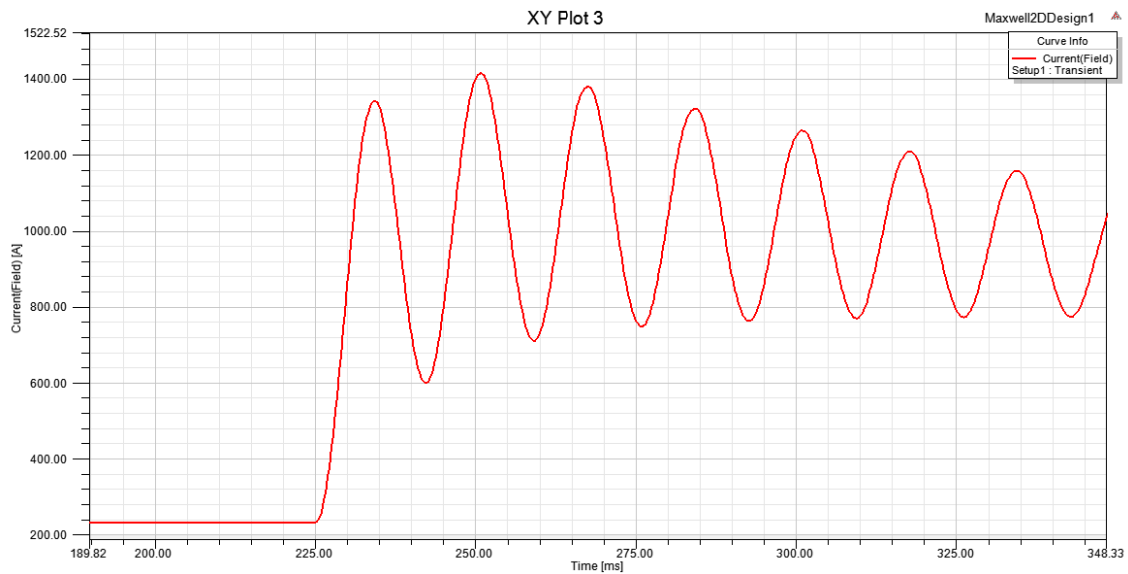


Figura 58: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - a.2).

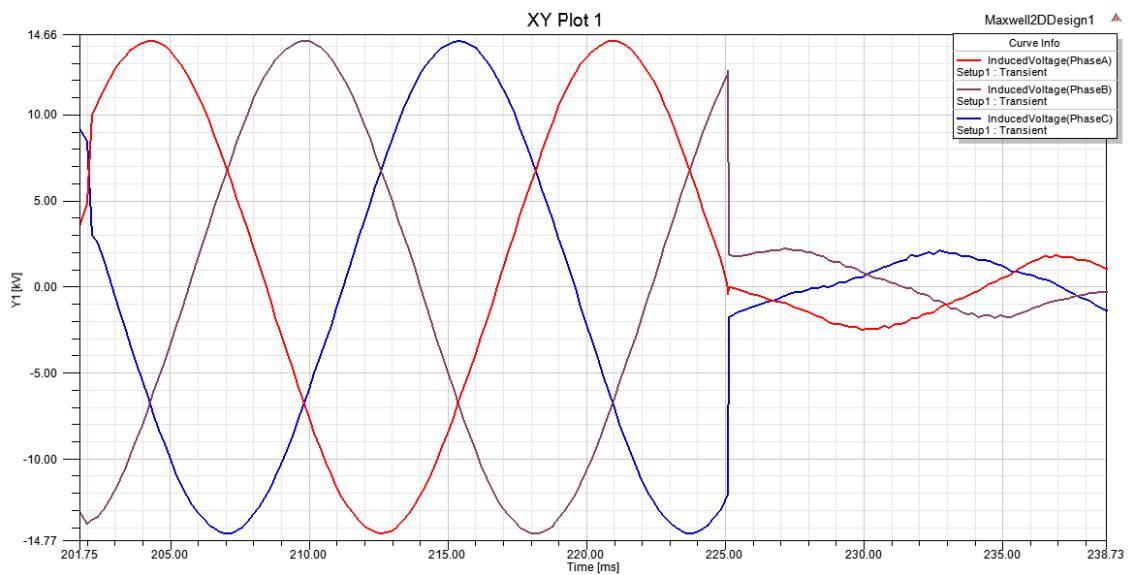


Figura 59: Gráfico de tensão com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - a.2).

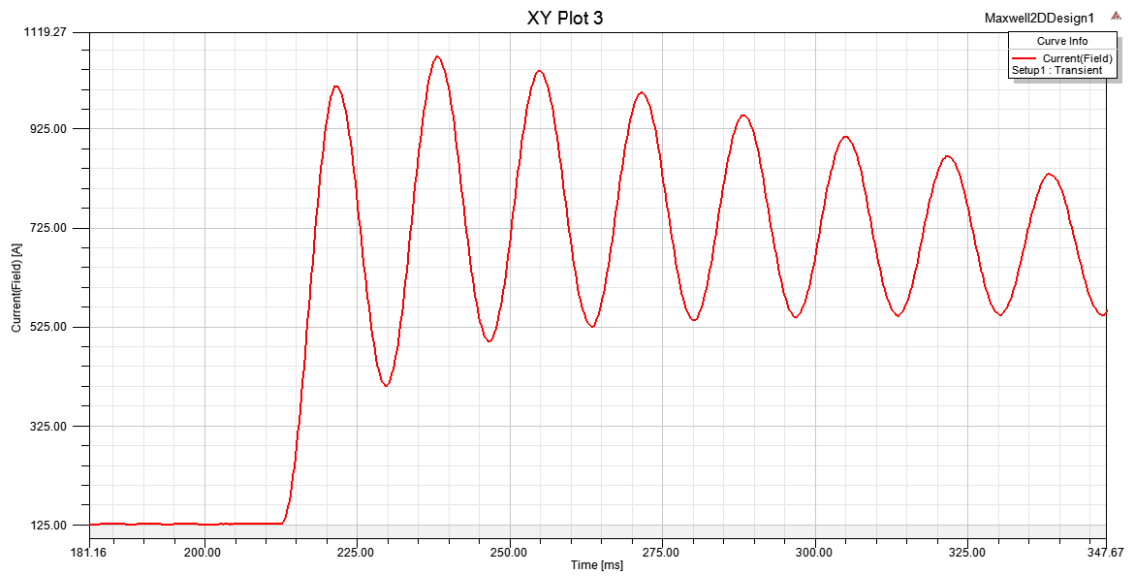


Figura 60: Corrente de campo do gerador para o cenário 1 - b).

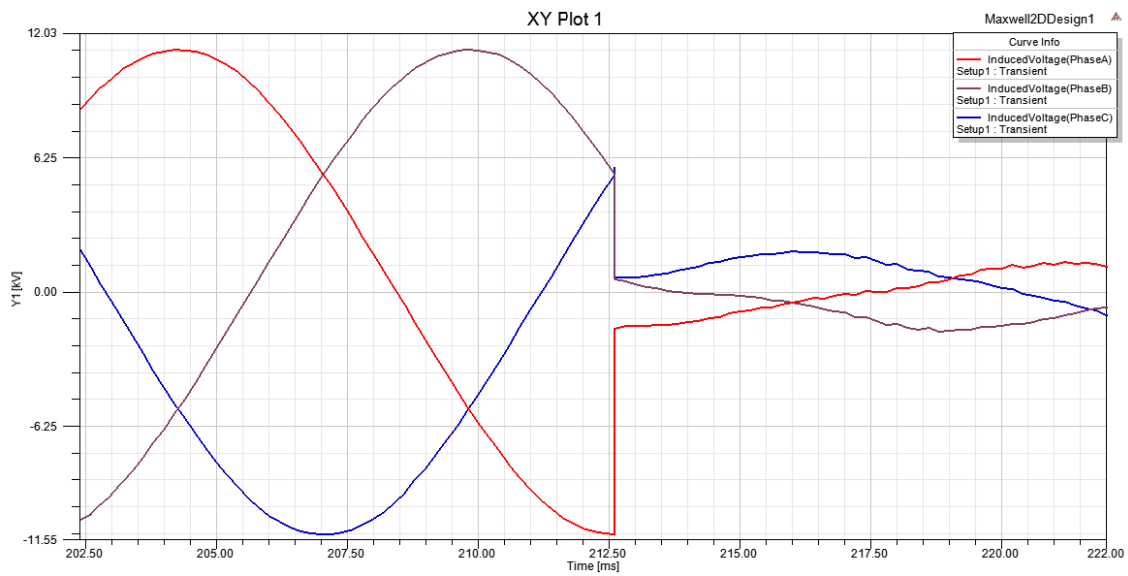


Figura 61: Gráfico de tensão com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 1 - b).

CENÁRIO 02 - GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL INDUTIVO

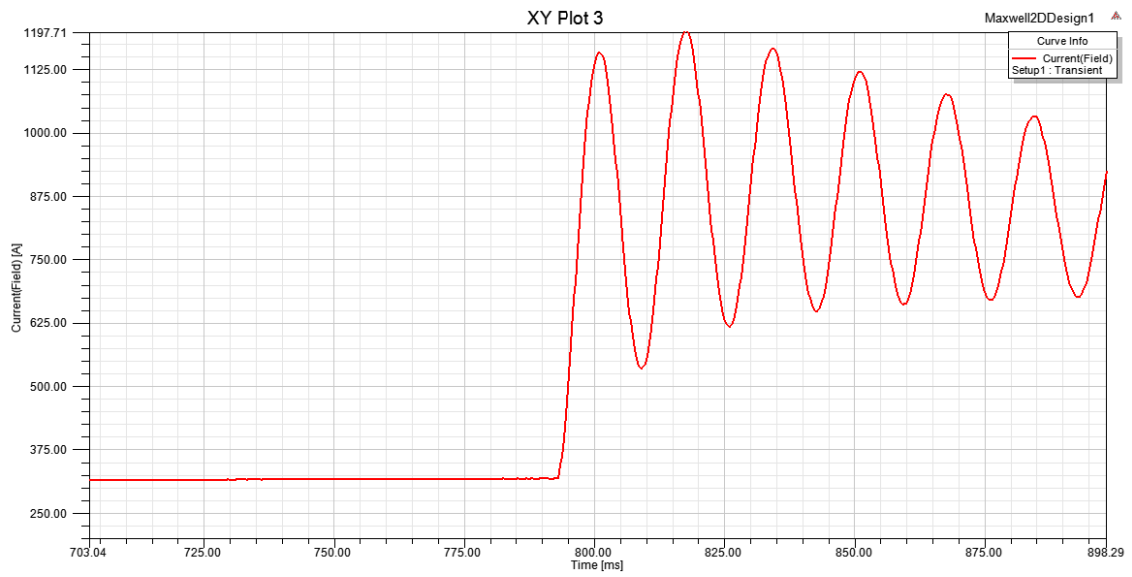


Figura 62: Corrente de campo do gerador para o cenário 2 - a).

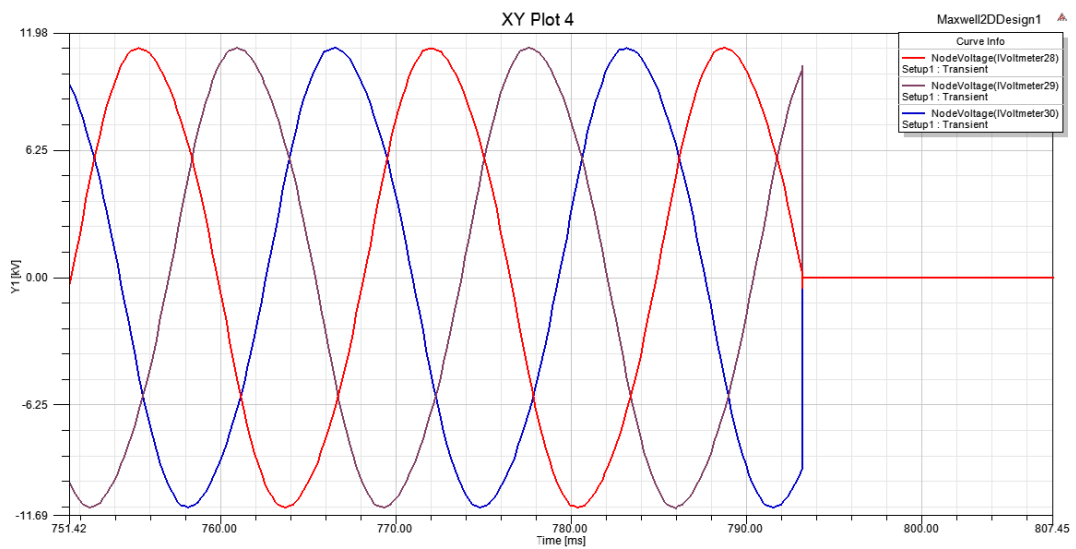


Figura 63: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - a).

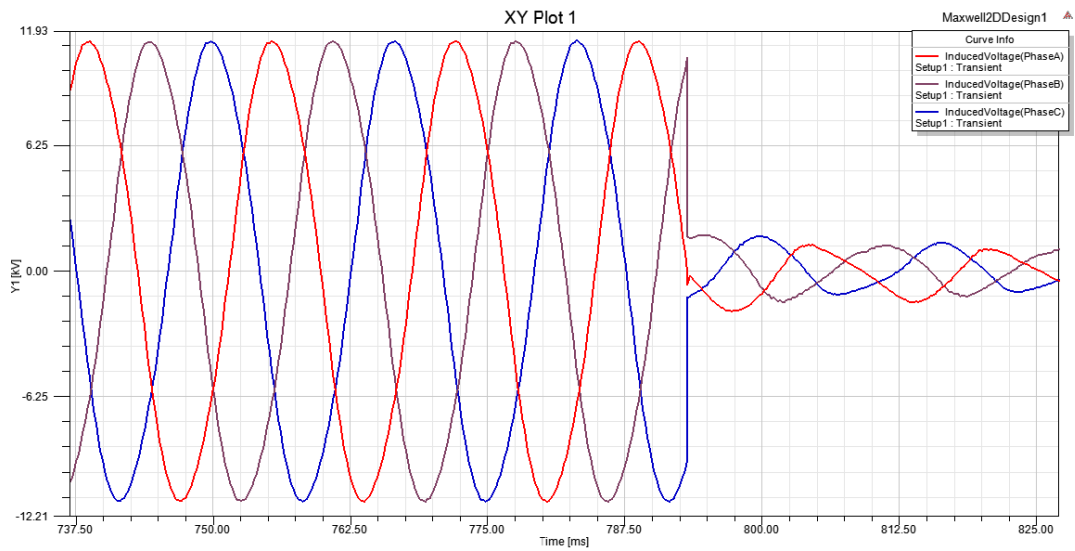


Figura 64: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - a).

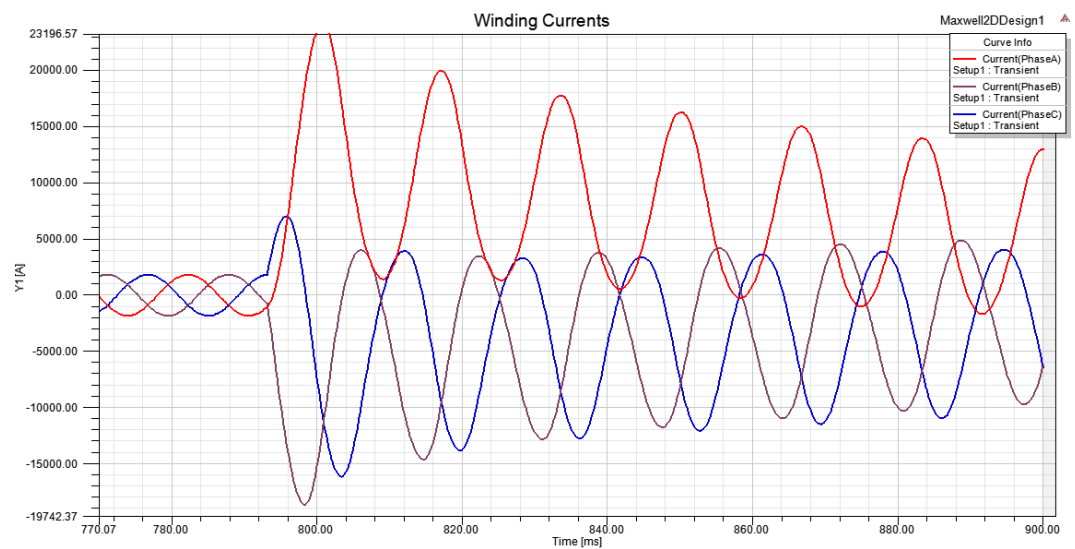


Figura 65: Corrente de curto-circuito para o cenário 2 - a).

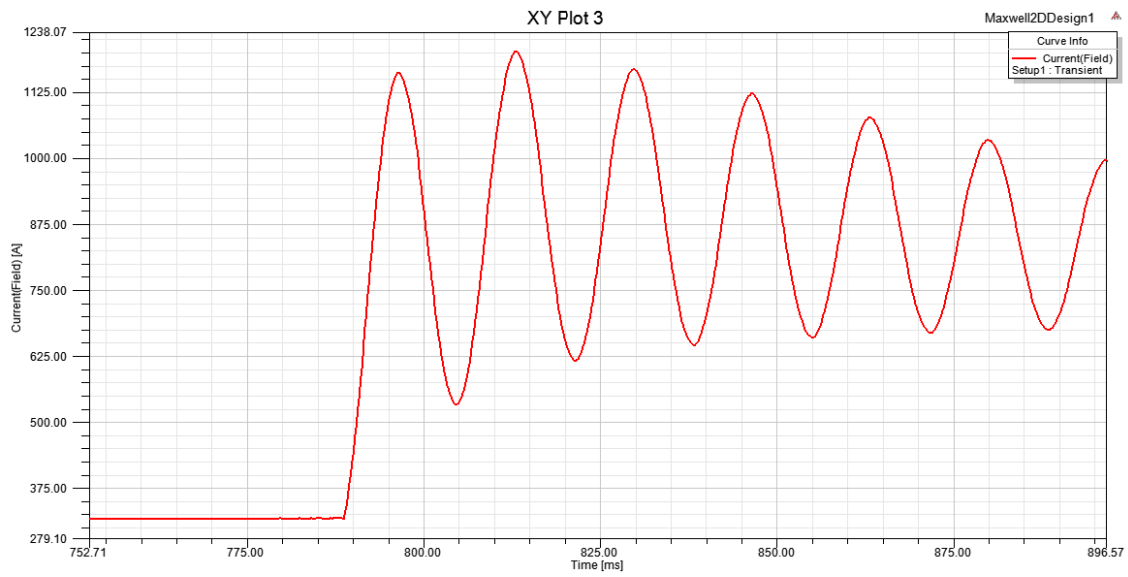


Figura 66: Corrente de campo do gerador para o cenário 2 - b).

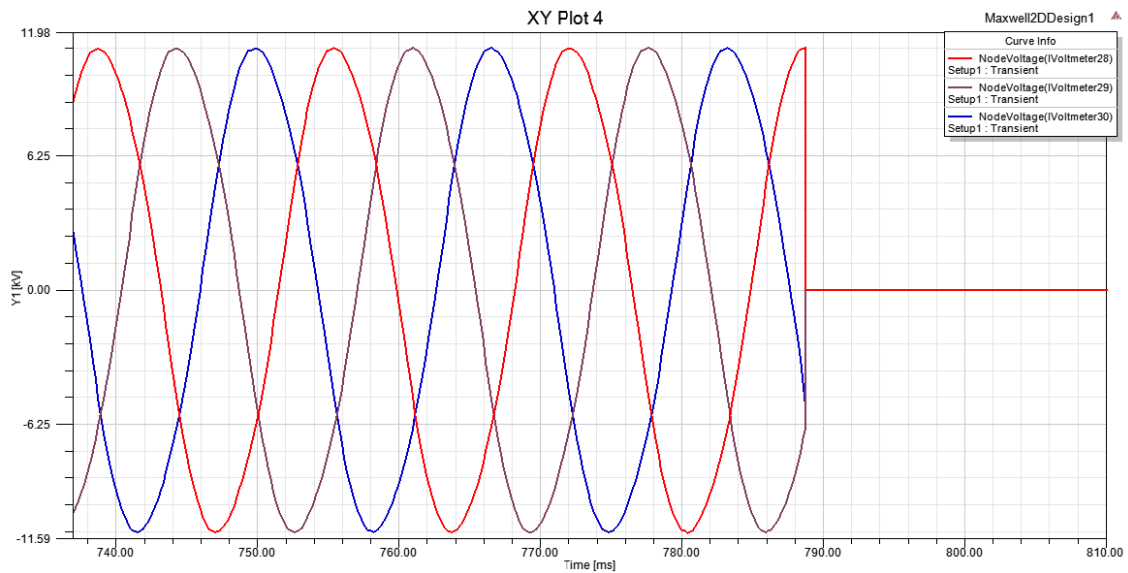


Figura 67: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - b).

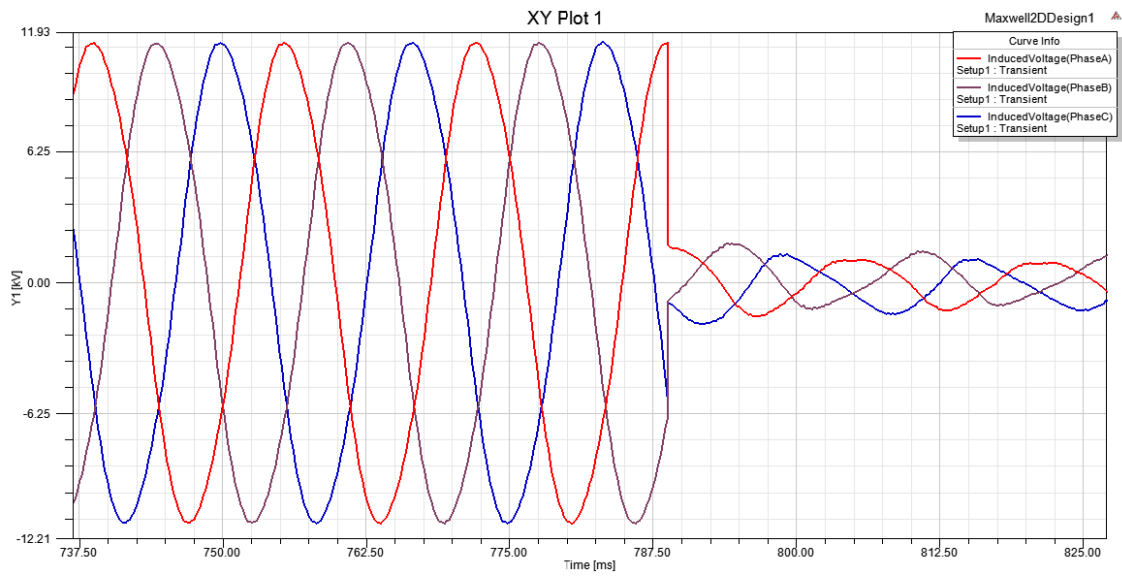


Figura 68: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 2 - b).

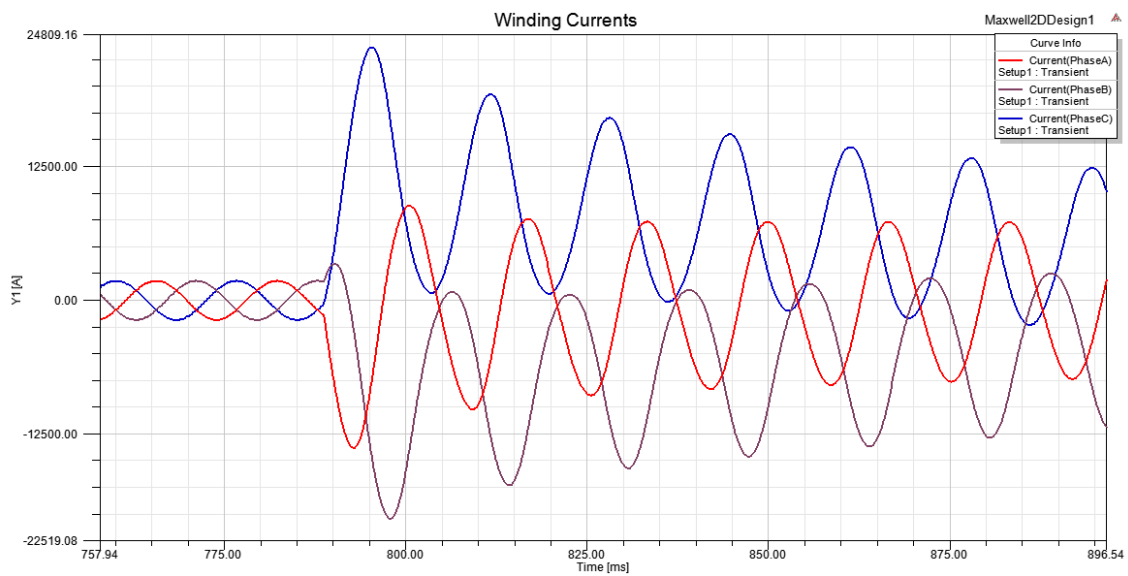


Figura 69: Corrente de curto-circuito para o cenário 2 - b).

CENÁRIO 03 - GERADOR COM CARREGAMENTO NOMINAL CAPACITIVO

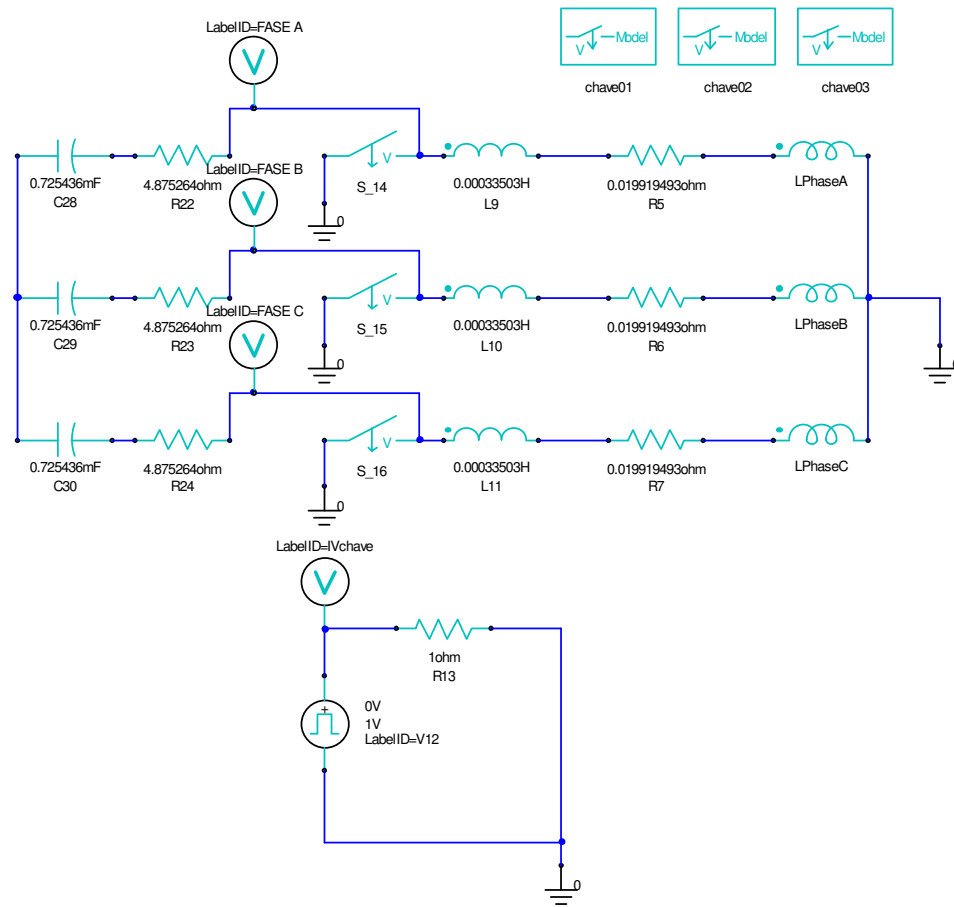


Figura 70: Circuit Editor para o cenário 3.

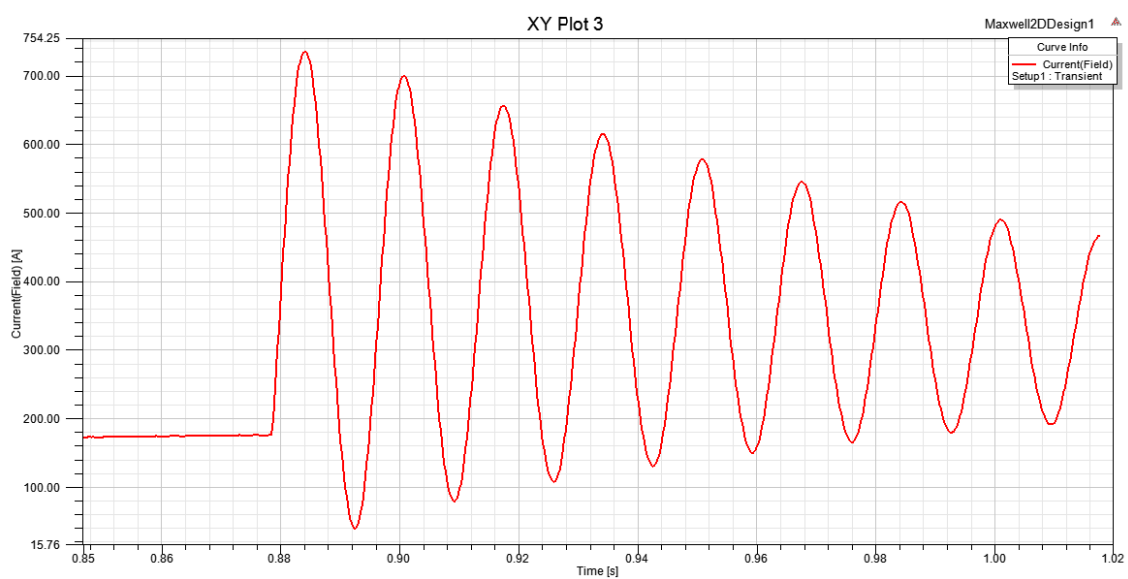


Figura 71: Corrente de campo do gerador para o cenário 3 - a).

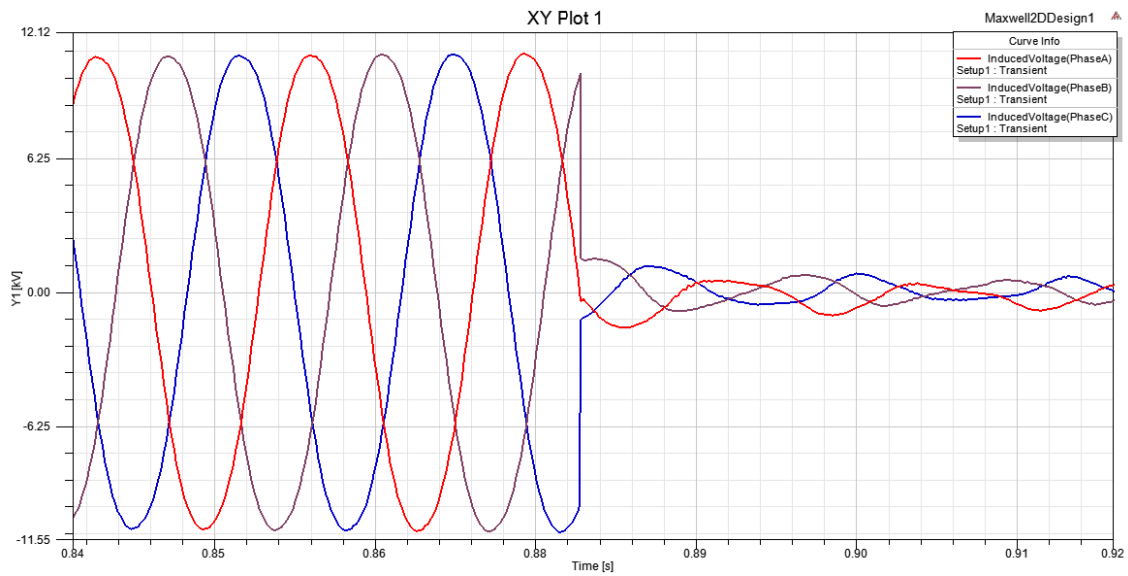


Figura 72: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - a).

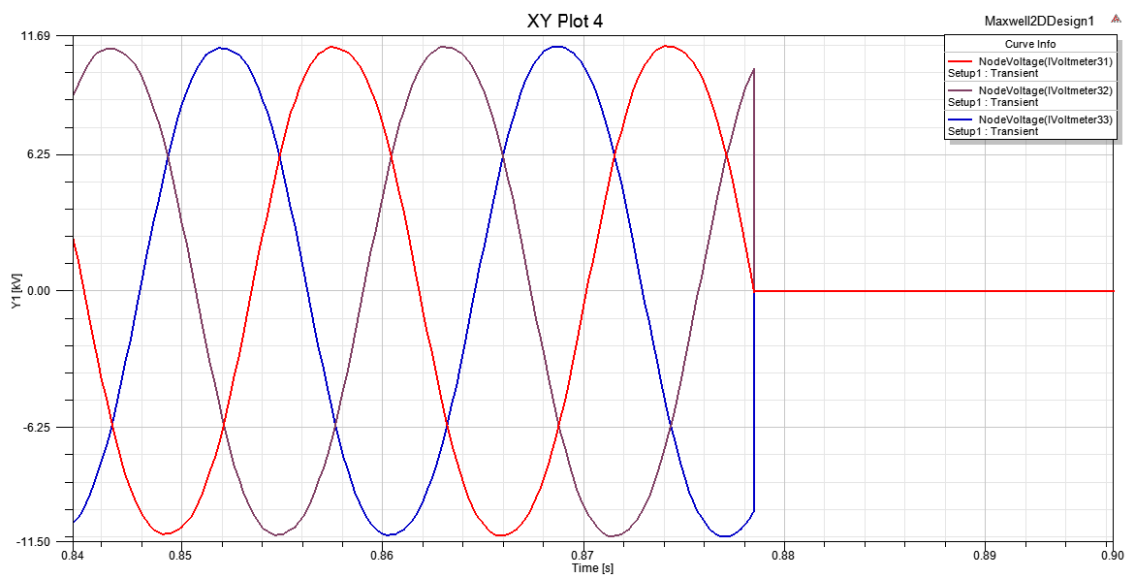


Figura 73: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - a).

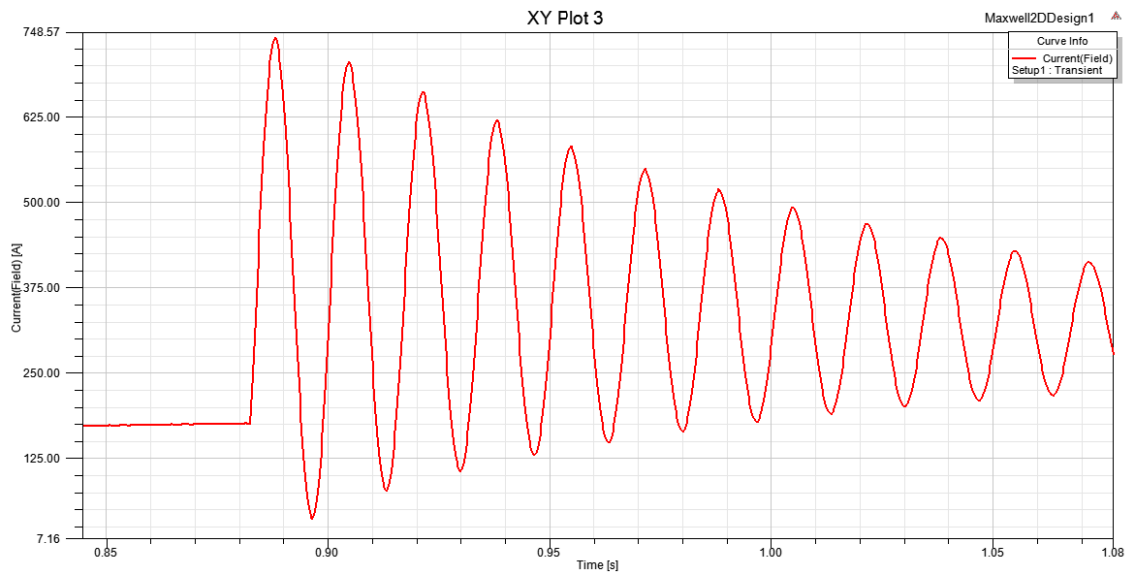


Figura 74: Corrente de campo do gerador para o cenário 3 - b).

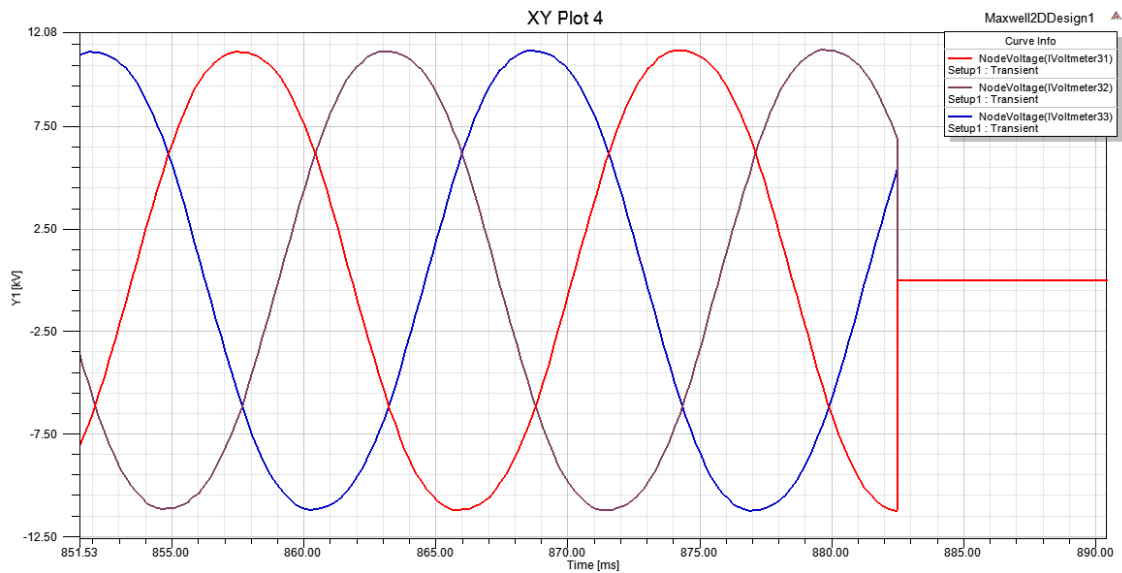


Figura 75: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - b).

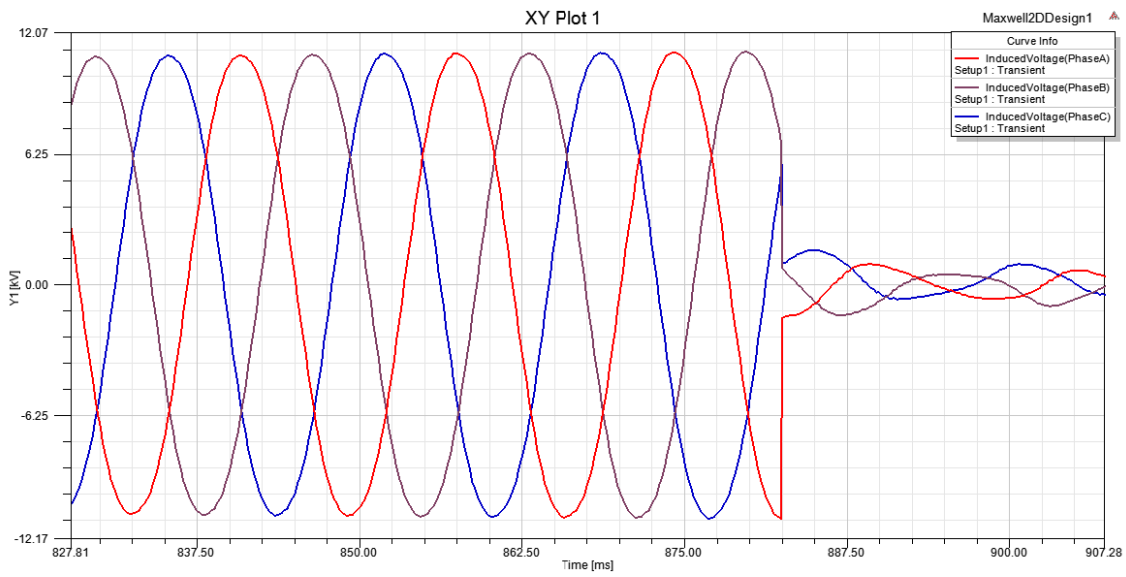


Figura 76: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 3 - b).

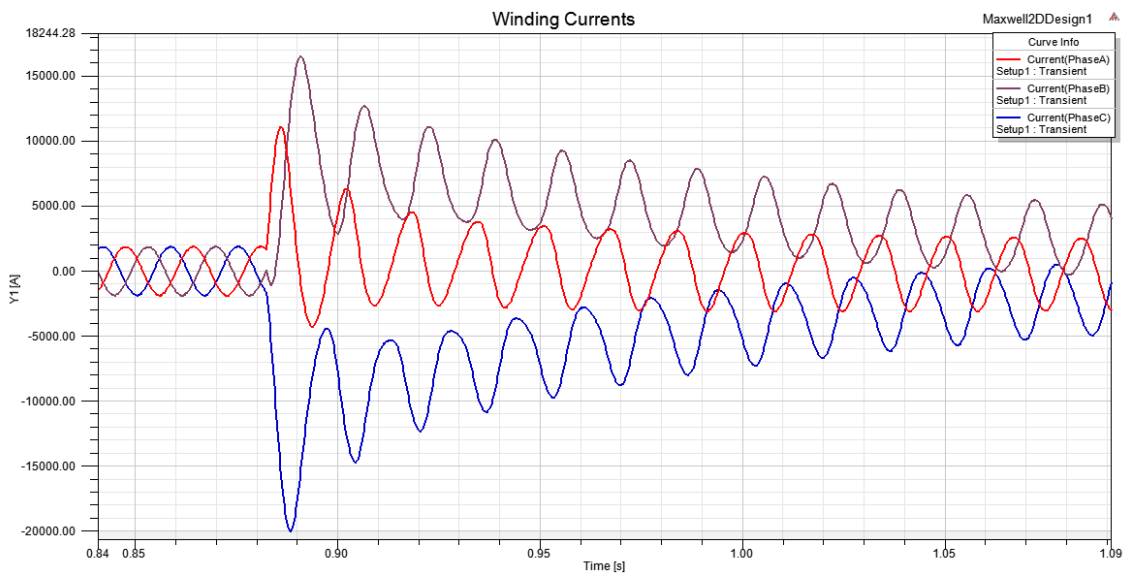


Figura 77: Corrente de curto-circuito para o cenário 3 - b).

CENÁRIO 04 - VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

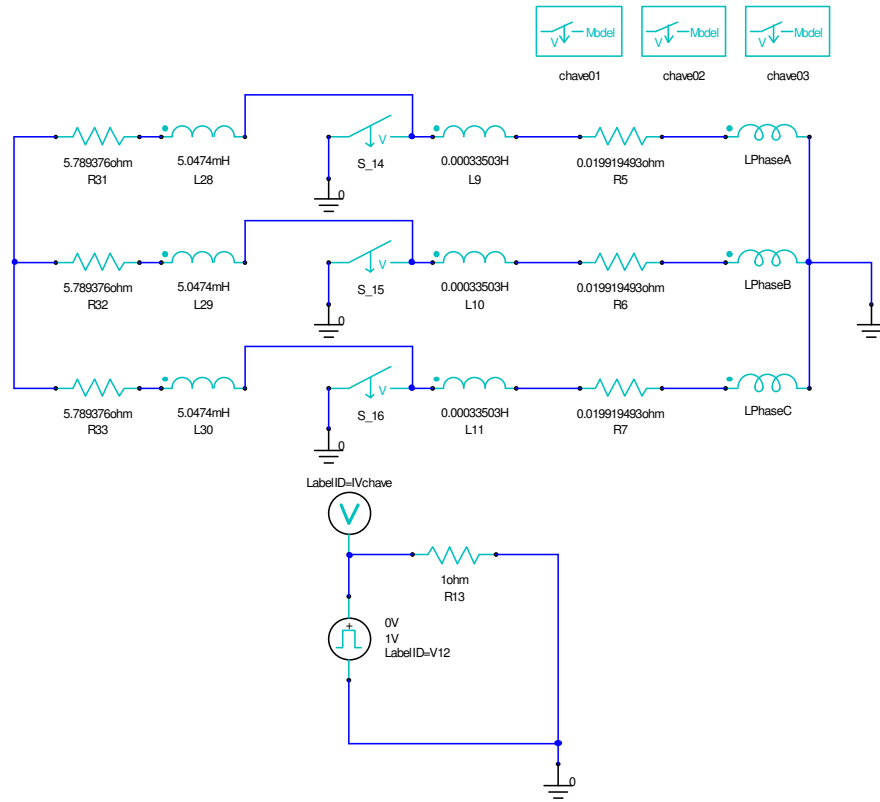


Figura 78: Circuit Editor para o cenário 4, FP=0,95.

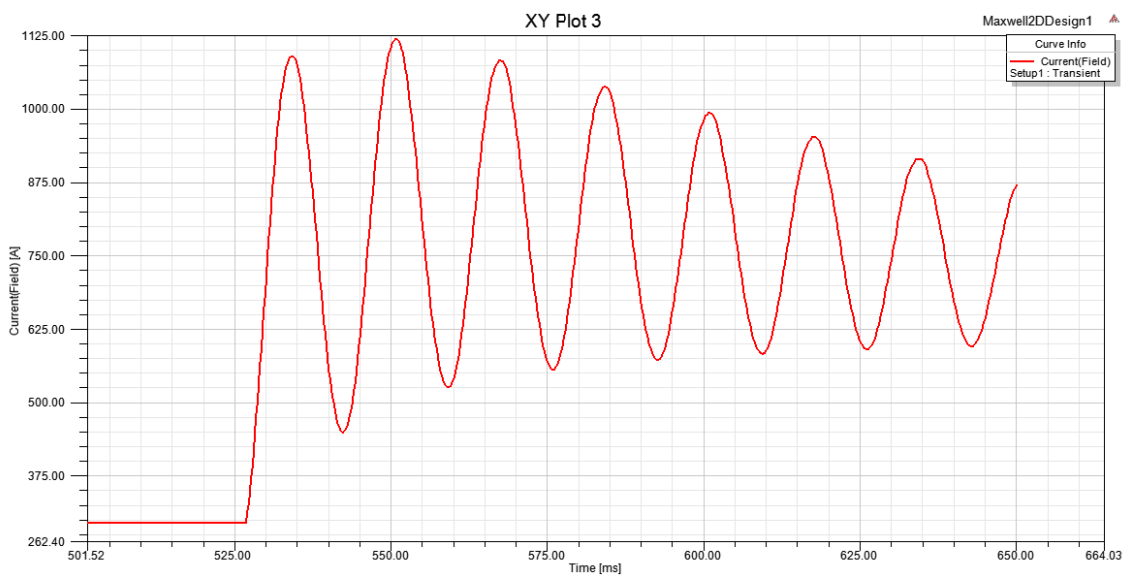


Figura 79: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) FP=0,95.

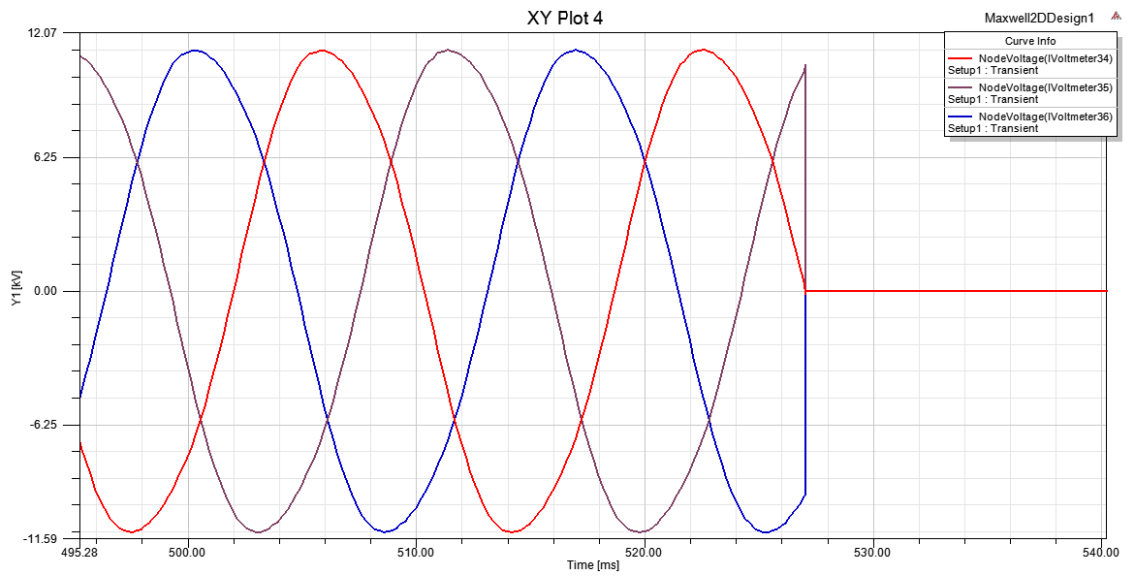


Figura 80: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.

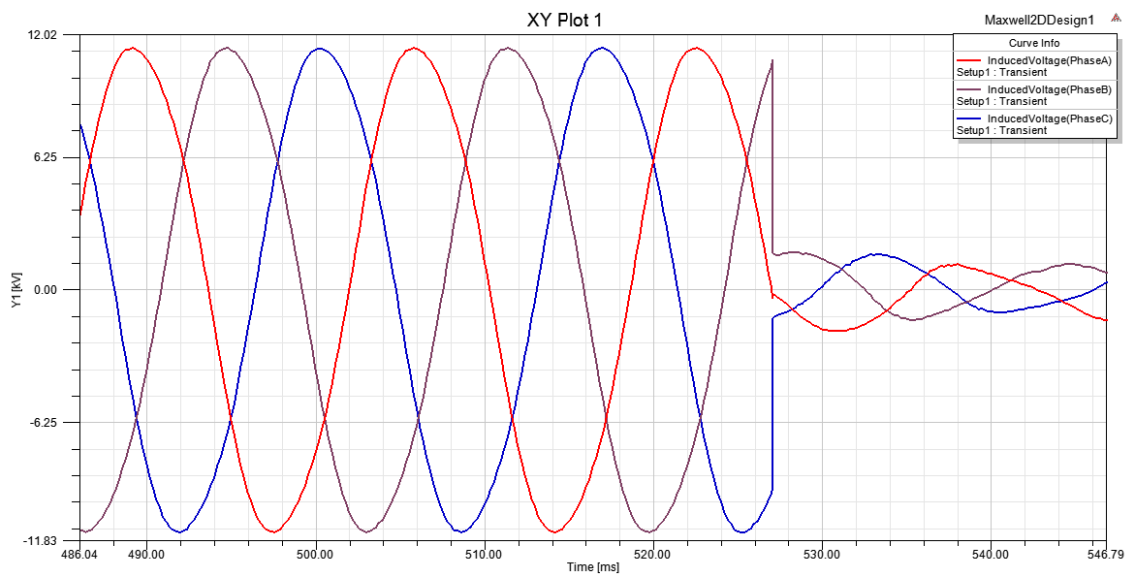


Figura 81: Gráfico de tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.

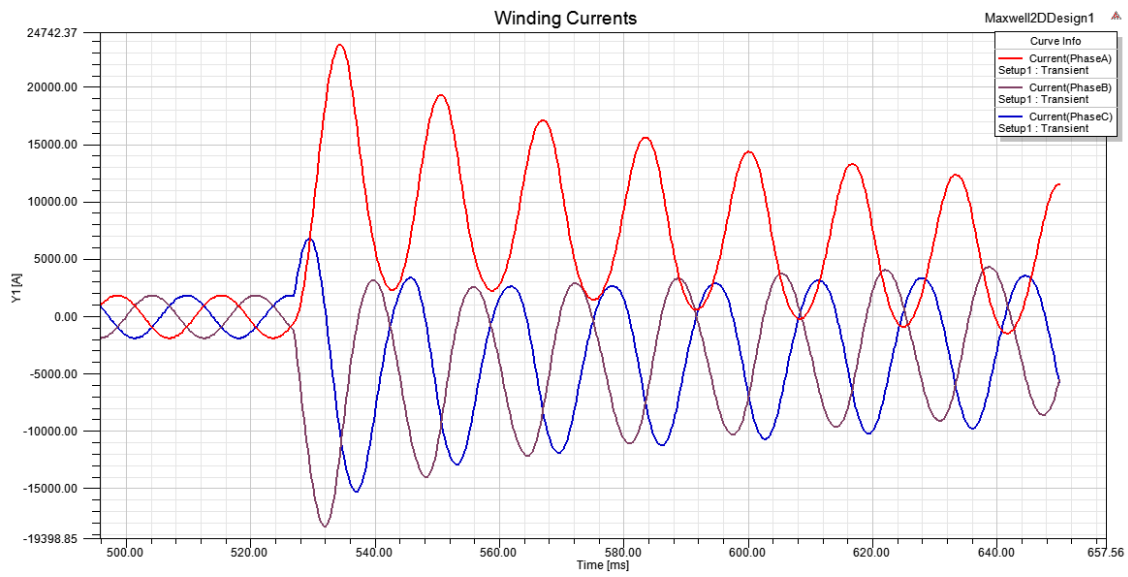


Figura 82: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,95.

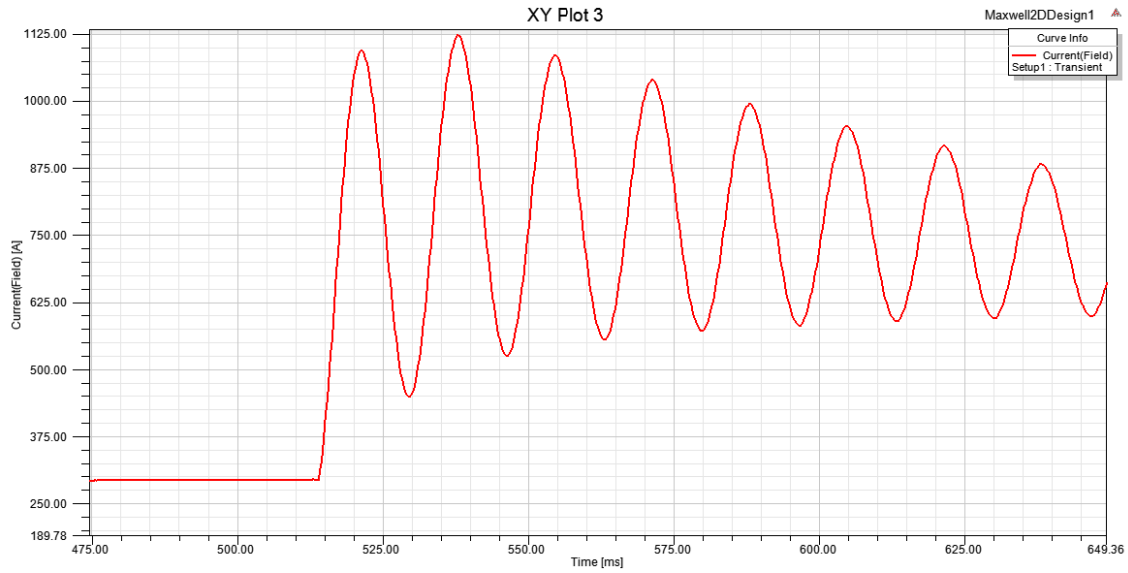


Figura 83: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) FP=0,95.

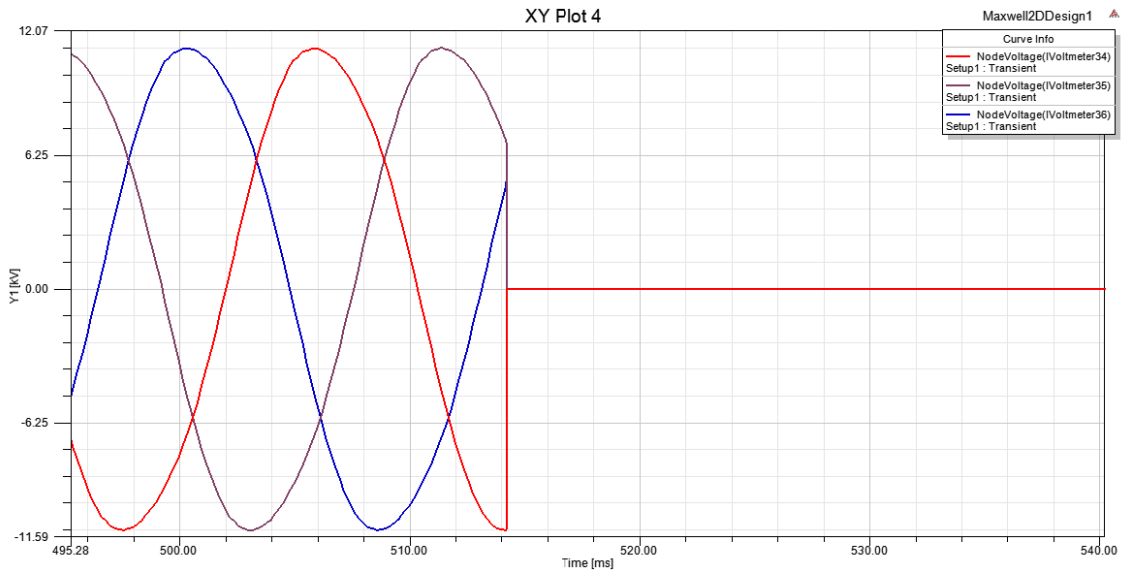


Figura 84: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), $FP=0,95$.

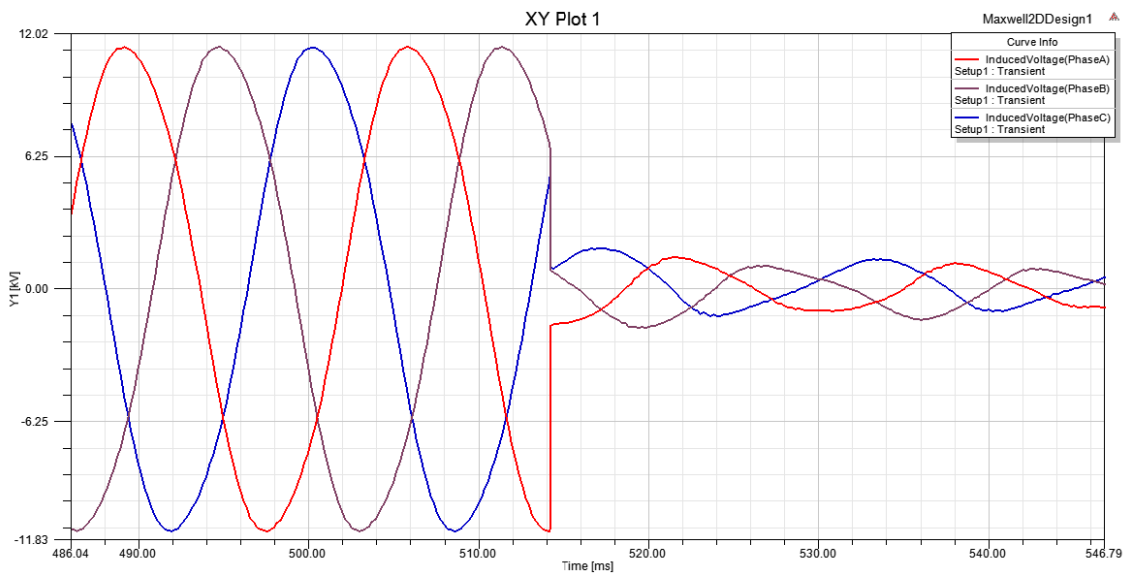


Figura 85 Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), $FP=0,95$.

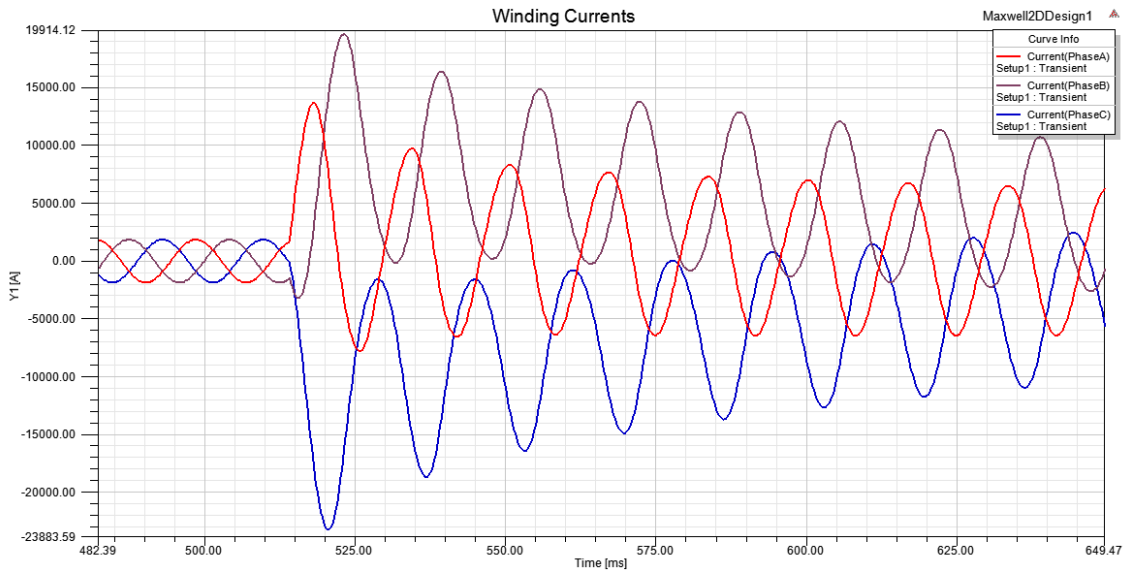


Figura 86: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,95.

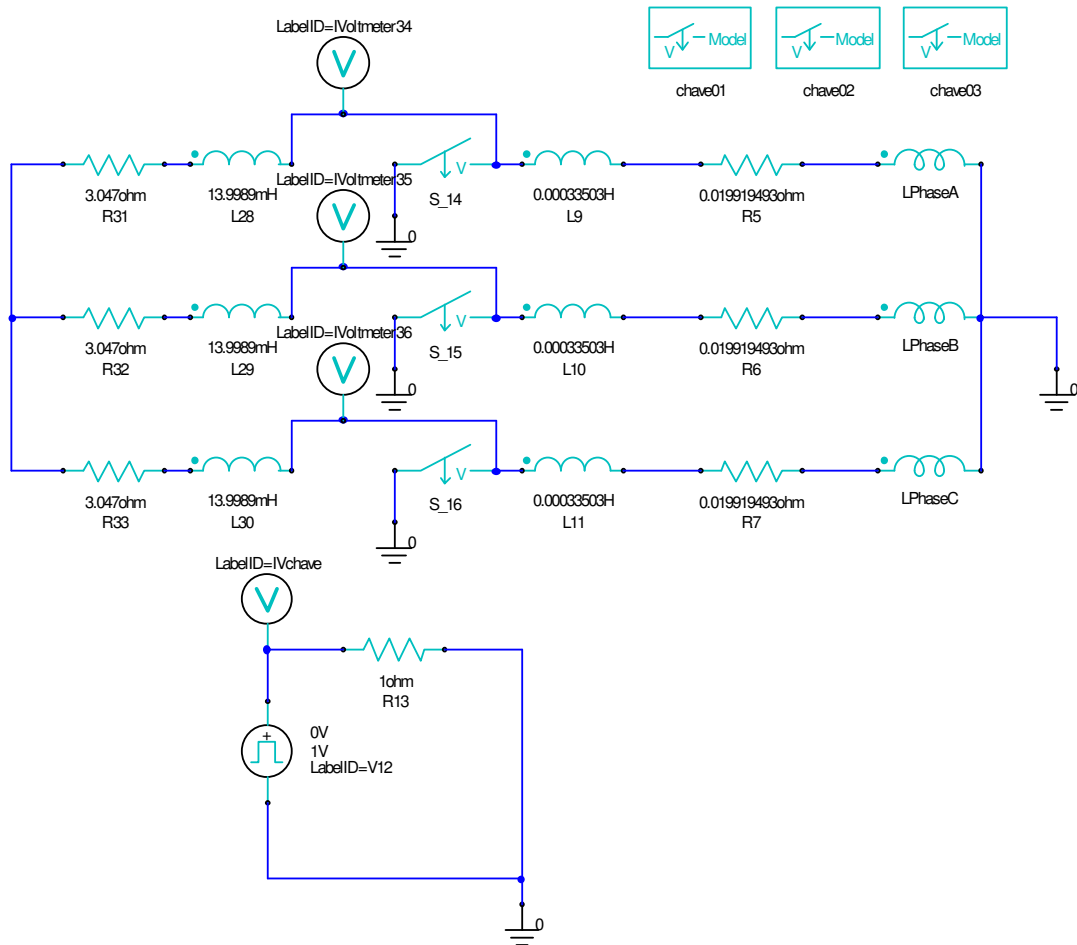


Figura 87: Circuit Editor para o cenário 4, FP=0,5.

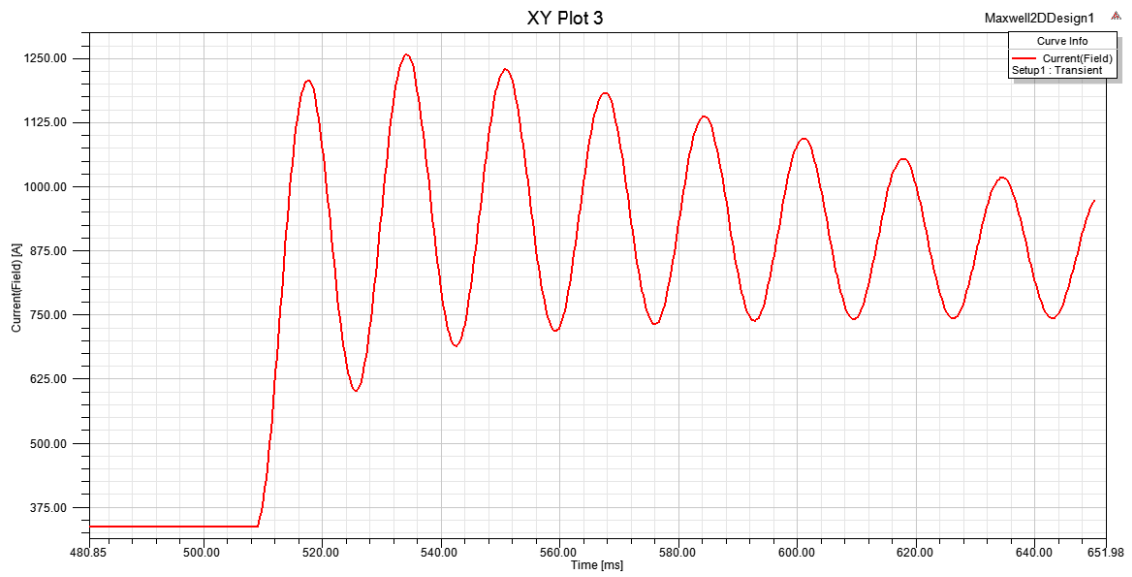


Figura 88: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) $FP=0,5$.

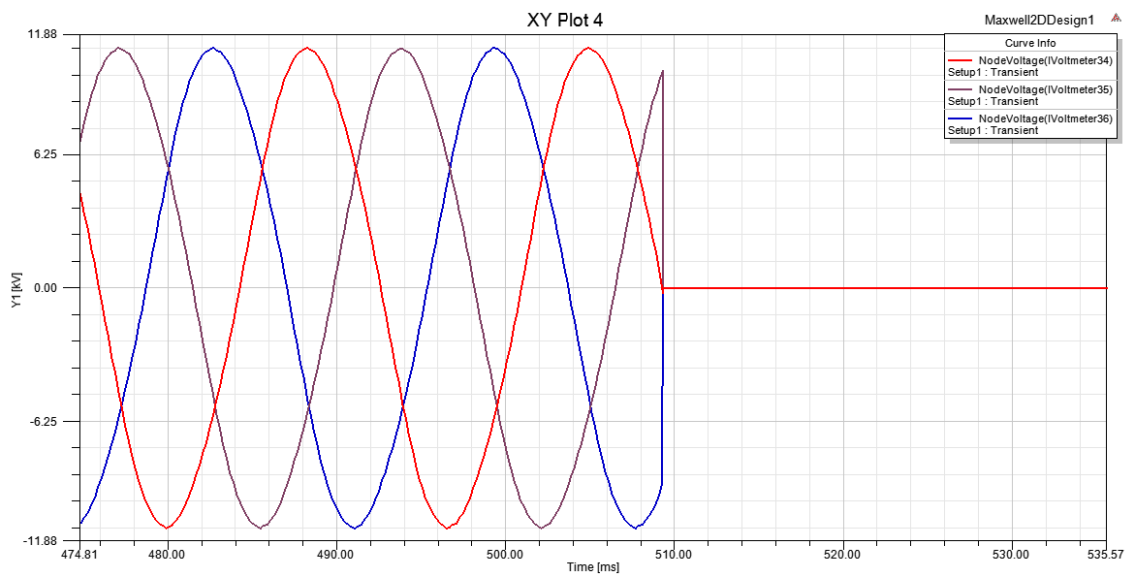


Figura 89: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), $FP=0,5$.

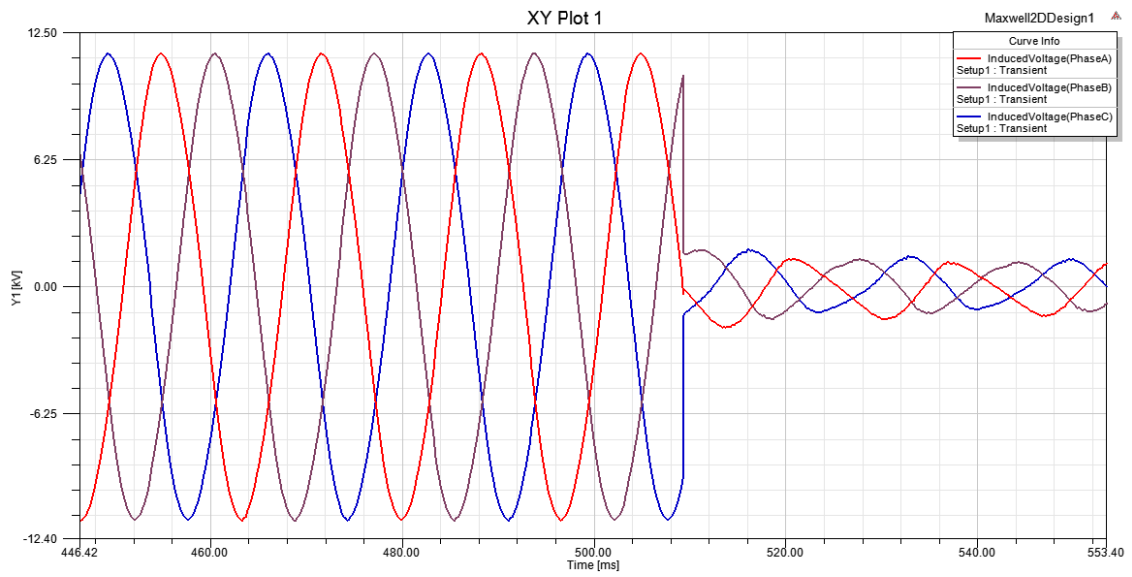


Figura 90: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,5.

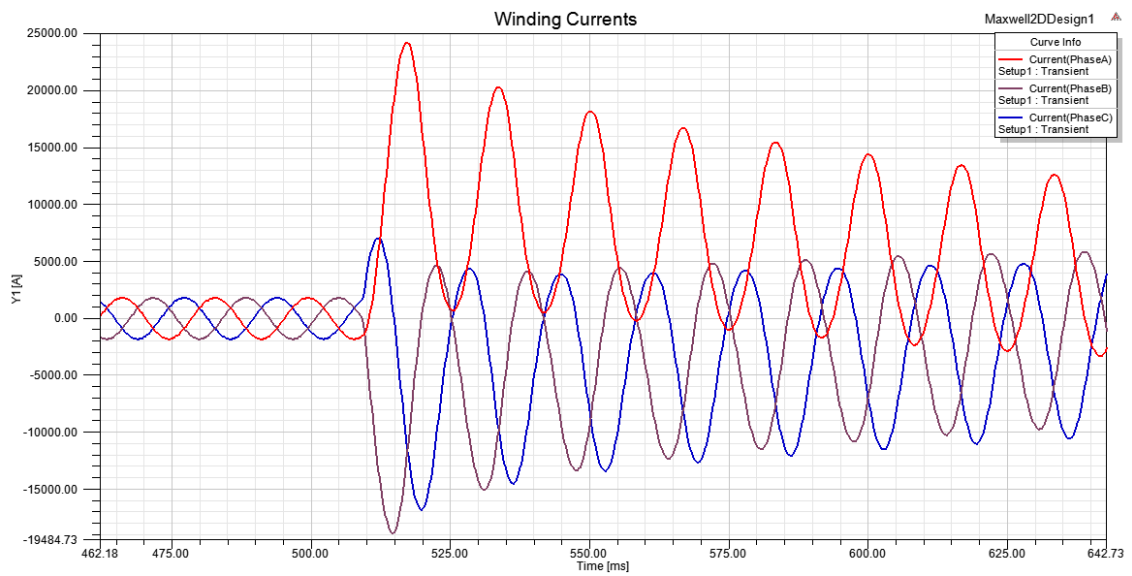


Figura 91: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=0,5.

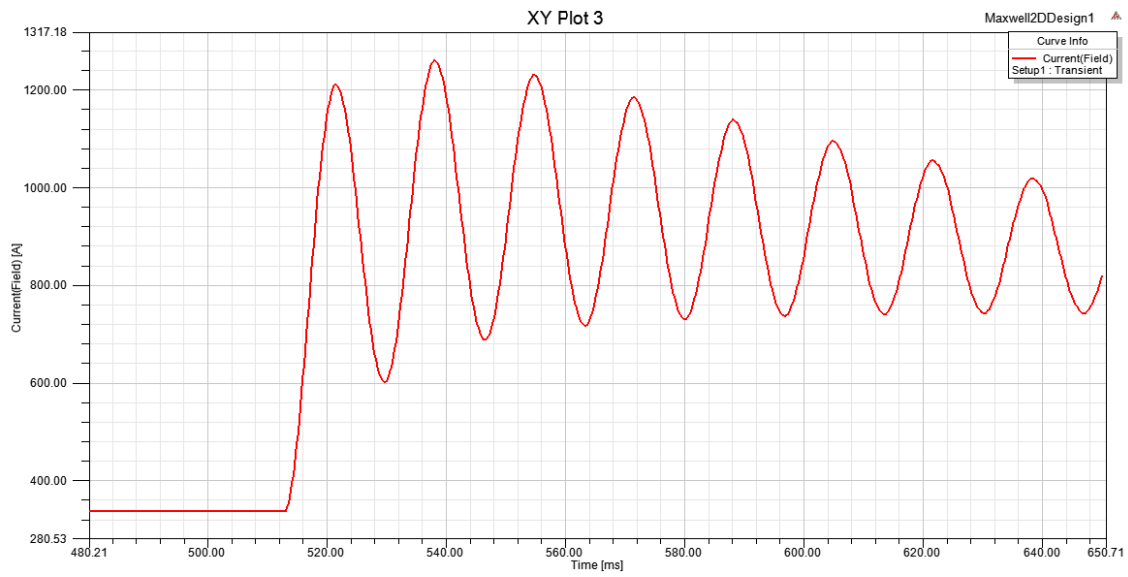


Figura 92: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) $FP=0,5$.

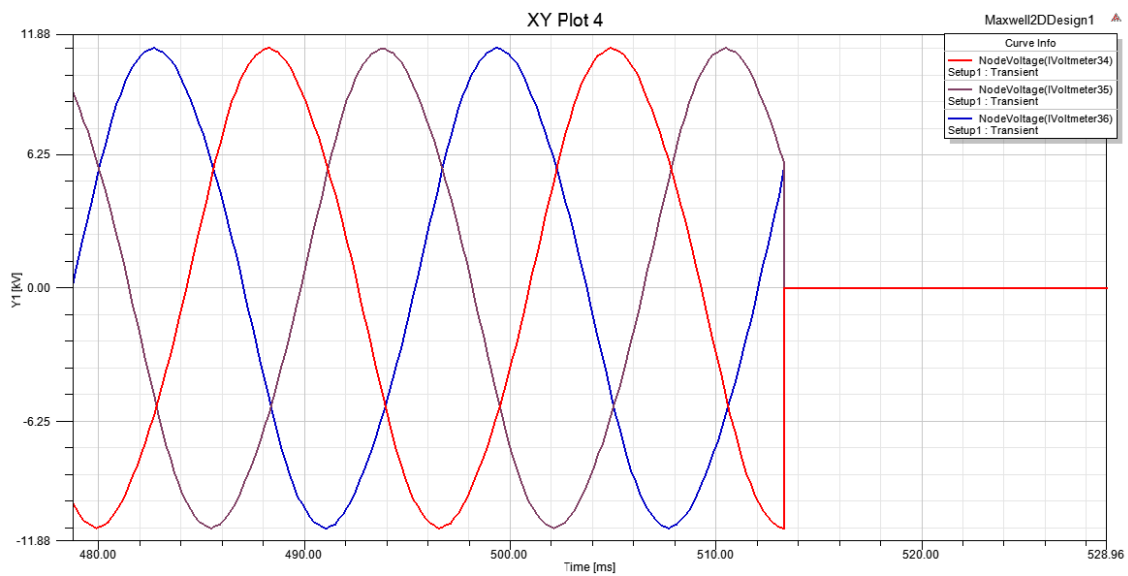


Figura 93: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), $FP=0,5$.

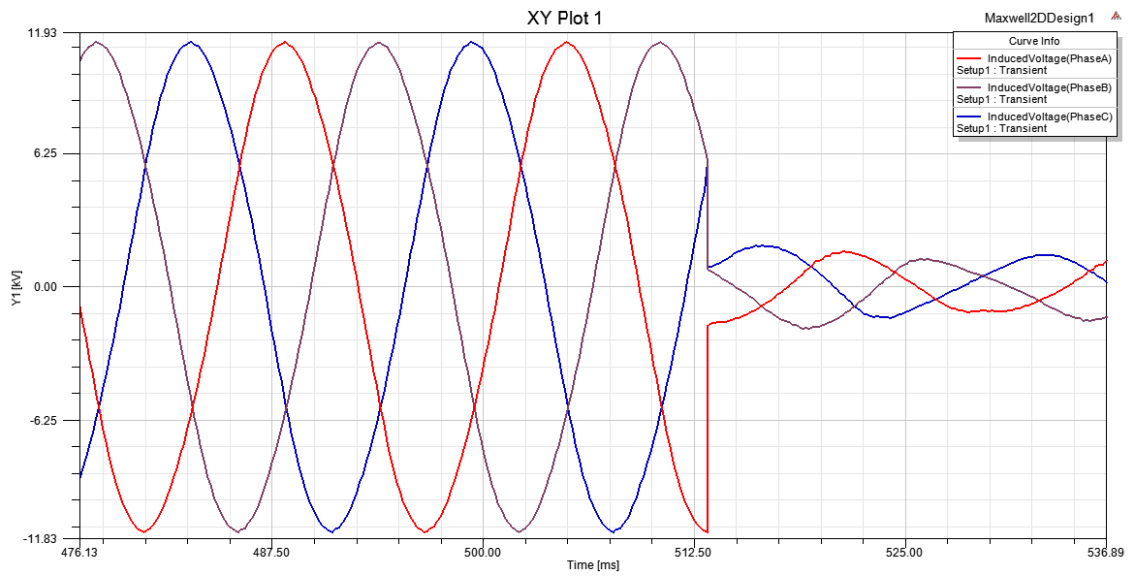


Figura 94: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,5.

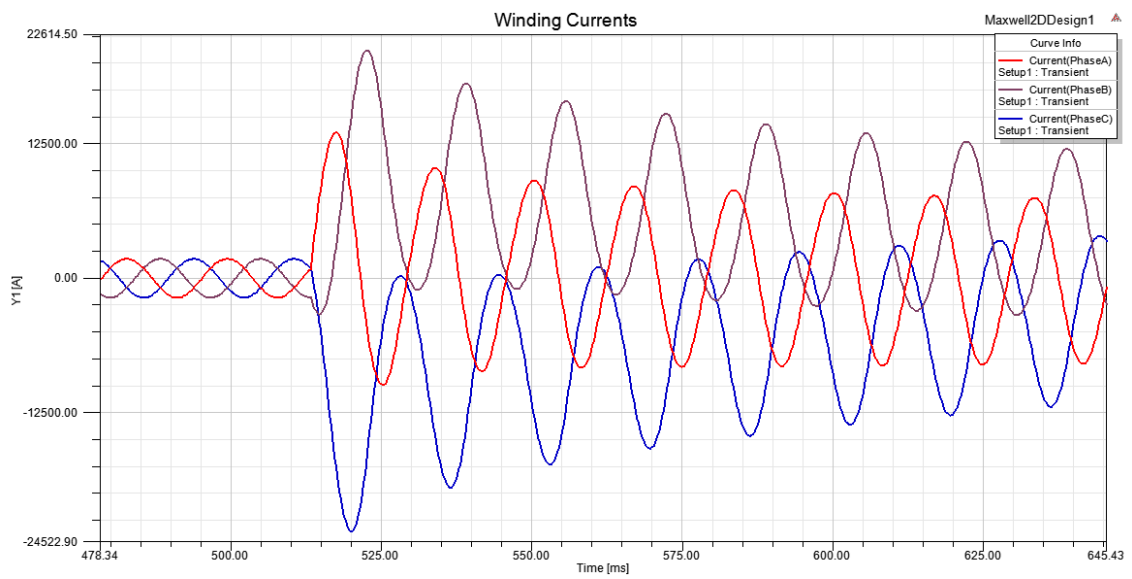


Figura 95: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=0,5.

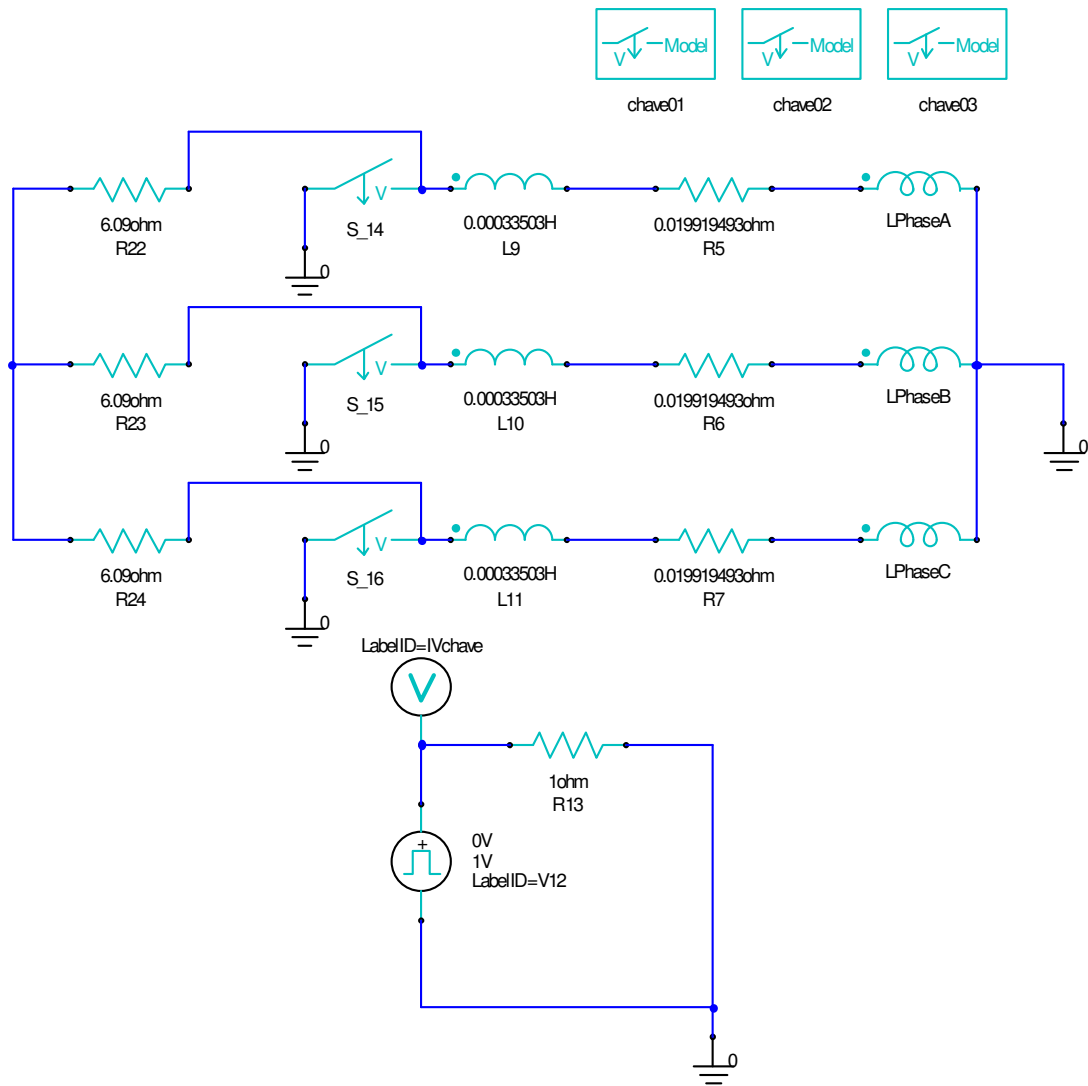


Figura 96: Circuit Editor para o cenário 4, FP=1,0.

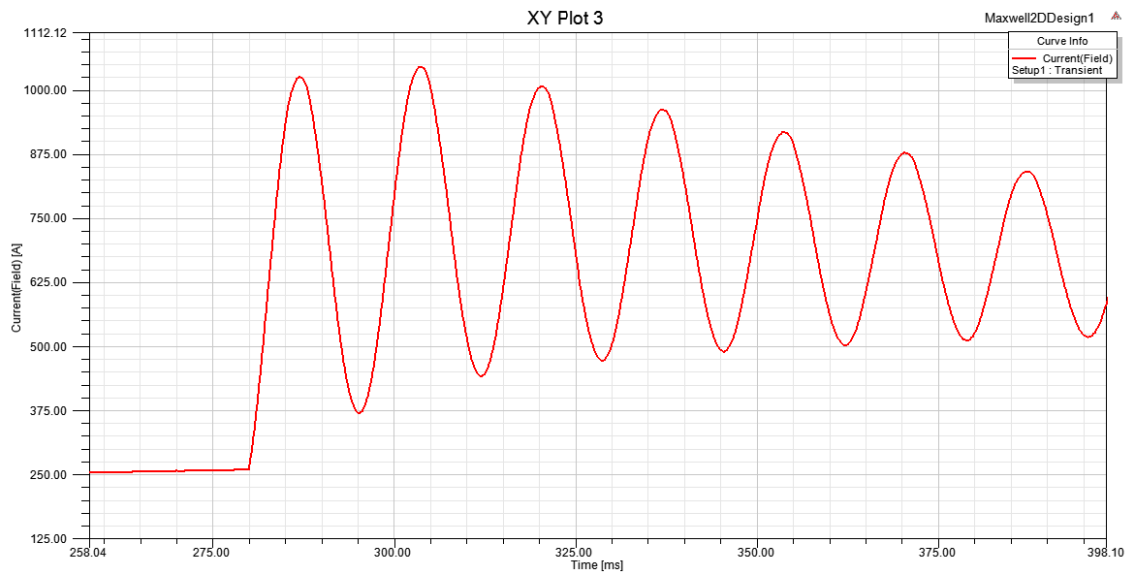


Figura 97: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - a) $FP=1,0$.

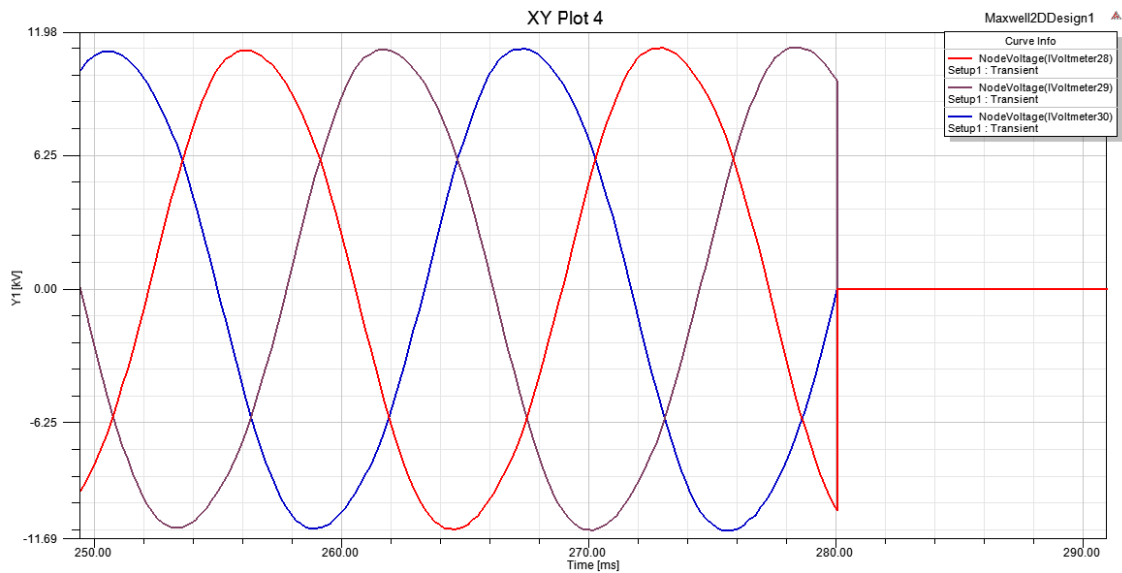


Figura 98: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), $FP=1,0$.

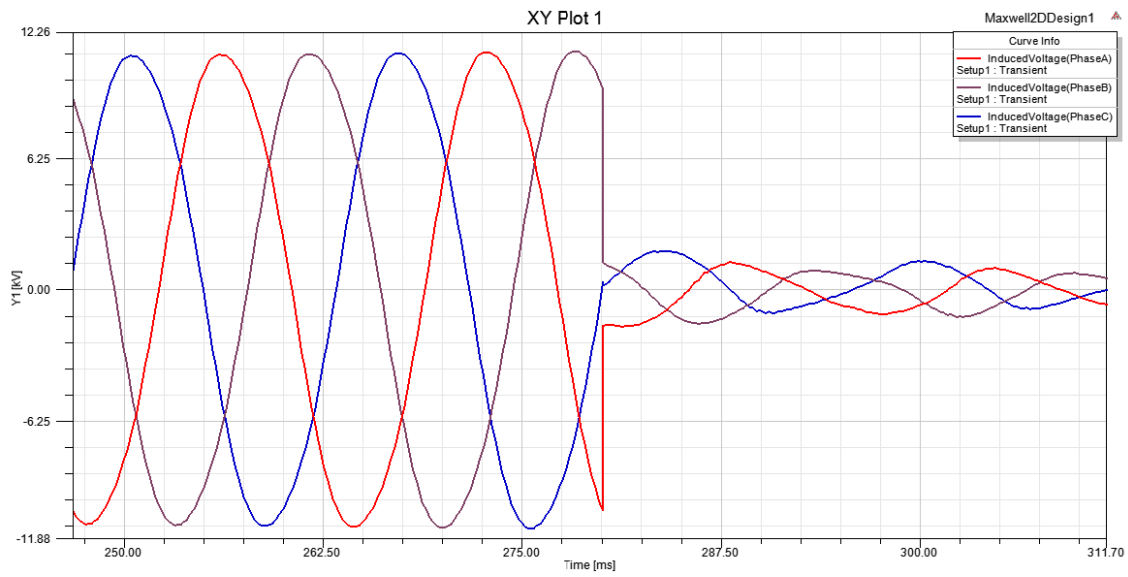


Figura 99: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=1,0.

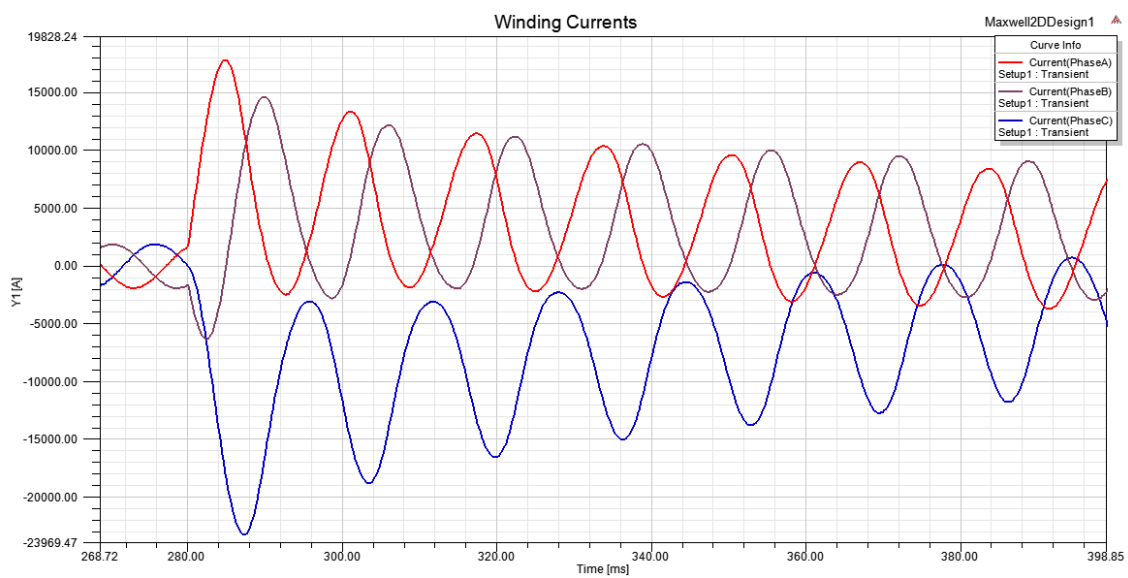


Figura 100: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - a), FP=1,0.

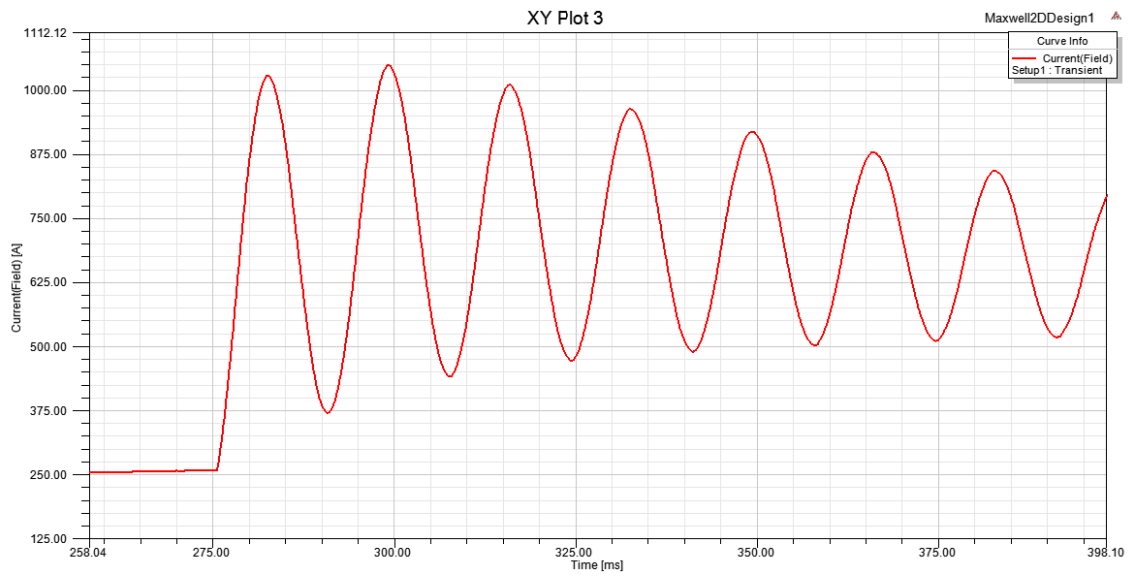


Figura 101: Corrente de campo do gerador para o cenário 4 - b) FP=1,0.

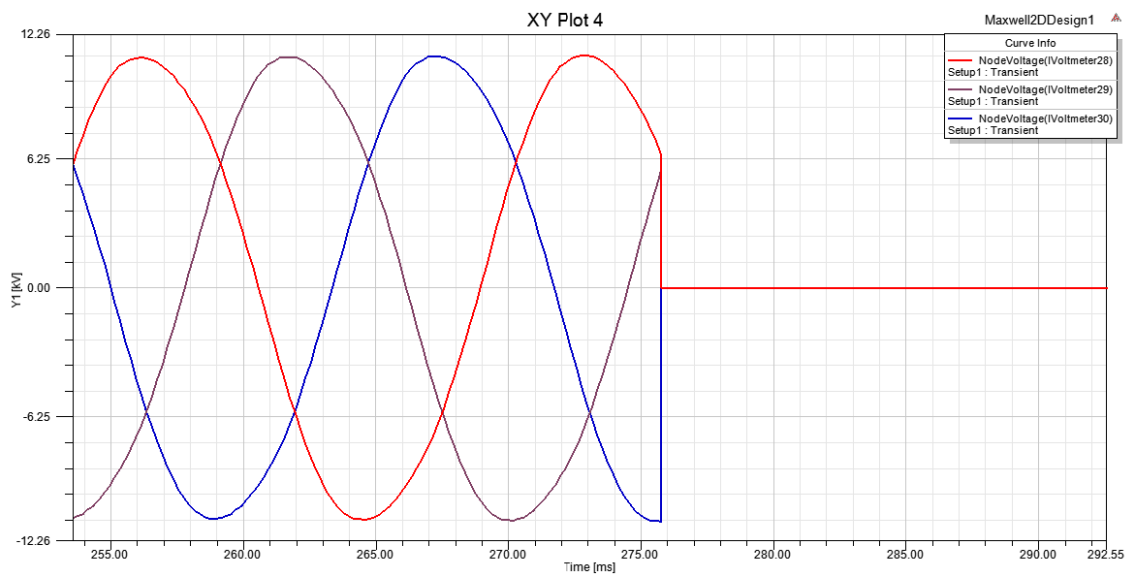


Figura 102: Gráfico de tensão terminal com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), FP=1,0.

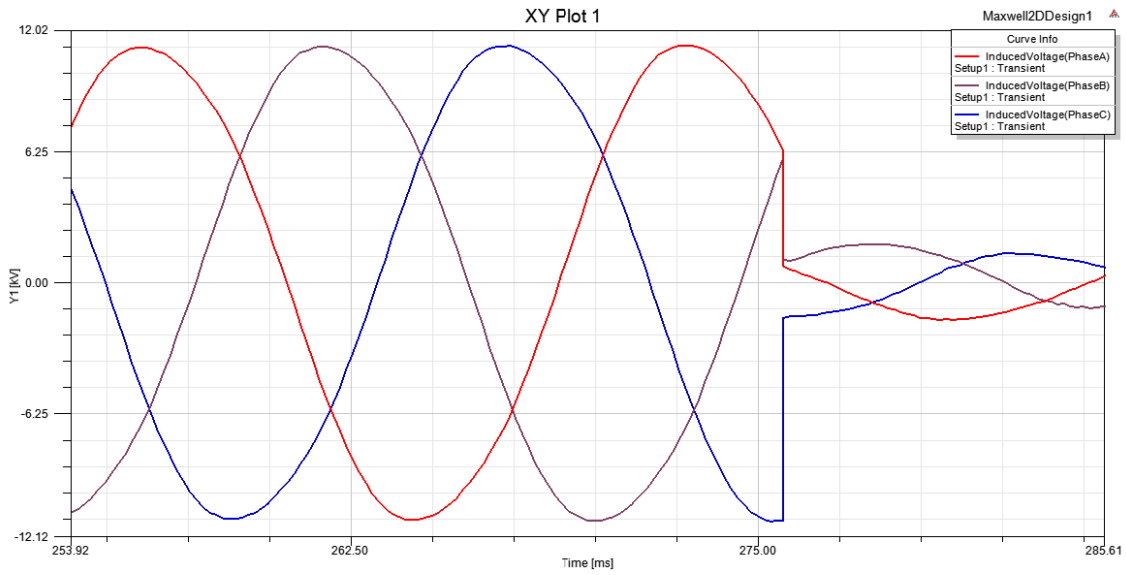


Figura 103: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 4 - b), $FP=1,0$.

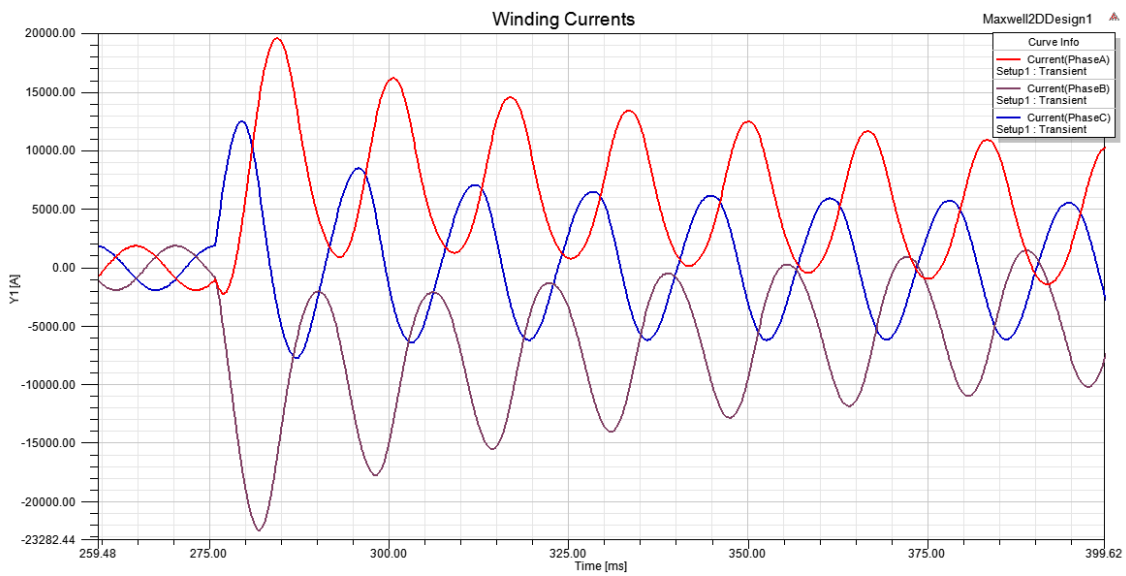


Figura 104: Corrente de curto-circuito para o cenário 4 - b), $FP=1,0$.

CENÁRIO 05 – RESISTÊNCIA DE ARCO EM DISJUNTORES A VÁCUO

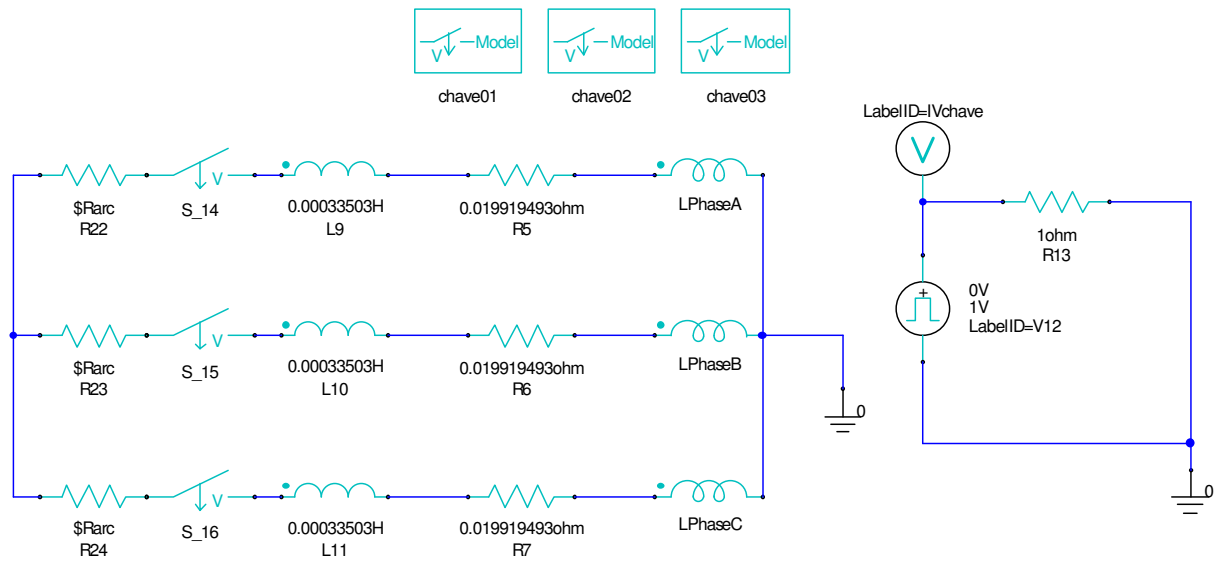


Figura 105: Circuit Editor para Cenário 5 - a).

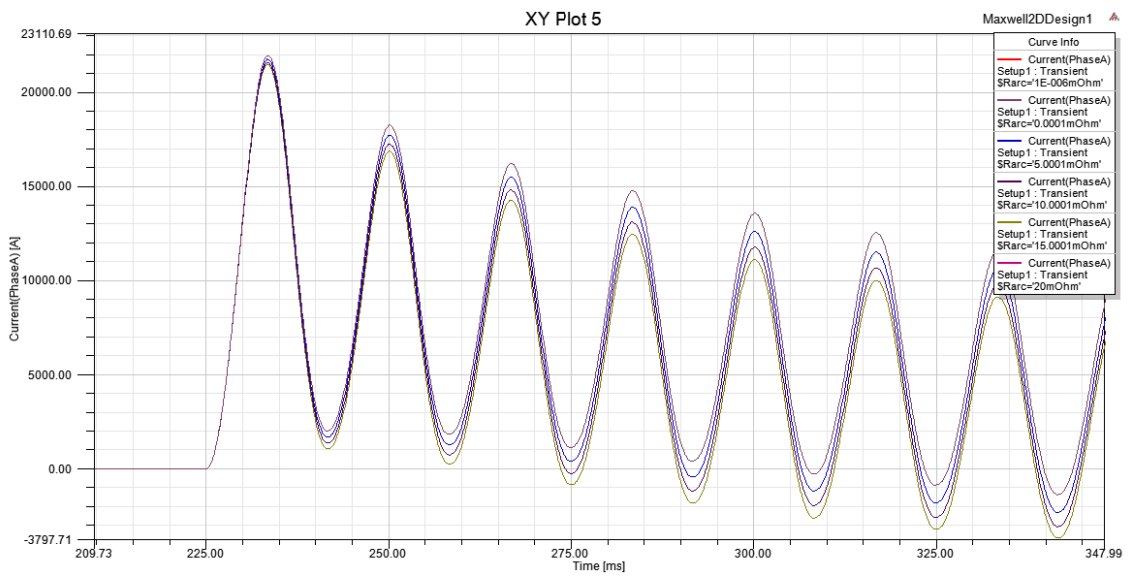


Figura 106: Variação da impedância de falta para o cenário 5 - a).

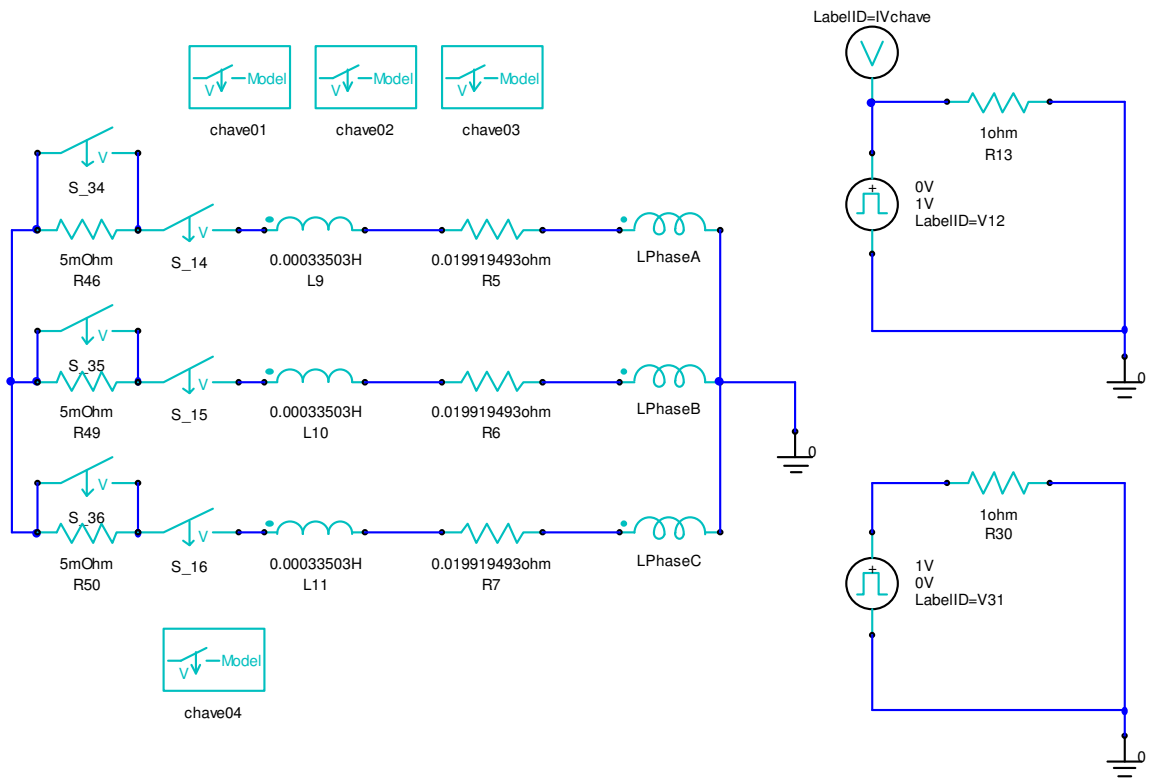


Figura 107: Circuit Editor Cenário 5- b).

CENÁRIO 06 – EFEITO DA ABERTURA DA PRIMEIRA FASE

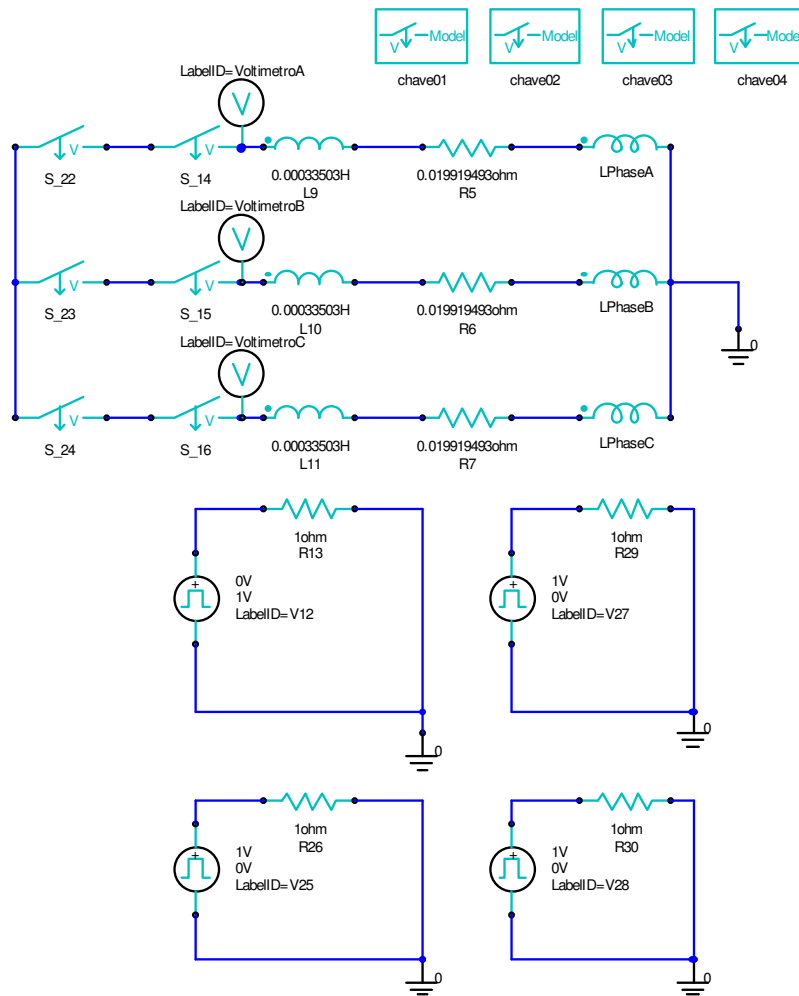


Figura 108: Circuit Editor utilizado no Cenário 6.

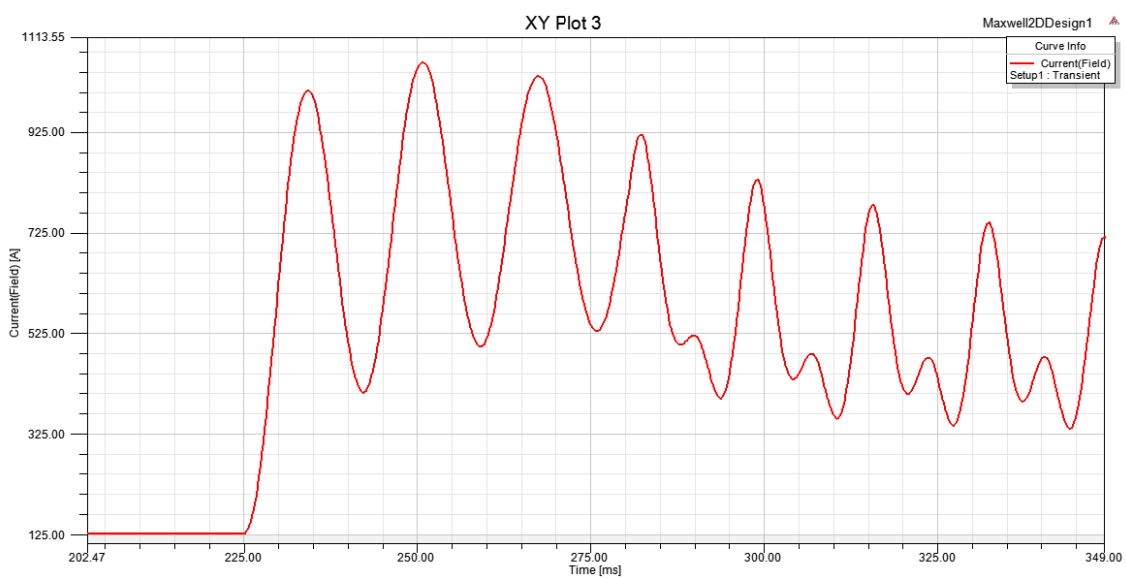


Figura 109: Corrente de campo do gerador para o cenário 6 - a).

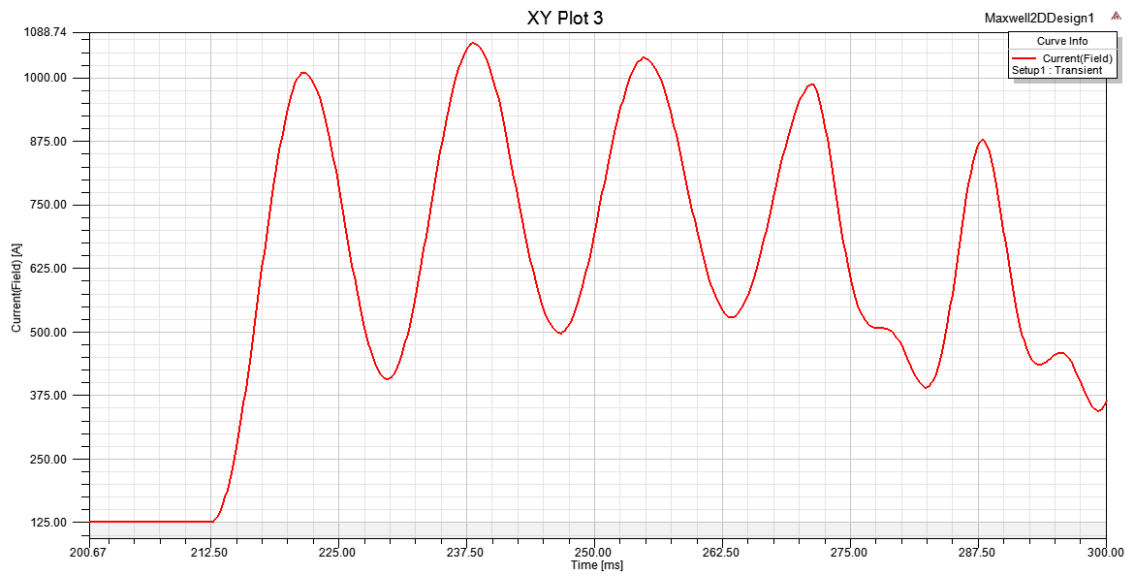


Figura 110: Corrente de campo do gerador para o cenário 6 - b).

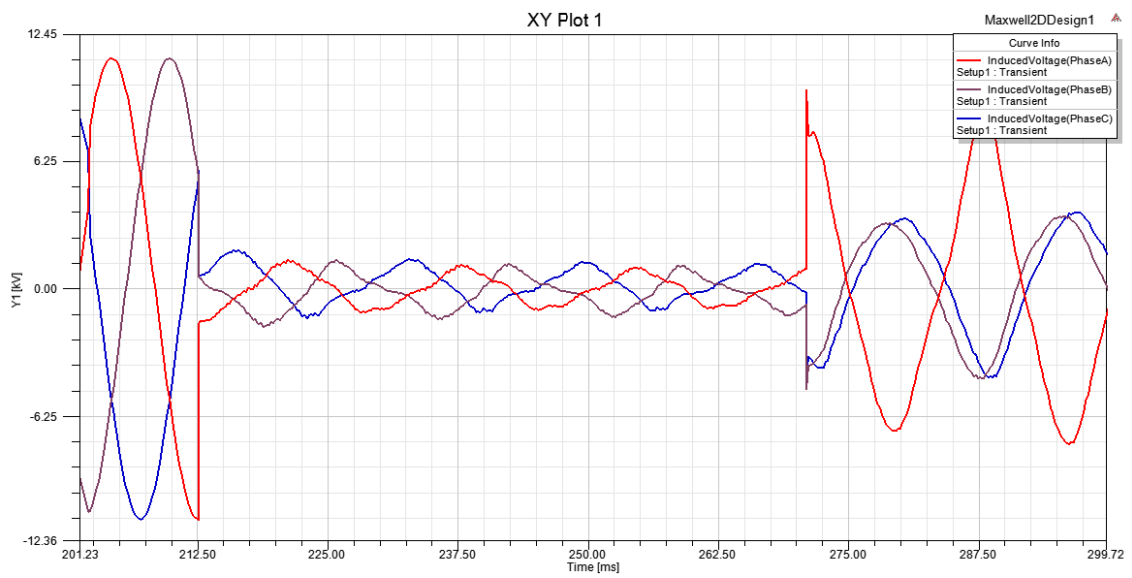


Figura 111: Gráfico da tensão induzida com o momento de aplicação do curto-circuito para o cenário 6 - b).

CENÁRIO 07 – CONTRIBUIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO

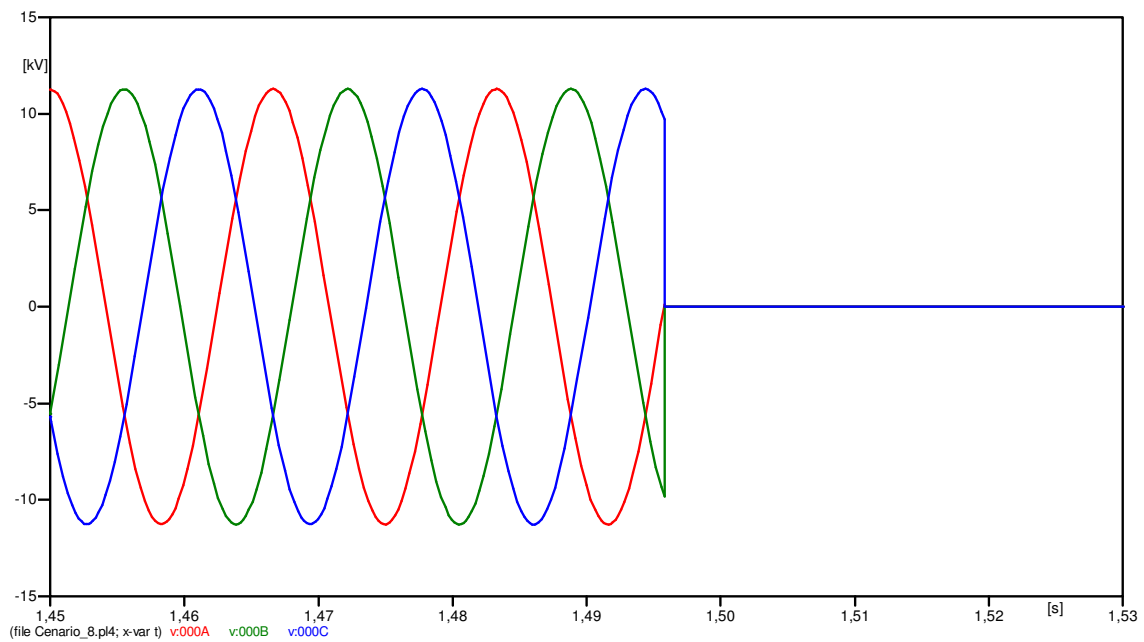


Figura 112: Tensão terminal para o cenário 7 –a).

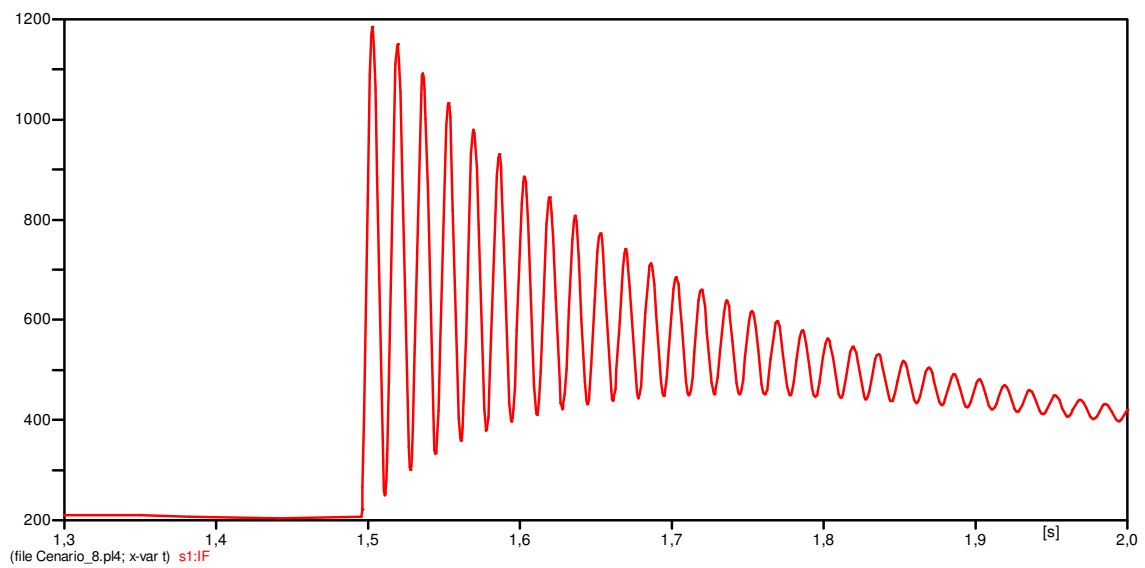


Figura 113: Corrente de campo para o cenário 7 –a)

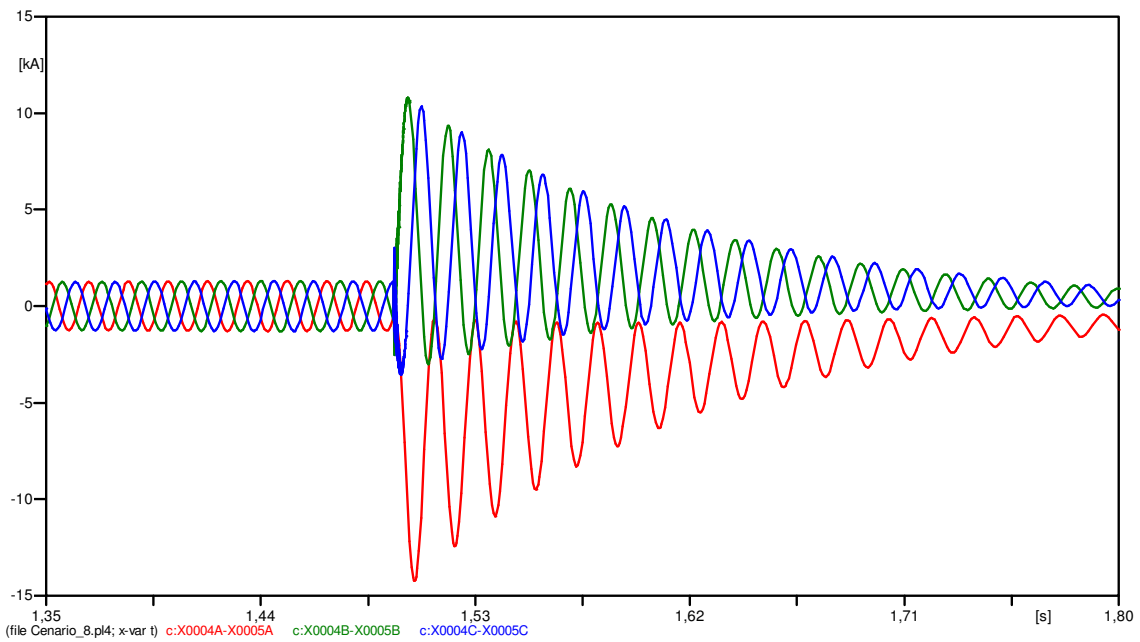


Figura 114: Contribuição do motor de indução durante o curto-circuito para o cenário 7 – a).

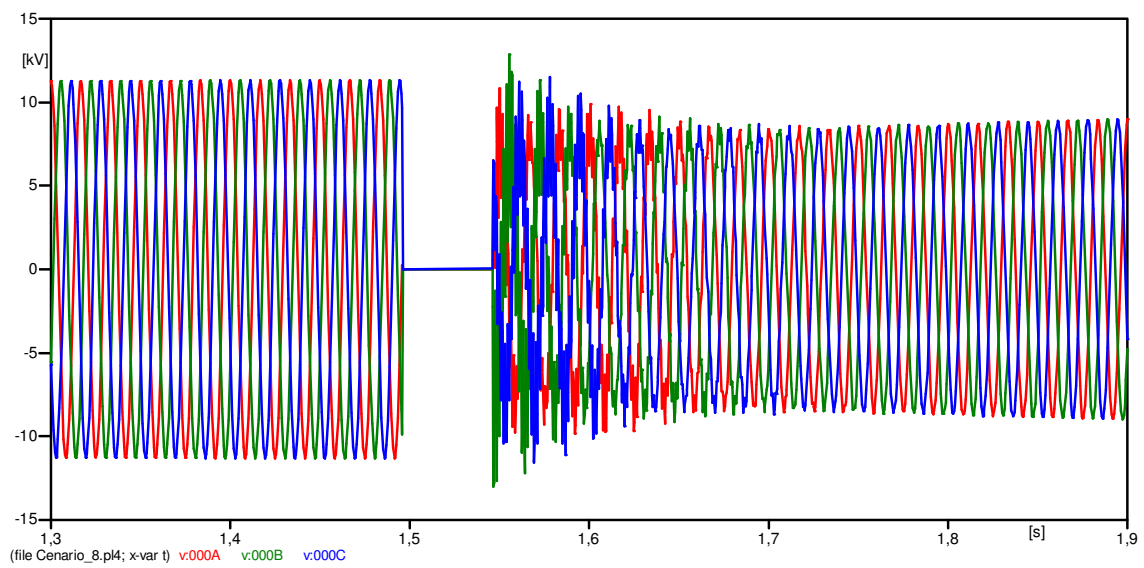


Figura 115: Tensão terminal para o cenário 7 - b).

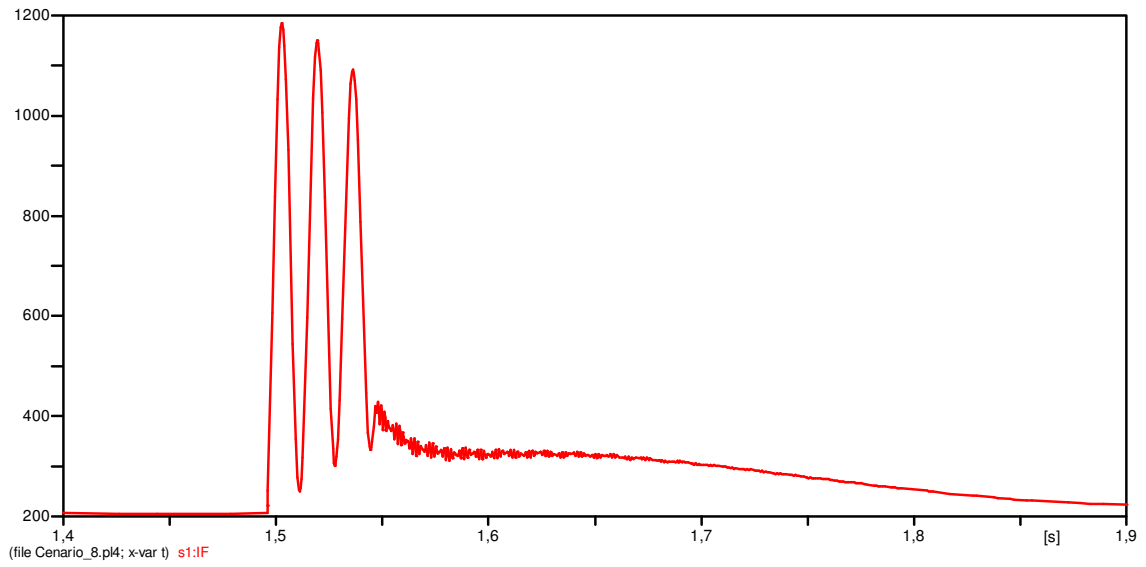


Figura 116: Corrente de campo para o cenário 7 - b).

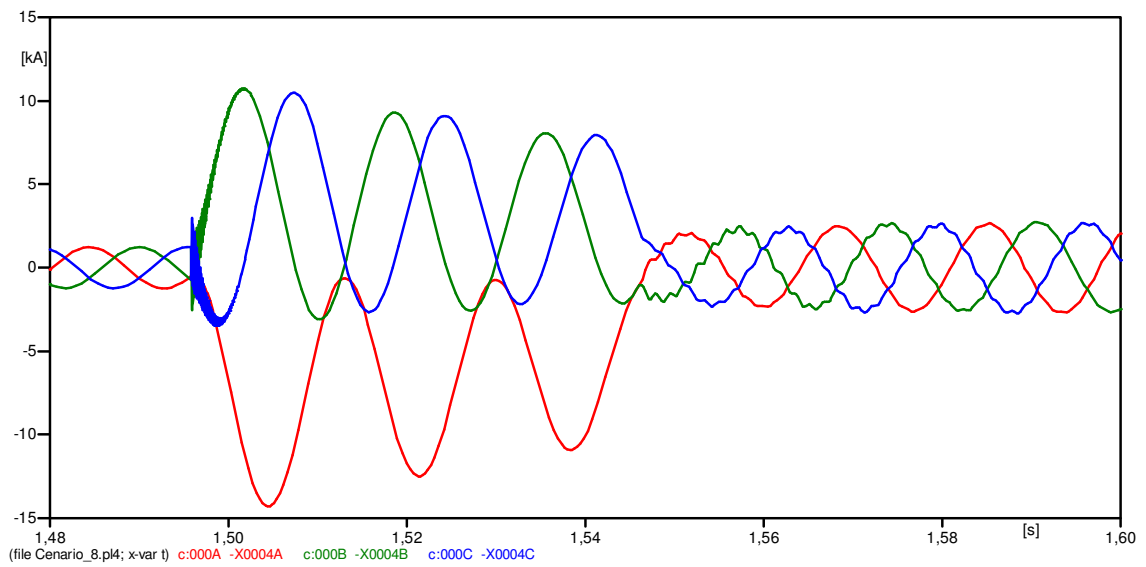


Figura 117: Contribuição do motor de indução para o cenário 7 – b)

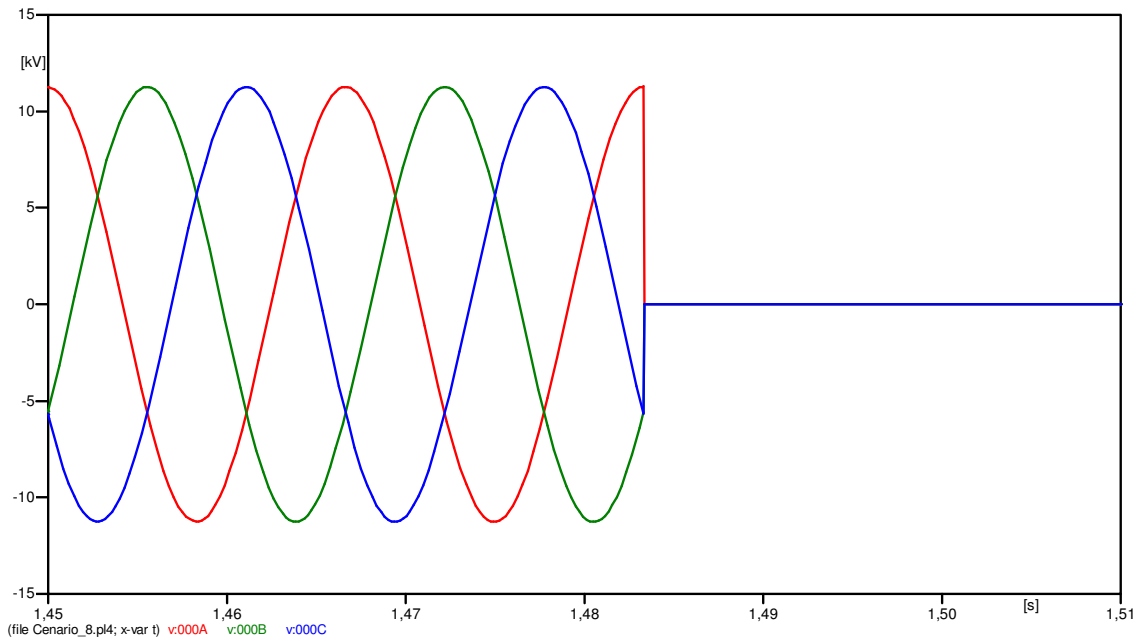


Figura 118: Tensão terminal para o cenário 7 - c).

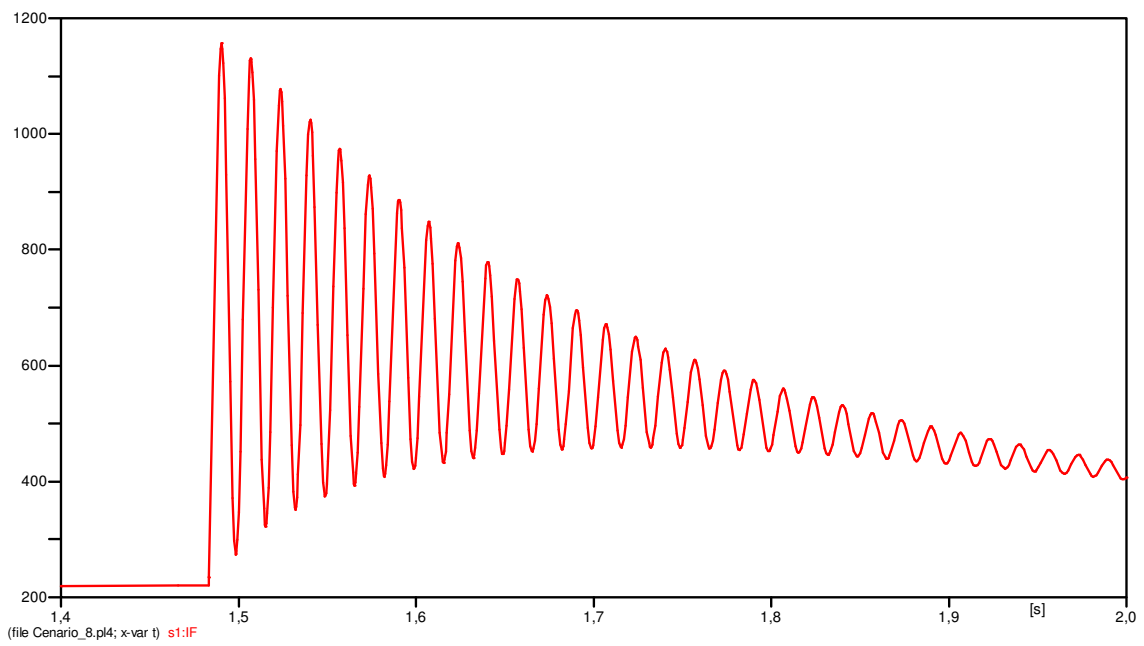


Figura 119: Corrente de campo para o cenário 7 - c).

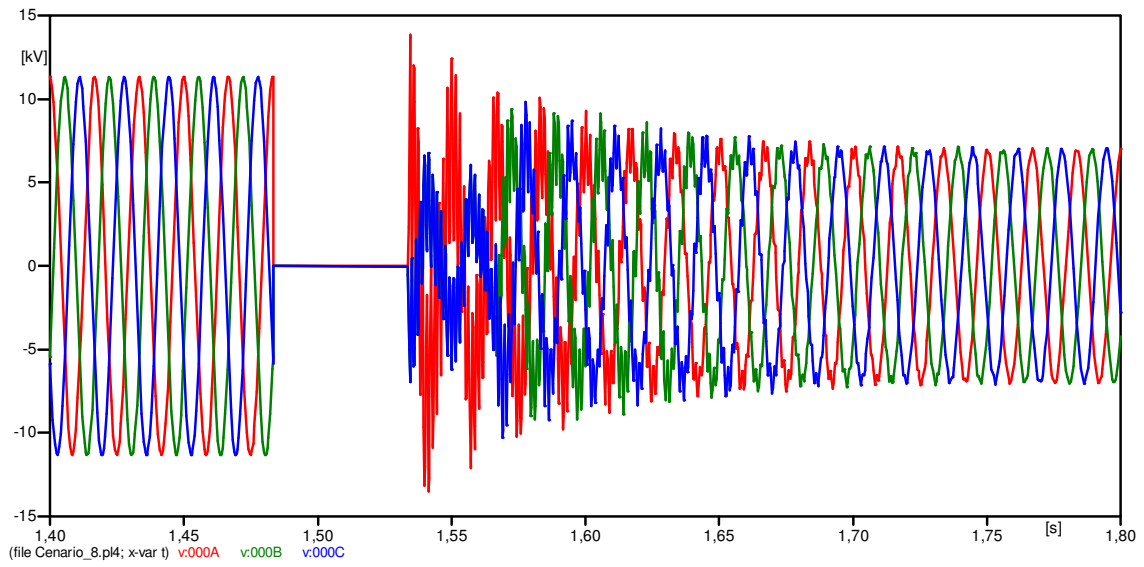


Figura 120: Tensão terminal para cenário 7 - d).

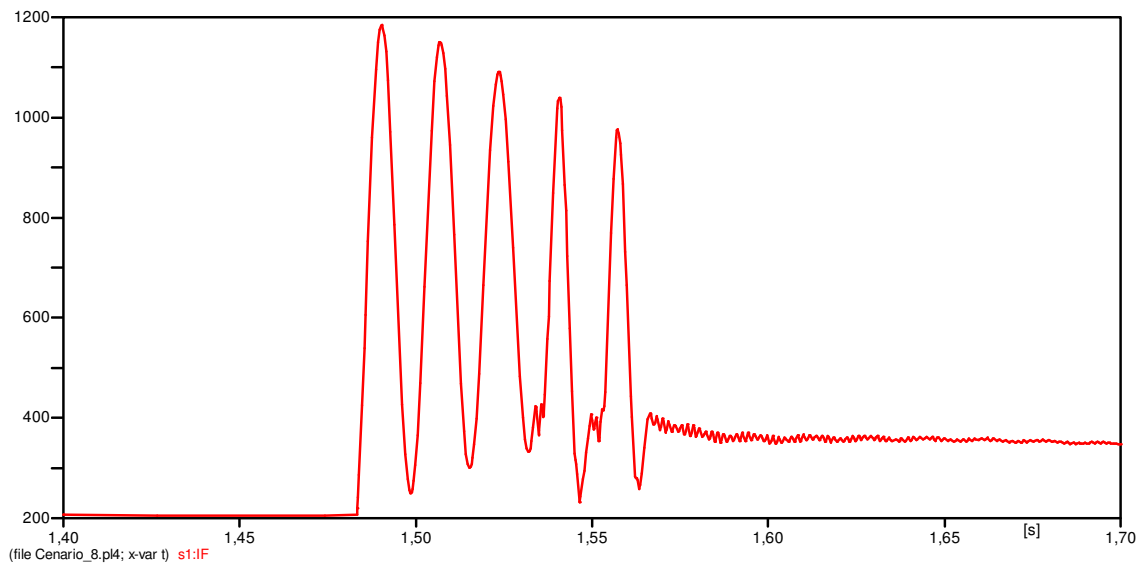


Figura 121: Corrente de campo para o cenário 7 - d).

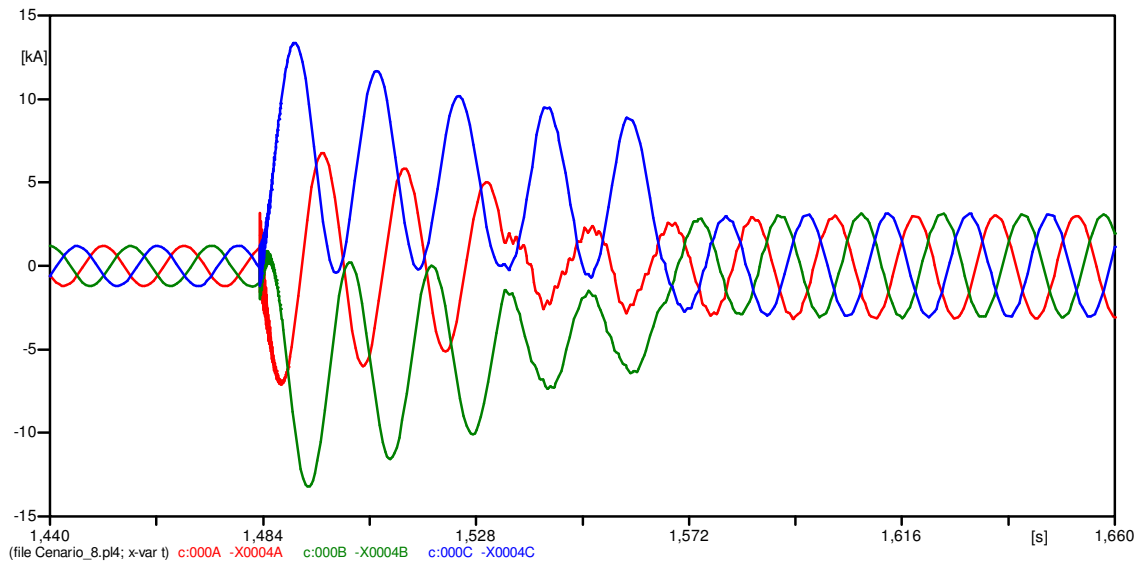


Figura 122: Contribuição do motor para o cenário 7 - d).

ANEXO 2 – RESULTADO DA INVESTIGAÇÃO DE TODAS AS POSSIBILIDADES DE ABERTURA DO DISJUNTOR SEM ATRASO INTENCIONAL NA PROTEÇÃO

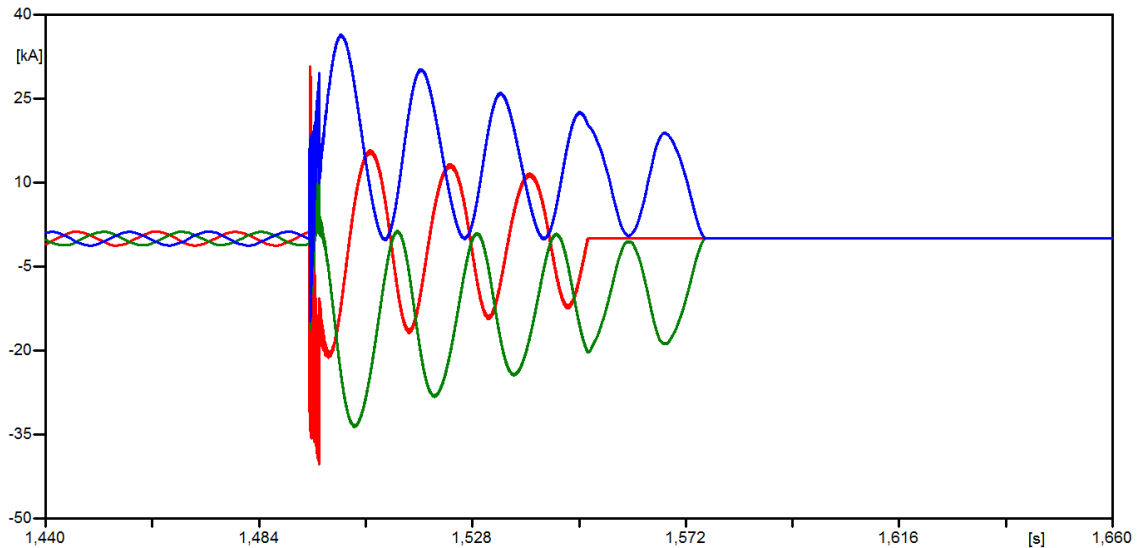


Figura 123: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 54ms.

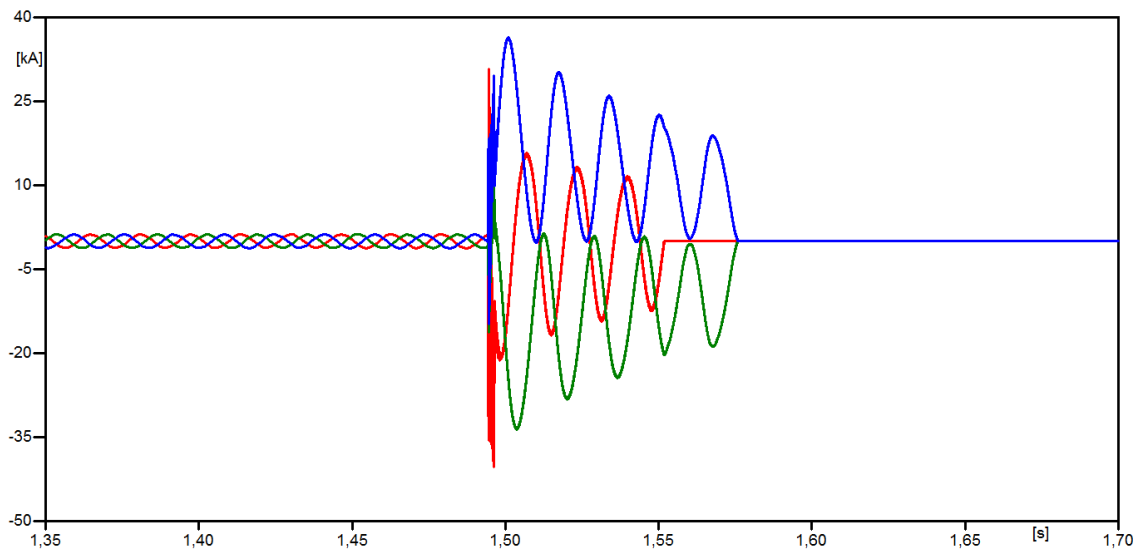


Figura 124: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 56ms.

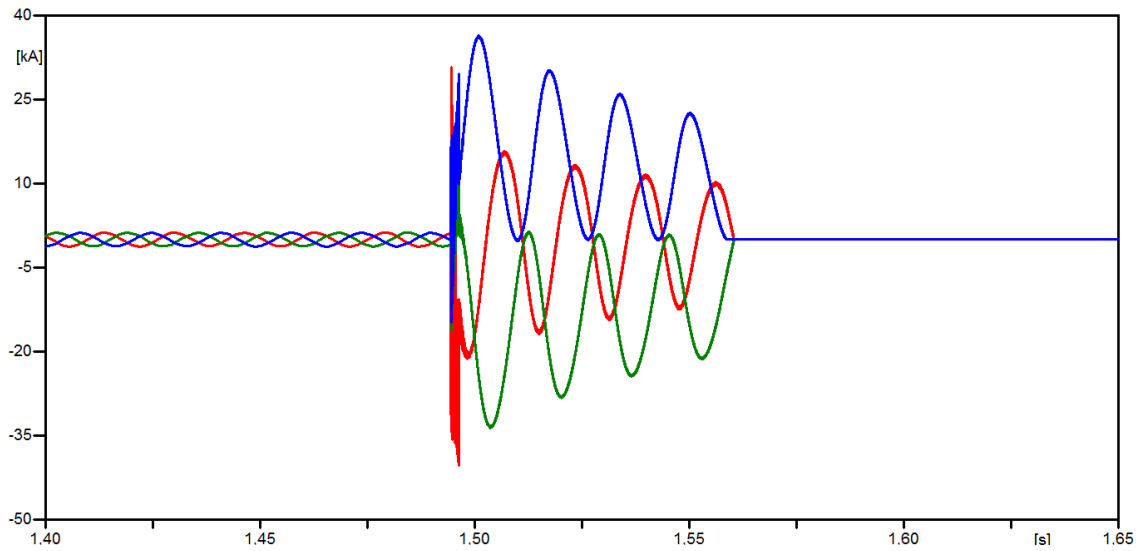


Figura 125: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 58ms.

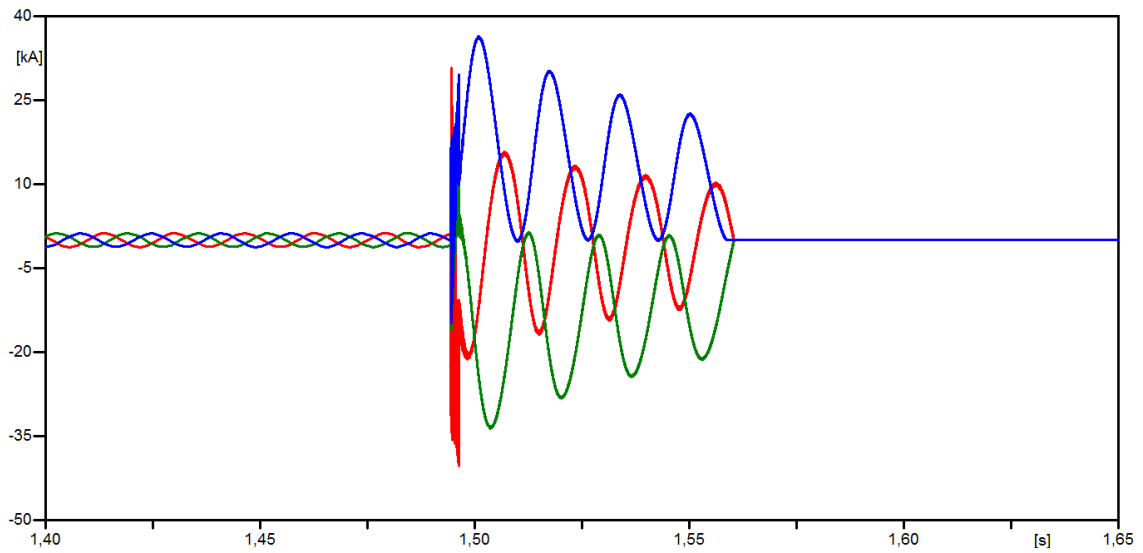


Figura 126: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 60ms.

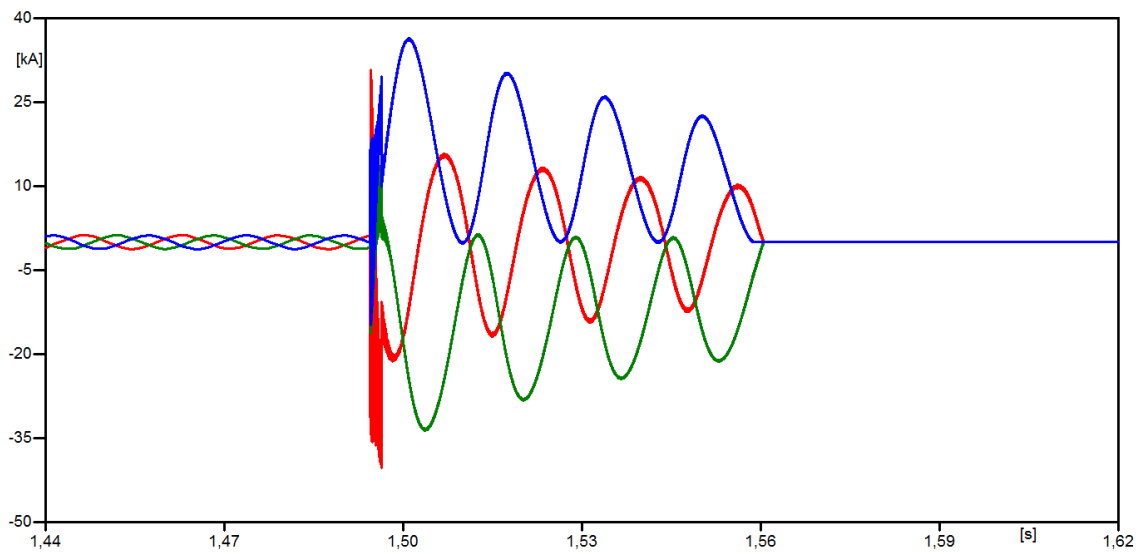


Figura 127: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 62ms.

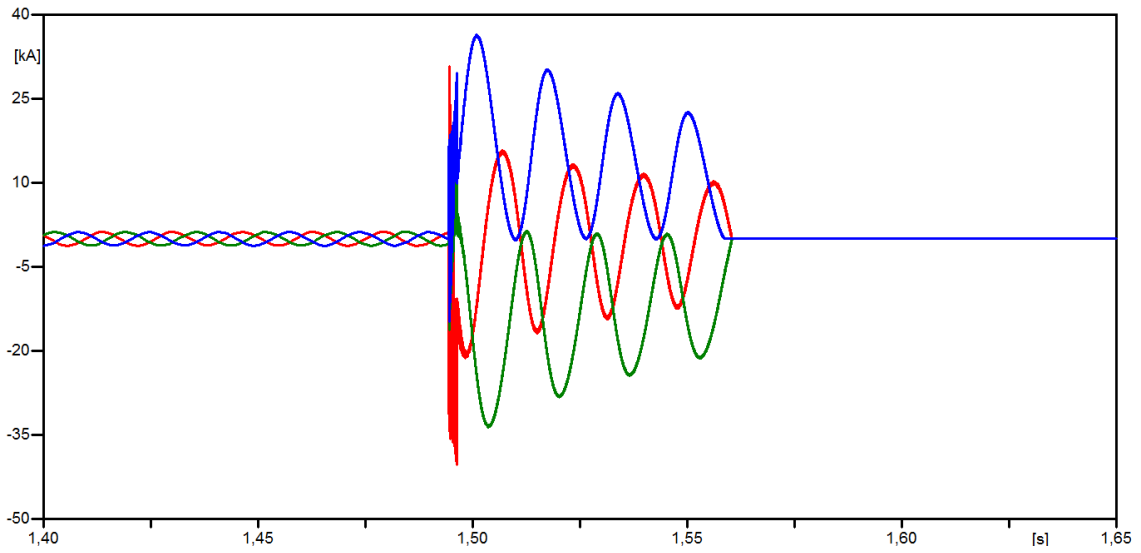


Figura 128: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 64ms.

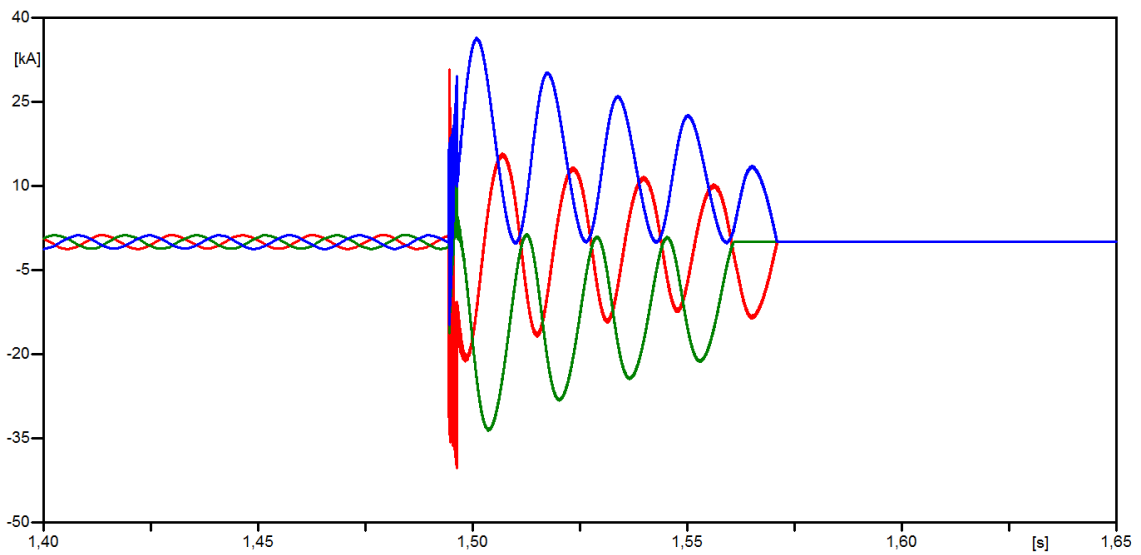


Figura 129: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 66ms.

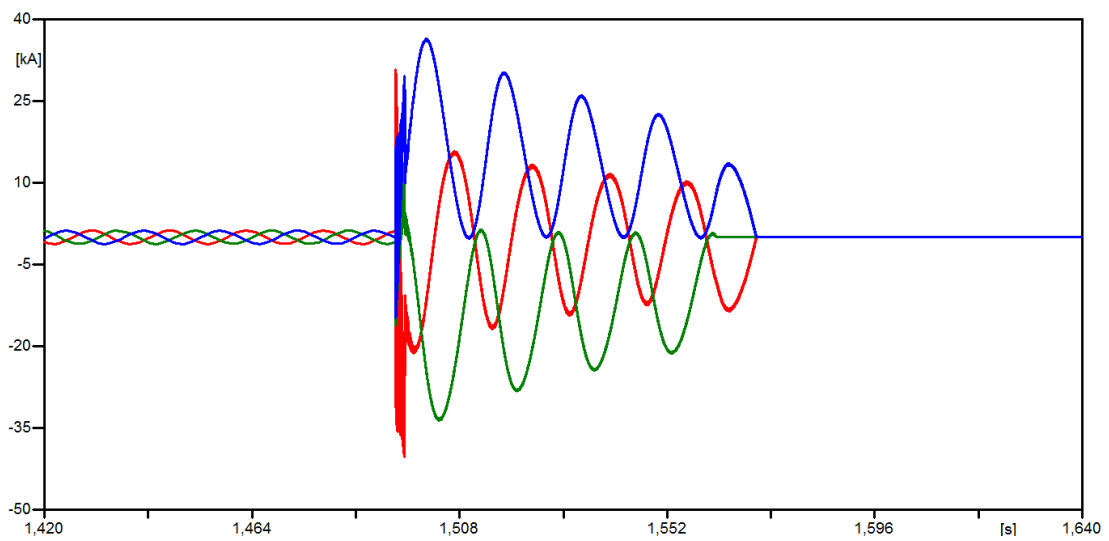


Figura 130: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 68ms.

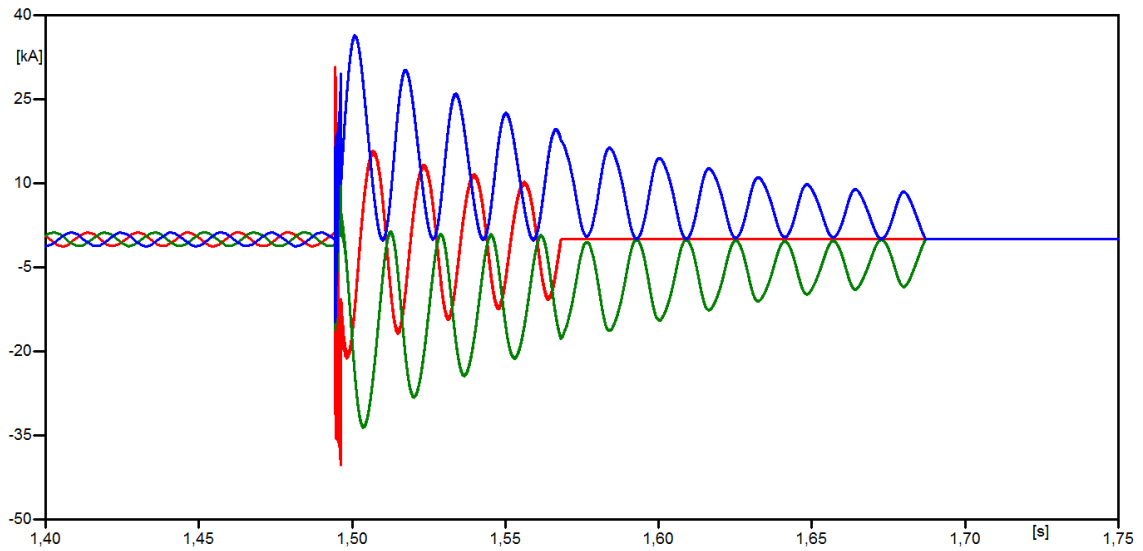


Figura 131: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 72ms.

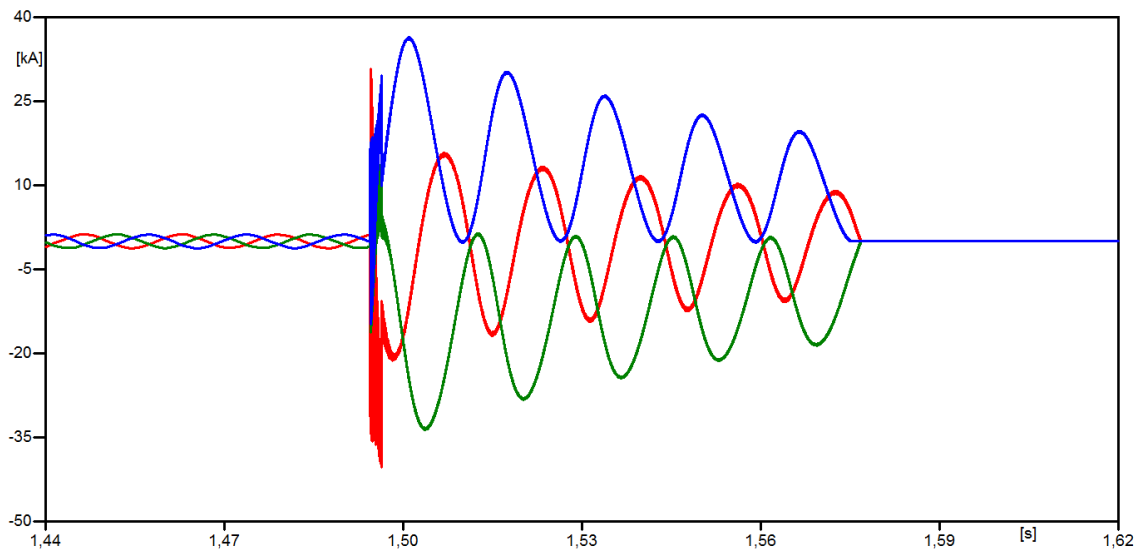


Figura 132: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 74ms.

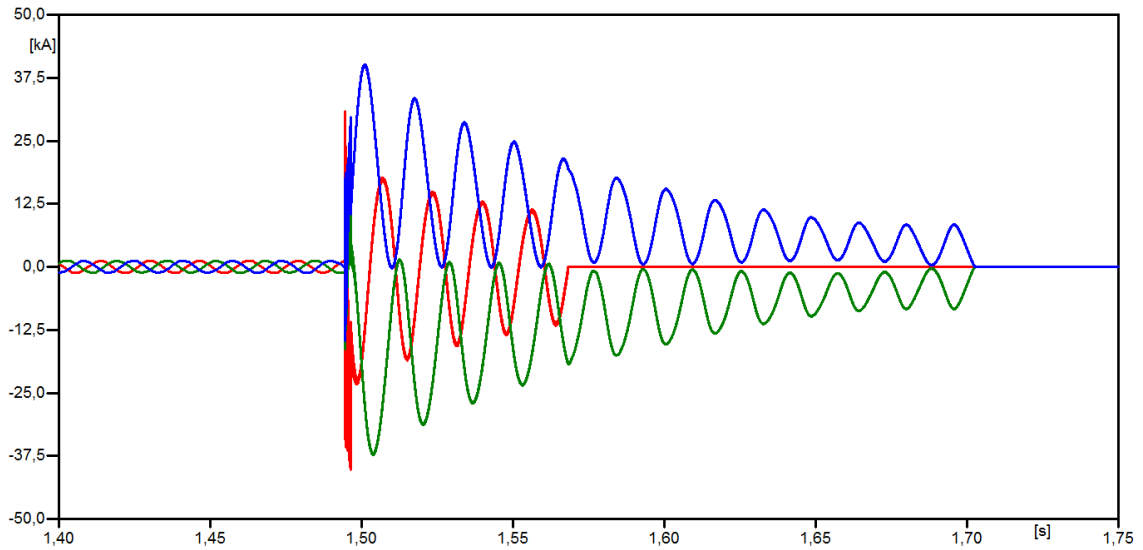


Figura 133: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 76ms.

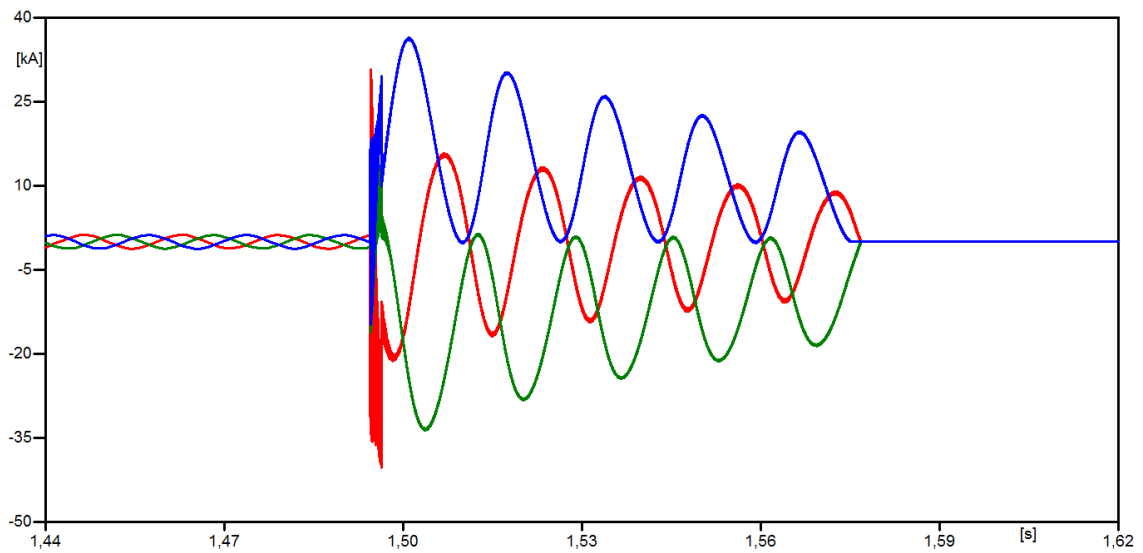


Figura 134: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 78ms.

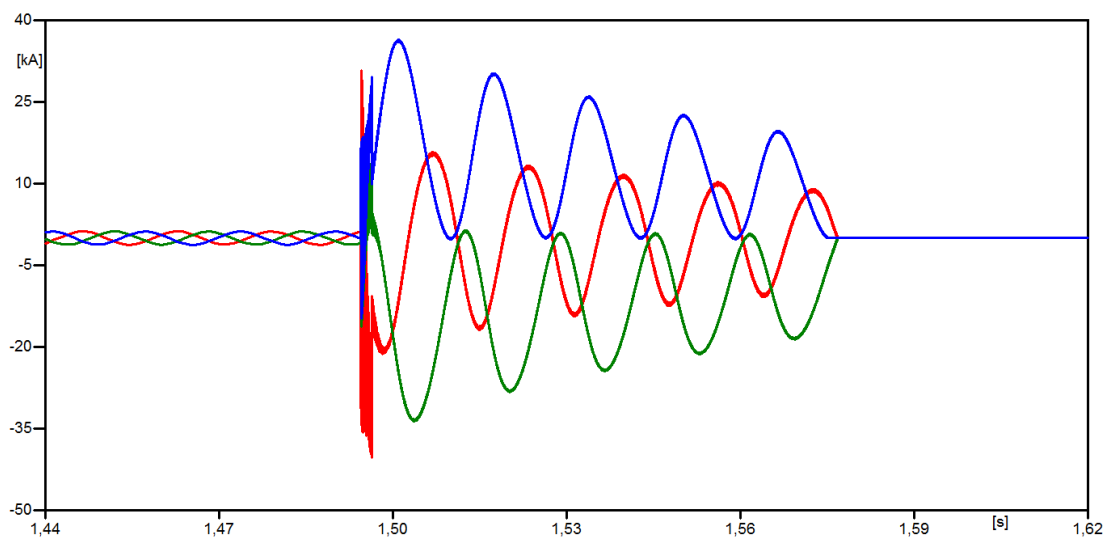


Figura 135: Caso 2.D para tempo de abertura do disjuntor de 80ms.