

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LIMITAÇÃO DE CORRENTES DE FALTA FASE-TERRA POR
MEIO DO AJUSTE DE BOBINA DE PETERSEN EM NEUTRO DE
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

JOSÉ CARLOS DE MORAES

ORIENTADOR: FRANCISCO DAMASCENO FREITAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA/DF: 13 DE FEVEREIRO – 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LIMITAÇÃO DE CORRENTES DE FALTA FASE-TERRA POR
MEIO DO AJUSTE DE BOBINA DE PETERSEN EM NEUTRO DE
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

JOSÉ CARLOS DE MORAES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.**

APROVADA POR:

**Prof. Francisco Damasceno Freitas, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

**Eng. José Daldegan Júnior, Dr. (ELETRONORTE)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA / DF, 13 DE FEVEREIRO DE 2009

FICHA CATALOGráfICA

MORAES, JOSÉ CARLOS DE

Limitação de Correntes de Falta Fase-terra por Meio do Ajuste de Bobina de Petersen em Neutro de Transformadores de Potência. [Distrito Federal] 2009.

xvii, 100p, 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2009).

Dissertação de Mestrado

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Bobina de Petersen

2. Aterramento Ressonante

3. Neutro de transformador

4. Falta fase-terra

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAES, JOSÉ CARLOS (2009). Limitação de Correntes de Falta Fase-terra por Meio do Ajuste de Bobina de Petersen em Neutro de Transformadores de Potência. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-373/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Carlos de Moraes.

TÍTULO: Limitação de Correntes de Falta Fase-terra por Meio do Ajuste de Bobina de Petersen em Neutro de Transformadores de Potência

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

José Carlos de Moraes

Alameda Ribeirão Preto 118 – apto 21.

01331-000 São Paulo – SP – Brasil.

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho aos meus pais (*in memorium*), pelo exemplo,
amor, ensinamentos que me transmitiram.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Yara, ao incentivo que sempre me deu para este trabalho.

Agradeço também aos meus filhos, Marcel, Carlos e Gustavo e netos ao carinho e compreensão que recebi.

Alguns amigos especiais não posso deixar de lembrar pelas valiosas sugestões e contribuições oferecidas. Eles são: José Alves, Geraldo Luis Costa Nicola e Rodrigo Salim.

Agradeço a meu orientador, prof. Francisco Damasceno Freitas pelo inestimável auxílio na preparação desse trabalho.

**LIMITAÇÃO DE CORRENTES DE FALTA FASE-TERRA POR MEIO DO
AJUSTE DE BOBINA DE PETERSEN EM NEUTRO DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

Autor: José Carlos de Moraes

Orientador: Francisco Damasceno Freitas

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de
Engenharia Elétrica – Universidade de Brasília**

Brasília, 13 de fevereiro de 2009

Palavras-chave: bobina de Petersen, aterramento ressonante, neutro de transformador, falta fase-terra.

RESUMO

A aplicação da bobina de Petersen ao neutro dos transformadores dos sistemas de distribuição de energia elétrica tem sido uma técnica adotada por várias concessionárias, em diferentes países, com o objetivo de reduzir as correntes de falta à terra, possibilitando uma diminuição de desligamentos devidos a faltas intermitentes e assim melhorar os índices de qualidade de energia elétrica.

Esta dissertação tem como objetivo investigar o efeito da inserção e ajuste de bobina de Petersen no neutro de um transformador de distribuição. A finalidade é a limitação da intensidade da corrente de falta fase-terra no alimentador servido pelo transformador. A bobina é ajustada de tal forma que o ponto de ressonância entre a indutância da bobina e as capacitâncias fase-terra do sistema é alcançado à frequência industrial. Ao atingir a ressonância, tem-se a redução da corrente de falta à terra e a auto-extinção do arco. São características desejáveis que possibilitam a continuidade do suprimento no sistema de distribuição.

Por meio da utilização do Programa Computacional ATP, são realizados testes em um

sistema equivalente do IEEE, no qual foram estudados os comportamentos das correntes e tensões para várias condições do neutro do transformador e da resistência de falta. Simulações realizadas em alimentadores com elevadas capacitâncias, utilizando-se os softwares ATP e Matlab, evidenciaram a eficácia do método proposto.

SINGLE-LINE-TO-EARTH FAULT LIMITATION THROUGH THE SETTING OF PETERSEN COIL IN POWER TRANSFORMER NEUTRAL

Author: José Carlos de Moraes

Supervisor: Francisco Damasceno Freitas

**Electrical Engineering Graduation Program – Department of Electrical
Engineering – University of Brasília – Brasília-DF, Brazil**

Brasília, February 13, 2009

Key-words: Petersen coil, resonant grounding, transformer neutral, single-line-to-earth fault.

ABSTRACT

The Petersen coil insertion on the neutral of the electrical distribution power system transformers has been a technical strategy adopted for several electrical utilities, in many countries with the purpose to reduce the earth-fault current intensities, enabling circuit disconnect decrease for intermittent faults and so to improve the electrical power quality.

The aim of this dissertation is to verify the effects of insertion and adjust of the Petersen coil in the neutral of a power transformer. The purpose is to limit the feeder fault phase-earth current. The coil is adjusted in such way that its inductance reaches a resonant point with the phase-earth capacitances of the system on power frequency industry. At this point, the level of the line-to-earth fault current is reduced and the voltage arc is self-extinguished. This procedure contributes with electrical service interruptions decrease.

Tests are accomplished with the ATP Computational Program on IEEE equivalent system. The currents and voltage variation are studied for several neutral transformers and fault resistance values. Tests are carried out on feeders with high capacitances employing Matlab and ATP softwares clarify the efficacy of the methodology presented.

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	04
1.3 - OBJETIVO	04
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	04
2 - QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA REGULAMENTAÇÃO.....	06
2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	06
2.2 - NORMAS E ORGANIZAÇÕES.....	06
2.3 - PROCEDIMENTO ANEEL PARA CONTRÔLE DE INTERRUPÇÕES[39]07	
3 - METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	09
3.1 - METODOLOGIA - ATERRAMENTO RESSONANTE	09
3.1.1 - Introdução	09
3.1.2 - Equacionamento	09
3.1.3 - Circuito de sequência zero	12
3.2 - TIPOS DE ATERRAMENTO DO NEUTRO DE TRANSFORMADORES .	14
3.2.1 - Sistema não aterrado.....	15
3.2.2 - Aterramento sólido ou efetivo	17
3.2.3 - Aterramento através de baixa impedância	17
3.2.4 - Aterramento através de alta impedância	17
3.2.5 - Aterramento ressonante.....	19
3.3 - AUTO-EXTINÇÃO DE ARCO	19
3.4 - ESTADO DA ARTE.....	21
3.4.1 - Bobina supressora de arco.....	21
3.4.2 - Compensação de falta à terra [26]	29
3.5 - EXPERIÊNCIA DE ALGUMAS EMPRESAS NO MUNDO.....	31
3.5.1 - Experiências de implantação do sistema de neutro ressonante na subestação de Gorliz [10]	31
3.5.2 - Aumento da continuidade com bobinas de Petersen e automação na rede de média tensão	37

4 - TESTES PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE ATERRAMENTO	40
4.1 - SISTEMAS ISOLADO, SOLIDAMENTE ATERRADO E ATERRADO POR RESISTÊNCIA	40
4.1.1 - Simulações transitórias no sistema IEEE13 modificado.....	40
4.1.1.1 - Sistema isolado.....	42
4.1.1.2 - Sistema aterrado solidamente.....	46
4.1.1.3 - Sistema aterrado com $R_n = 10\Omega$	50
4.1.1.4 - Sistema aterrado com $R_n = 100\Omega$	54
4.1.1.5 - Avaliação sobre os resultados das simulações	57
4.2 - TESTES COM A INSERÇÃO DA BOBINA DE PETERSEN	60
4.2.1 - Introdução	60
4.2.2 - Sistema aéreo com baixas capacitâncias	60
4.2.2.1 - Sistema-teste com alimentador aéreo	61
4.2.2.2 - Simulações no domínio do tempo e da frequência.....	62
4.3 - SISTEMA COM ALIMENTADOR FORMADO POR CABOS COMPACTOS	70
4.3.1 - Descrição do sistema	70
4.3.2 - Procedimento de ajuste da bobina de Petersen	72
4.3.3 - Simulações realizadas.....	75
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	77
5.1 - CONCLUSÕES GERAIS	77
5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
APÊNDICES	85
A - Dados do IEEE 13 Node Test Feeder [42].....	86
B - Simulações complementares para avaliação do sistema de aterramento por resistor. de neutro.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Padrão de continuidade por unidade de consumidor[39].	7
Tabela 3.1 -Comparação dos métodos de aterramento para sistemas de média tensão de distribuição.	15
Tabela 3.2 - Características dos diversos tipos de aterramento.	22
Tabela 3.3 - Comparação entre sistema isolado e sistema de aterramento compensado.....	24
Tabela 3.4 - Comprimento dos circuitos dos sistemas em várias tensões x tipos de aterramentos na Alemanha (também representativa para Austria, Suíça, Hungria, Polônia etc.).....	26
Tabela 3.5 - Redução do número de interrupções na Itália (ENEL)	26
Tabela 3.6 - Características da bobina de supressão de arco [12].	28
Tabela 3.7 - Características dos circuitos alimentadores de uma subestação da Iberdrola .	33
Tabela 3.8 - Crescimento do número de barramentos com aterramento ressonante	38
Tabela 3.9 - Redução dos desligamentos em função do número de bobinas instaladas / número de meses /número de barramentos .).....	39
Tabela 4.1 - Parâmetros do alimentador	61
Tabela 4.2 - Parâmetros do equivalente de Norton e do ajuste da bobina	76
Tabela 4.3 - Grandezas calculadas considerando o ajuste.....	76
Tabela A.1 - Dados da configuração com cabo subterrâneo	86
Tabela A.2 - Dados da configuração com linha aérea	86
Tabela A.3 - Dados do trecho de linha	86
Tabela A.4 - Dados do capacitor.	86
Tabela A.5 - Dados do regulador.....	87
Tabela A.6 - Dados do transformador.	87
Tabela A.7 - Dados da carga concentrada.	87
Tabela A.8 - Dados da carga distribuída	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação do circuito trifásico.....	9
Figura 3.2 – Circuito de sequência zero do sistema trifásico da Figura 3.1, na condição de uma falta à terra.	12
Figura 3.3 – Circuito do sistema trifásico não aterrado.....	16
Figura 3.4 – Representação fasorial das tensões fase-neutro e correntes capacitivas numa rede trifásica com neutro isolado, na condição de falta à terra na fase B.....	16
Figura 3.5 – Circuito do sistema trifásico aterrado e a correspondente representação fasorial.	18
Figura 3.6 – Representação do circuito do sistema trifásico aterrado com bobina de Petersen.....	19
Figura 3.7 – Curva tensão do sistema x corrente limite de falta.	20
Figura 3.8 – Representação do circuito na condição de falta à terra.	22
Figura 3.9 – Representação fasorial do circuito com aterramento ressonante com as tensões em operação normal e durante falta à terra.....	22
Figura 3.10 – Circuito equivalente de sequência zero.....	23
Figura 3.11 – Curva mostrando o ponto de ressonância em relação ao ajuste da corrente na bobina de Petersen e a tensão V_0 / E_1	24
Figura 3.12 – Tipos de conexão de transformador de aterramento separado.....	27
Figura 3.13 – Vista detalhada da bobina de supressora de arco.	28
Figura 3.14 – Vista de subestação 110/20 kV com bobina de supressão de arco.	29
Figura 3.15 – Vista geral da bobina supressora de arco.	29
Figura 3.16 – Vista dos controladores de compensação de falta EFC20 e EFC20i.	31
Figura 3.17 – Topologia do sistema de distribuição da Iberdrola.	34
Figura 3.18 – Curva da variação de corrente de falta no ponto de falta, para sistema solidamente aterrado.	35
Figura 3.19 – Curva da variação da corrente no ponto de falta, para sistema aterrado através de bobina supressora de arco (ii), comparado com a corrente devido ao aterramento sólido (i).....	36
Figura 3.20 – Curva da variação da tensão no ponto de falta, para sistema solidamente aterrado (i) e sistema aterrado através de bobina supressora (ii).....	36
Figura 4.1 – Diagrama unifilar do alimentador.	41

Figura 4.2 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A.....	43
Figura 4.3 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A.....	43
Figura 4.4 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f=1\Omega$ – falta na fase A.....	44
Figura 4.5 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f=1\Omega$ – falta na fase A.....	45
Figura 4.6 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f=10\Omega$ – falta na fase A.....	45
Figura 4.7 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f=10\Omega$ – falta na fase A.....	46
Figura 4.8 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A.....	47
Figura 4.9 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A.....	47
Figura 4.10 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=1\Omega$ – falta na fase A.....	48
Figura 4.11 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=1\Omega$ – falta na fase A.....	49
Figura 4.12 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=10\Omega$ – falta na fase A.....	49
Figura 4.13 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=10\Omega$ – falta na fase A.....	50
Figura 4.14 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A.....	51
Figura 4.15 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A.....	51
Figura 4.16 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A.....	52
Figura 4.17 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A.....	52

Figura 4.18 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A.....	53
Figura 4.19 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A.....	53
Figura 4.20 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A.....	54
Figura 4.21 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A– zoom no ponto transitório logo que a falta é eliminada.....	54
Figura 4.22 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A.....	55
Figura 4.23 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A.....	55
Figura 4.24 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A.....	56
Figura 4.25 – Curvas das tensões – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A.....	56
Figura 4.26 – Curvas das correntes – neutro aterrado com $R_n = 100\Omega$ – resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A.....	57
Figura 4.27 – Tensão no neutro para duas situações de operação e para algumas situações de aterramento de neutro.....	63
Figura 4.28 – Tensão do neutro para duas situações de operação e de aterramento do neutro – escala vertical está em escala logaritmica para melhor ilustrar juntos os resultados das quatro situações simuladas.....	63
Figura 4.29 – Magnitude da admitância $Y(j\omega)$, em Siemens.....	65
Figura 4.30 – Fase da admitância $Y(j\omega)$, em graus.....	65
Figura 4.31 – Magnitude de $Z(j\omega)$	67
Figura 4.32 – Fase de $Z(j\omega)$	68
Figura 4.33 – Corrente de falta enfatizando as características transitórias dominantes em altas frequências.....	68
Figura 4.34 – Tensão no neutro.....	69
Figura 4.35 – Corrente de falta com valores de $R_n = X_n = 100$ Ohms.....	69
Figura 4.36 – Tensões resultantes no ponto de falta.....	70

Figura 4.37 – Modelo equivalente de alimentador com “aterramento ressonante”	71
Figura 4.38 – Circuito equivalente de Norton no neutro do transformador.....	73
Figura B.1 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	88
Figura B.2 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	89
Figura B.3 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 500\Omega$ – falta na fase A.....	89
Figura B.4 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 500\Omega$ – falta na fase A.....	90
Figura B.5 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ – falta na fase A.....	90
Figura B.6 – Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ – falta na fase A.....	91
Figura B.7 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	91
Figura B.8 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	92
Figura B.9 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 500\Omega$ – falta na fase A.....	92
Figura B.10 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 500\Omega$ – falta na fase A.....	93
Figura B.11 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ – falta na fase A.....	93
Figura B.12 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ – falta na fase A.....	94
Figura B.13 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	94
Figura B.14 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ – resistência de falta $R_f = 100\Omega$ – falta na fase A.....	95

Figura B.15 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n=10\Omega$ – resistência de falta $R_f=500\Omega$ – falta na fase A.....	95
Figura B.16 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n=10\Omega$ – resistência de falta $R_f=500\Omega$ – falta na fase A.....	96
Figura B.17 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n=10\Omega$ – resistência de falta $R_f=10k\Omega$ – falta na fase A.....	96
Figura B.18 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n=10\Omega$ – resistência de falta $R_f=10k\Omega$ – falta na fase A.....	97
Figura B.19 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=100\Omega$ – falta na fase A.....	98
Figura B.20 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=100\Omega$ – falta na fase A.....	98
Figura B.21 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=500\Omega$ – falta na fase A.....	99
Figura B.22 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=500\Omega$ – falta na fase A.....	99
Figura B.23 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=10k\Omega$ – falta na fase A.....	100
Figura B.24 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n=100\Omega$ – resistência de falta $R_f=10k\Omega$ – falta na fase A.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

DEC	- Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
FEC	- Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
DIC	- Duração da Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FIC	- Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
X_0	- Reatância de sequência zero
R_0	- Resistência de sequência zero
x_1	- Reatância de sequência zero
F_e	- Fator de elevação da tensão fase-terra em relação à tensão fase-neutro
E_1	- Tensão fase-neutro do sistema
R_A, R_B, R_C	- Resistência de dispersão fase-terra
S_F	- Seccionador no ponto de falta à terra
I_{NG}	- Corrente neutro – terra
V_{NG}	Tensão neutro – terra
R_F	- Resistência de falta à terra
L_P	- Indutância da bobina de Petersen
I_b	- Corrente através da bobina de Petersen
I_e	- Corrente capacitiva no ponto da falta
I_r	- Corrente residual
I_R	- Corrente capacitiva da fase R
I_S	- Corrente capacitiva da fase S
I_T	- Corrente capacitiva da fase T
L_b	- Indutância da bobina de Petersen
I_e	- Corrente capacitiva à terra
$C_1,$	- Capacitância
C_{AB}, C_{AC}	- Capacitância entre fases
$, C_{BC},$	
C_A, C_B, C_C	- capacitância do condutor em relação à terra

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A qualidade da energia vem sendo tratada, nos dias de hoje, de uma maneira bastante exigente fazendo com que as empresas distribuidoras de energia elétrica procurem tomar decisões que impliquem em melhoria no fornecimento de energia ao consumidor.

Sabe-se que durante faltas para a terra, ações visando o controle do nível de corrente e de tensão devem ser tomadas a fim de evitar possíveis danos para a rede elétrica, inclusive para o consumidor. O controle do nível de corrente durante faltas para a terra é uma estratégia que pode proporcionar resultados, desde que adequadamente implementado.

Entretanto, o referido controle não é um procedimento direto, carecendo mais investigação e por isso justificando diversas pesquisas sobre o tema, entre as quais a citada na referência [3].

Sabe-se que 80% das faltas à terra em linhas aéreas são temporárias, mas provocam a abertura dos disjuntores e a interrupção do fornecimento de energia elétrica. A forma de tratamento do aterramento do neutro dos transformadores torna-se uma ferramenta importante tanto para melhorar o aspecto da qualidade de energia elétrica fornecida quanto para aliviar as malhas de terra das instalações novas e das existentes.

Assim, a melhor maneira de utilização do neutro dos transformadores com o intuito de também melhorar a qualidade de energia tem sido objeto de estudos de empresas de energia elétrica, de universidades e de fabricantes. Baseados no invento de Waldemar Petersen, em 1917, a bobina que levou o nome do seu criador, bobina de Petersen, já conta hoje com inúmeros desenvolvimentos industriais, tais como:

- Bobina de Supressão de Arco – Trench [28], que consiste num reator de alta impedância dimensionado para compensar, através de chaveamento manual, ou ajuste motorizado, a capacitância do condutor em relação à terra e dessa forma encontrar o ponto ótimo de mínima corrente de falta e auto-extinção do arco.

- Compensação de Falta à Terra – Trench [26], utiliza a propriedade do circuito ressonante no qual a tensão neutro-terra depende do valor da indutância e atinge o máximo quando é ajustado no ponto de ressonância. Assim, esta dependência da tensão neutro-terra foi utilizada para desenvolver alguns dispositivos industriais, com controladores automáticos das bobinas de supressão de arco.
- Indicador inteligente de corrente direcional de falta à terra para linhas aéreas de 6 a 132 kV – Nortroll [2] – trata-se de dispositivo que detecta e indica faltas fase-terra e faltas fase-fase em circuitos aéreos, com neutros aterrados com resistência, neutro isolado e sistemas compensados com bobina de Petersen. A sua utilização reduz os tempos de desligamentos dos circuitos de distribuição.

Várias concessionárias de energia elétrica também fizeram aplicação da bobina de Petersen em seus sistemas. Alguns trabalhos relatam essas aplicações:

- Experiências na implantação do sistema de neutro ressonante na subestação de Gorliz, da Empresa Distribuidora de Energia Elétrica Iberdrola S.A., da Espanha [10]. Esta experiência foi iniciada em 2000, concluindo que com a instalação da bobina supressora de arco evitou-se que 50% das faltas monofásicas à terra provocassem interrupções indesejadas do suprimento de energia elétrica.
- Aumento da continuidade com bobinas de Petersen e automação na rede de média tensão – Empresa de Distribuição Enel, da Itália [7]. Com a regulamentação do governo italiano relativa à continuidade de fornecimento de energia elétrica, em 2004, a Enel implantou dois programas de melhorias no seu sistema, sendo um o aterramento do ponto neutro dos transformadores das subestações de AT/MT, através da bobina de Petersen e outro de sistema automático de detecção/isolamento de falhas e restabelecimento do sistema.

Especialistas de vários países têm pesquisado este tema. A seguir são relatados alguns trabalhos publicados.

- Métodos para Detecção de Faltas à Terra nos Sistemas de Distribuição de Média Tensão [18]. Este trabalho revê e compara os sistemas de aterramento e

os métodos de detecção de faltas à terra, analisando em detalhes o aterramento ressonante.

- Análise dos Métodos de Proteção Contra Faltas à Terra nos Sistemas de Distribuição Aterrados, Não-aterrados e Compensados [21]. É feita uma comparação dos métodos de aterramento dos sistemas de distribuição e citadas formas de detecção e proteção de falta à terra nos sistemas compensados.
- Controle da Bobina de Petersen [22]. Apresenta um novo algoritmo para controle automático do ajuste do valor da bobina de Petersen perante às alterações ocorridas nos sistemas.
- Limitadores de Corrente de Falta - Aplicações, Princípios e Experiência [32]. Objetiva comparar as diferentes tecnologias de limitação de corrente de falta e os sistemas de proteção, tanto para a média como alta tensão.
- Limitadores de Corrente de Falta Trifásicos Resistivos [30]. Aborda uma outra forma de limitação de corrente com a utilização da tecnologia de supercondutores.
- Limitador de Corrente de Falta Eletromagnético [23]. Descreve o projeto de um equipamento constituído de um circuito eletromagnético com núcleo de ferro e uma armadura com entreferro variável.
- Limitação do Perigo de Choque Elétrico Provocado por Falta à Terra nos Sistemas de Média Tensão [25]. Apresenta a experiência da Polônia na utilização de formas de limitar o risco de acidentes elétricos, principalmente nas redes aéreas, utilizando formas diferentes de aterramento do neutro, entre os quais a utilização da bobina de Petersen.
- Detecção de Falta à Terra nos Sistemas de Média Tensão [13]. Relata os resultados de medidas de falta à terra para um sistema de 22 kV, na Noruega, aterrado com bobina de supressão de arco, mostrando a importância dos dados de entrada, principalmente das condições não simétricas antes da falta. Tais condições influenciam as correntes e tensões de sequência zero e contribuem para identificação do alimentador faltoso.

Através do equacionamento aplicado a um circuito equivalente simplificado, é possível mostrar a relação da tensão neutro-terra, corrente de falta, corrente de neutro, para a condição de uma falta monofásica à terra.

1.2 – MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Com a crescente preocupação com o nível de qualidade de fornecimento da energia elétrica e seguindo procedimentos similares adotados por diversas concessionárias de energia elétrica no mundo, este trabalho objetiva fornecer subsídios para aplicação de uma técnica reconhecida de controle de correntes de falta à terra e redução dos desligamentos dos sistemas elétricos.

1.3 – OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é apresentar uma análise com relação à aplicação da bobina de Petersen ao neutro do secundário de um transformador de média tensão de um sistema de distribuição. A indutância introduzida é variável, podendo ser dimensionada de tal forma a compensar as capacitâncias fase-terra do sistema, reduzindo significativamente a corrente de falta à terra. Esta redução implicará em decréscimo das interrupções provocadas por faltas à terra, contribuindo desta forma para a auto-extinção dos arcos voltáicos, aumento da segurança humana, redução de possíveis danos no local da falha, redução de interferências em sistemas de comunicação e redução dos custos do sistema de aterramento.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além do seu capítulo introdutório, esta dissertação está organizada como segue.

No Capítulo 2, aborda-se o aspecto da qualidade de serviço prestado pelas distribuidoras, principalmente no que diz respeito a interrupção de fornecimento de energia elétrica, sendo mencionados exemplos adotados por empresas no exterior e a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST – Módulo 8, para controle de interrupções.

São mostrados no Capítulo 3 os principais tipos de aterramento e suas características. São discutidos também aspectos práticos sobre a bobina de Petersen, características técnicas e formas de ajuste e é mostrado o estado de desenvolvimento industrial e a experiência de algumas concessionárias no mundo. É apresentado também o equacionamento das

grandezas envolvidas aplicado num circuito equivalente simplificado.

O Capítulo 4 é dedicado aos testes para avaliação da influência do sistema de aterramento por resistor de neutro e por bobina de Petersen. São apresentadas simulações para sistema com neutro isolado, neutro solidamente aterrado, neutro aterrado por resistência e neutro com bobina de Petersen. Os diversos resultados enfatizam a importância na limitação da corrente de falta para a terra do aterramento por resistência, em alimentadores com elevadas capacitâncias. Metodologias de ajuste da bobina de Petersen são abordados nesse capítulo, dando-se ênfase ao caso de alimentadores com elevadas capacitâncias.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões da dissertação e sugestões para futuros trabalhos sobre o tópico.

Os apêndices A e B apresentam dados e informações complementares não explicitados diretamente no corpo principal da dissertação.

2 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E SUA REGULAMENTAÇÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O conceito de qualidade de energia está relacionado com a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores. Através do controle das interrupções, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço, as distribuidoras, os consumidores e as agências reguladoras podem avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

2.2 – NORMAS E ORGANIZAÇÕES

A Europa é uma das regiões com grandes avanços nos aspectos de qualidade de energia elétrica. A norma CENELEC EN 50160 – *Voltages Disturbances, do European Committee for Electrotechnical Standardization*, versando sobre características da tensão em serviços públicos de distribuição de energia, foi oficialmente adotada por vários países.

Enel Distribuzione (Itália) e Iberdrola S. A. (Espanha) são dois exemplos de empresas de energia elétrica que vêm aplicando as regulamentações no sentido de melhorar o fornecimento de energia elétrica. O órgão regulador italiano, por exemplo, estabeleceu para o período 2004 – 2007 dentre outras as seguintes regras:

- Exigências de melhorias quanto a duração acumulada de interrupções longas (superior a 3 min);
- Com a finalidade de criar base estatística para o período regulatório seguinte as interrupções de curta duração devem ser monitoradas apenas no período corrente;
- Para consumidores de média tensão com potência contratada maior que 50 kW, foi introduzida regulação individual (a partir de 2006) implicando em penalidades proporcionais à potência contratada, se o número de interrupções ultrapassar um determinado limite.

2.3 – PROCEDIMENTO ANEEL PARA CONTROLE DE INTERRUPÇÕES [39]

No Brasil, a ANEEL, pela Resolução nº 345/2008, de 16/12/2008, aprovou o Módulo 8 do PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica, para o Sistema Elétrico Nacional, que estabelece os procedimentos para controle das interrupções sob os aspectos de duração e frequência. Os indicadores deverão ser calculados para períodos mensais, trimensais e anuais. São estabelecidos padrões de continuidade de serviço (metas).

As metas anuais para os indicadores de continuidade dos conjuntos de unidades consumidoras, DEC e FEC de cada distribuidora, são estabelecidos pela ANEEL em resolução específica. Como exemplo, a tabela 2.1 mostra indicadores do padrão de continuidade por unidade consumidora [39]:

Tabela 2.1 – Padrão de continuidade por unidade consumidora [39]

Faixa de Variação das Metas Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)	Padrão de Continuidade por Unidade Consumidora					
	Unidades Consumidoras com Tensão Nominal ≤ 1 kV situadas em áreas urbanas					
	DIC (horas)			FIC (interrupções)		
	Anual	Trim	Mensal	Anual	Trim	Mensal
0-5	35	15	9	20	11	7
> 5-10	40	20	13	25	13	8
>10-15	45	23	15	33	14	9
> 15-20	50	25	17	30	15	10
> 20-25	53	27	18	33	17	11
> 25-30	55	28	19	35	18	12
> 30-35	58	30	20	36	18	12
> 35-40	61	31	21	38	19	13
> 40-45	65	32	22	40	20	13
> 45	70	35	23	54	27	18

Sendo que:

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor: indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal.

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor: indica quantas vezes houve interrupção.

DIC - Duração da Interrupção Individual por Unidade Consumidora: indica quanto tempo um consumidor ficou sem energia elétrica durante um período considerado.

FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora: indica o número de vezes que um consumidor ficou sem energia elétrica durante um período considerado.

No caso da distribuidora violar o padrão de continuidade individual em relação ao período de apuração, ela deverá fazer a compensação ao consumidor do valor creditado na fatura de energia elétrica no mês subsequente à apuração.

Com base nas considerações acima está havendo uma preocupação maior no aspecto da qualidade de fornecimento de energia, sendo que o aterramento de neutro de transformadores de estações de distribuição tem sido um eficiente método adotado, tendo em vista que, conforme a forma escolhida, é possível reduzir o *stress* térmico e de tensão, aumentar a segurança e contribuir para a detecção, redução da corrente de falta e eliminação rápida dos arcos.

As faltas à terra nos sistemas de distribuição causam interrupção no fornecimento de energia elétrica, principalmente aqueles caracterizados por cabos compactos com elevadas capacitâncias. Assim, conforme a escolha do sistema de aterramento, é possível contribuir com uma melhor qualidade de fornecimento de energia elétrica. O capítulo que se segue aborda justamente a questão do aterramento do neutro de transformadores em sistemas de distribuição.

3 – METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

3.1 – METODOLOGIA – ATERRAMENTO RESSONANTE

3.1.1 - Introdução

A primeira aplicação da bobina de Petersen foi em Ludwigsburg, Alemanha, em 1917, num sistema de 10 kV. A idéia básica era compensar a capacitância à terra do sistema com uma indutância de igual valor, resultando em um decréscimo significativo da corrente de falta à terra.

3.1.2 - Equacionamento

Para limitar a corrente de falta à terra, considere a aplicação de uma bobina de alta impedância (L_N) instalada no neutro de um transformador de distribuição, conforme mostra a Figura 3.1.

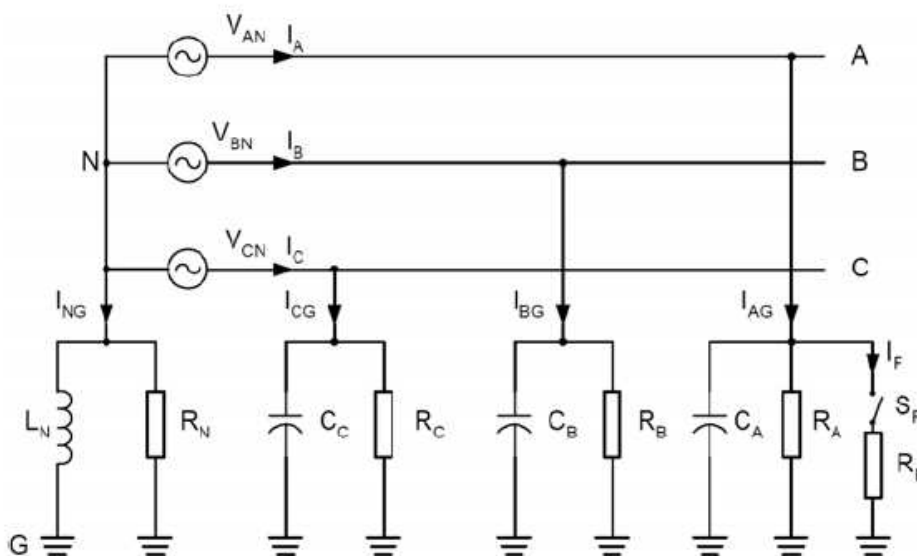


Figura – 3.1 Representação do circuito trifásico.

No circuito trifásico da Figura 3.1, são observados os seguintes elementos:

- Equivalente secundário em estrela de um transformador, aterrado com uma

bobina ajustável;

- Trecho de linha trifásica de distribuição, desconsiderando as reatâncias e resistências;
- Capacitâncias dos condutores das fases em relação à terra (C_A, C_B, C_C);
- Resistências de dispersão fase-terra (R_A, R_B, R_C);
- Ponto da linha com falta à terra com resistência R_F e chave S_F .

Para a análise trifásica, considere um único alimentador, fonte ideal na frequência nominal, sem carga, e desconsidere reatância, resistência e impedância série da linha, conforme mostrado acima. Para simplificação da análise consideram-se as linhas com capacitâncias e resistências iguais $C_A = C_B = C_C$ e $R_A = R_B = R_C$. Estes valores podem ser diferentes, especialmente em linhas aéreas.

Aplicando a 1ª lei de Kirchhoff ao ponto N do circuito, tem-se:

$$0 = I_{NG} + I_A + I_B + I_C \quad (3.1)$$

Sendo que as seguintes expressões são verificadas:

$$V_{NG} Y_N = I_{NG} \quad (3.2)$$

$$(V_{AN} + V_{NG}) Y_A = I_A \quad (3.3)$$

$$(V_{BN} + V_{NG}) Y_B = I_B \quad (3.4)$$

$$(V_{CN} + V_{NG}) Y_C = I_C \quad (3.5)$$

$$Y_N = G_N + \frac{1}{j\omega L_N} \quad (3.6)$$

$$Y_A = (G + \Delta G) + j\omega(C + \Delta C) \quad (3.7)$$

$$Y_B = Y_C = G + j\omega C \quad (3.8)$$

Para sistemas trifásicos equilibrados, $\cos \alpha = 1 \angle 2\pi/3$. Então, em notação fasorial:

$$V_{BN} = \alpha^2 V_{AN} \quad (3.9)$$

$$V_{CN} = \alpha V_{AN} \quad (3.10)$$

Substituindo as equações (3.2) a (3.10) em (3.1), resulta:

$$0 = V_{NG}Y_N + (V_{AN} + V_{NG})Y_A + (\alpha^2V_{AN} + V_{NG})Y_B + (\alpha V_{AN} + V_{NG})Y_C$$

$$0 = V_{NG}Y_N + Y_A V_{AN} + Y_A V_{NG} + \alpha^2 V_{AN} Y_B + V_{NG} Y_B + \alpha V_{AN} Y_C + V_{NG} Y_C \quad (3.11)$$

$$V_{NG} = -\frac{(Y_A + \alpha^2 Y_B + \alpha Y_C)}{(Y_N + Y_A + Y_B + Y_C)} V_{AN} \quad (3.12)$$

Com base nas equações (3.7) e (3.8), tem-se:

$$Y_A + \alpha^2 Y_B + \alpha Y_C = (G + \Delta G) + j\omega(C + \Delta C) + \alpha^2(G + j\omega C) + \alpha(G + \Delta G) =$$

$$G + \Delta G + j\omega C + j\omega\Delta C + \alpha^2(G + j\omega C) + \alpha(G + j\omega C) =$$

$$(G + j\omega C) + \alpha^2(G + j\omega C) + \alpha(G + j\omega C) + \Delta G + j\omega\Delta C =$$

$$(1 + \alpha^2 + \alpha)(G + j\omega C) + \Delta G + j\omega\Delta C = 1 + \alpha^2 + \alpha$$

Então:

$$Y_A + \alpha^2 Y_B + \alpha Y_C = \Delta G + j\omega\Delta C \quad (3.13)$$

Com base nas equações (3.7) e (3.8), encontra-se

$$Y_A + Y_B + Y_C = G + \Delta G + j\omega(C + \Delta C) + G + j\omega C + G + j\omega C =$$

$$G + \Delta G + j\omega C + j\omega\Delta C + G + j\omega C + G + j\omega C =$$

$$= 3G + \Delta G + 3j\omega C + j\omega\Delta C = (3G + \Delta G) + j\omega(3C + \Delta C) \quad (3.14)$$

Substituindo (3.14) e (3.13) na equação (3.12), resulta:

$$V_{NG} = -\frac{(\Delta G + j\omega\Delta C)}{(Y_N + (3G + \Delta G) + j\omega(3C + \Delta C))} V_{AN} \quad (3.15)$$

Considerando a equação (3.6), determina-se:

$$V_{NG} = - \frac{(\Delta G + j\omega\Delta C)}{G_N + \frac{1}{j\omega L_p} + (3G + \Delta G) + j\omega(3C + \Delta C)} V_{AN} \quad (3.16)$$

Seja

$$Y_W = 3G + G_N \quad (3.17)$$

$$Y_U = \Delta G + j\omega\Delta C \quad (3.18)$$

$$V_{NG} = - \frac{Y_U}{Y_N + Y_U + j(\omega 3C - \frac{1}{\omega L_p})} V_{AN} \quad (3.19)$$

Na condição de ressonância,

$$\frac{1}{\omega L_p} = B_L$$

$$\omega C = B_C$$

$$B_L = B_C$$

Resultando então em:

$$V_{NG} = \frac{Y_U}{Y_W + Y_U} V_{AN} \quad (3.20)$$

3.1.3 - Circuito de seqüência zero equivalente

Os estudos de faltas à terra são normalmente baseados nas grandezas de seqüência zero. Portanto sua análise é realizada por meio de componentes simétricas. A Figura 3.2 mostra um circuito elétrico equivalente de seqüência zero relacionado ao circuito mostrado na Figura 3.1.

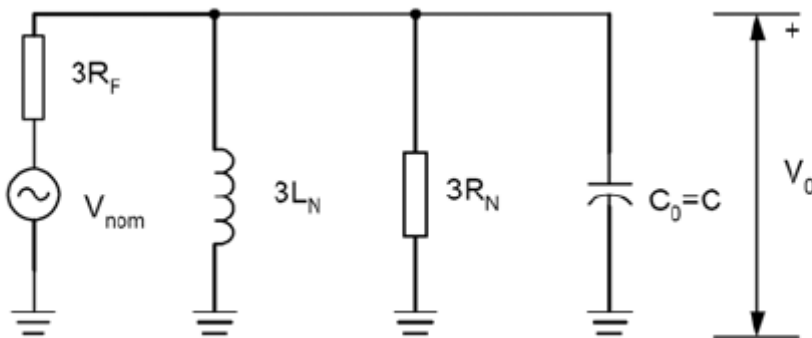


Figura 3.2 - Circuito de seqüência zero do sistema trifásico da Figura 3.1, na condição de uma falta à terra.

Para modelagem da falta à terra, utiliza-se uma fonte equivalente de Thévenin em série com uma resistência. Assumindo-se que o sistema é simétrico, então $C_A = C_B = C_C = C$. As resistências de dispersão R_A , R_B e R_C não são consideradas.

Para faltas à terra, a tensão de sequência zero do sistema é igual à tensão neutro-terra. Assim, conforme [21], a equação de sequência zero do circuito trifásico analisado é a seguinte:

$$\frac{V_0}{V_{nom}} = \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_N} + j3R_F(\omega C - \frac{1}{3\omega L_N})} \quad (3.21)$$

que corresponde à equação (3.12) para um sistema trifásico equilibrado.

Na condição de ressonância $\omega C = \frac{1}{3\omega L_N}$

$$\text{Assim, } \frac{V_0}{V_{nom}} = \frac{1}{1 + \frac{R_F}{R_N}} \quad (3.22)$$

A bobina de Petersen é representada por uma indutância em paralelo com uma resistência.

Na prática a resistência é colocada em paralelo com a bobina com duas funções:

- Aumentar o nível da corrente de falta à terra para um valor mais fácil de ser detectado;
- Aumentar a diferença de ângulo entre os sinais residuais.

No capítulo seguinte, são apresentados testes e resultados em sistemas para se avaliar estratégias visando a limitação da corrente de curto-circuito em alimentadores.

Por ser o sistema de aterramento uma eficiente ferramenta para o aumento da qualidade da energia elétrica, procura-se abordar neste capítulo os principais tipos de aterramento existentes e suas características. O objetivo é melhor focalizar a questão do aterramento e avaliar opções para implementação do “aterramento ressonante”.

3.2 – TIPOS DE ATERRAMENTO DO NEUTRO DE TRANSFORMADORES

Os principais tipos de falta à terra nos sistemas aéreos de distribuição são os seguintes:

- descargas elétricas nos isoladores pelo efeito corona, causado pela poluição, salinidade, etc.;
- descargas elétricas nos isoladores, por sobretensões, causadas por descargas atmosféricas ou operações de manobras de equipamentos;
- envelhecimento na isolação dos cabos.
- danos físicos causados por queda de galhos de árvores e outros impactos mecânicos.

Tendo em vista que estas faltas à terra são freqüentes, o tratamento da questão do aterramento do neutro é de suma importância para um melhor controle da corrente de neutro e assim permitir a continuidade de operação dos circuitos apesar das faltas.

Os principais sistemas de aterramento do neutro dos transformadores são os seguintes:

- não aterrado, ou com neutro isolado;
- aterramento sólido, ou efetivo;
- aterramento através de baixa impedância;
- aterramento através de alta impedância;
- aterramento ressonante.

A Tabela 3.1 apresenta as principais características dos diversos sistemas de aterramento e como elas são seguidas em diversos países:

Tabela 3.1 – Comparação dos métodos de aterramento para sistemas de média tensão de distribuição.

Tópicos	Método de aterramento					
	Neutro isolado	Aterramento Sólido (Aterramento Único)	Aterramento Sólido (Aterramento Múltiplo)	Aterramento Através de Baixa Impedância	Aterramento através de Alta - Impedância	Aterramento Ressonante
Alguns Países com Aplicação	Itália Japão Irlanda Rússia Peru Espanha	Grã-Bretanha	Estados Unidos, Canadá, Austrália, Brasil, América Latina	França, Espanha		Norte e Leste da Europa, China, Israel
Conexão de Cargas Permissível	Fase-fase	Fase-fase (3 fios) e fase-neutro (4 fios)	Fase-fase e fase-terra	Fase-fase	Fase-fase	Fase-fase
Nível de Isolação Requerido	Fase-fase	Fase-neutro	Fase-neutro	Fase-neutro	Fase-fase	Fase-fase
Limitações de Sobreensões Transitórias	Ruim	Boa	Boa	Boa	Boa (Aterramento-R), Média (Aterramento-L)	Média
Operação Possível com uma fase à terra	Nem sempre	Não	Não	Não	Nem sempre	Quase sempre
Auto-extinção de Falhas à Terra	Nem sempre	Não	Não	Não	Nem sempre	Quase sempre
Segurança Humana	Média	Boa	Ruim	Boa	Média	Boa
Stress Térmico dos Equipamentos	Baixo	Alto	Alto	Alto	Baixo	Muito Baixo
Interferência nas Linhas de Comunicação	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Muito Baixa
Sensibilidade da Proteção para Falhas à Terra	Média	Boa	Ruim	Boa	Média	Média

Portanto, as características realçadas na Tabela 3.1 podem ser explicitadas mais adequadamente como segue:

3.2.1 - Sistema não aterrado

Este sistema não tem conexão intencional com a terra, sendo seu único contato com a terra

através da capacitância do condutor. As faltas fase-terra provocam um deslocamento da tensão do neutro do sistema. Porém preservam o triângulo fasorial de tensões entre fases.

Para este sistema, a resistência de falta e a capacitância do condutor em relação à terra são os dois fatores que limitam a corrente de falta à terra. No circuito trifásico indicado na Figura 3.3, é representado um sistema não aterrado, com as seguintes variáveis:

C_{AB}, C_{AC}, C_{BC} - capacitâncias entre fases

C_A, C_B, C_C - capacitância do condutor em relação à terra

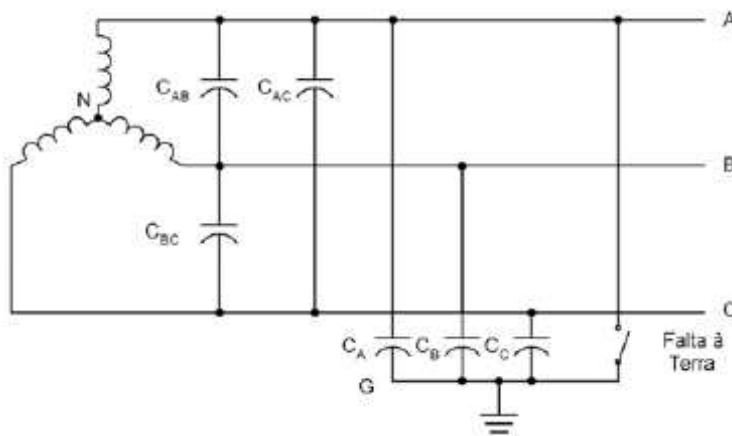


Figura 3.3 – Circuito do sistema trifásico não aterrado.

Na Figura 3.4 temos uma rede trifásica com neutro isolado e falta à terra na fase A. Observe-se que as letras A, B e C indicam o sentido dos fasores das tensões fase-neutro.

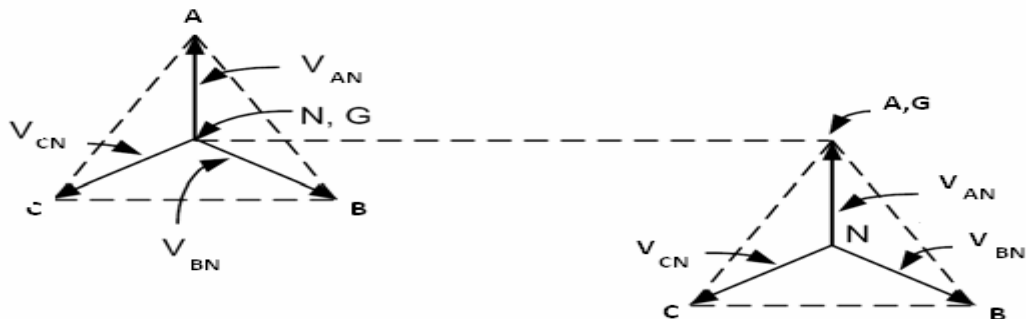


Figura 3.4 – Representação fasorial das tensões fase-neutro e correntes capacitivas numa rede trifásica com neutro isolado, na condição de falta à terra na fase B.

Nesta representação, observa-se que na situação de falta à terra na fase B, nas fases sãs A e C, as tensão fase-terra correspondem às tensões fase-neutro vezes $\sqrt{3}$.

3.2.2 - Aterramento sólido ou efetivo

São considerados sistemas de aterramento sólido ou efetivo aqueles que têm relação

$\frac{X_0}{X_1} \leq 3$ e $\frac{R_0}{X_1} \leq 1$, onde X_0 e R_0 são a reatância e a resistência de seqüência zero, e X_1 é a

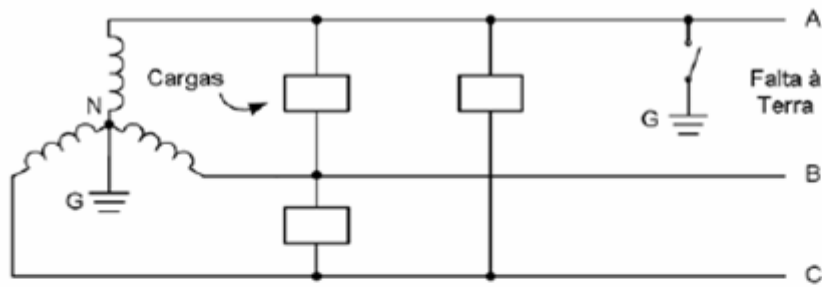
reatância de seqüência positiva do sistema de potência. Este sistema possui todos os neutros do sistema de potência conectados à terra, sem qualquer impedância intencional entre o neutro e a terra, conforme a Figura 3.5

3.2.3 - Aterramento através de baixa impedância

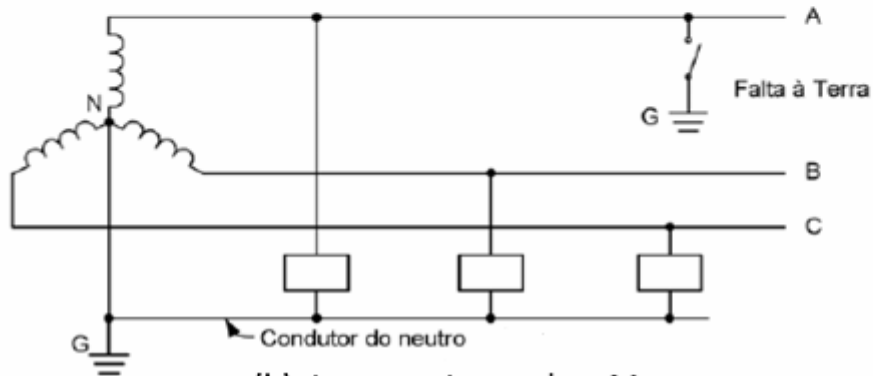
Neste sistema o aterramento é feito através de um reator ou resistor de baixa impedância a fim de limitar a corrente de falta à terra a dezenas ou centenas de ampéres. Assim, o *stress* térmico dos equipamentos é reduzido.

3.2.4 - Aterramento através de alta impedância

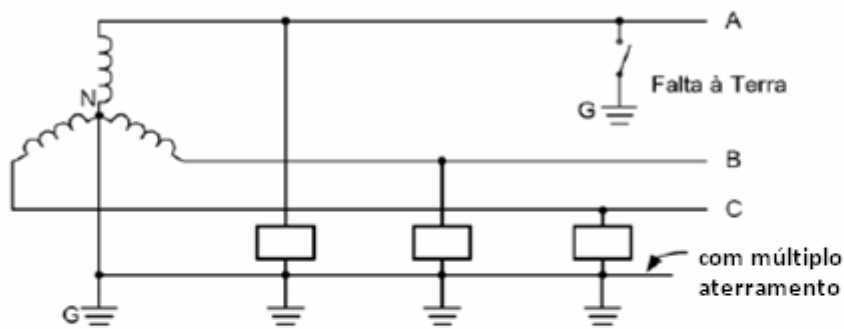
O sistema é aterrado através de um reator ou resistor de alta impedância, cujo valor é igual ou ligeiramente menor que o da reatância capacitiva para a terra do sistema. Este método restringe a corrente de falta à terra, limitando as sobretensões transitórias em valores seguros durante a falta. Assim como nos sistemas com neutro isolado, faltas à terra neste sistema deslocam a tensão do neutro sem modificar o triângulo de tensões entre fases. Essa forma permite à concessionária a continuidade da operação durante faltas à terra sustentadas.



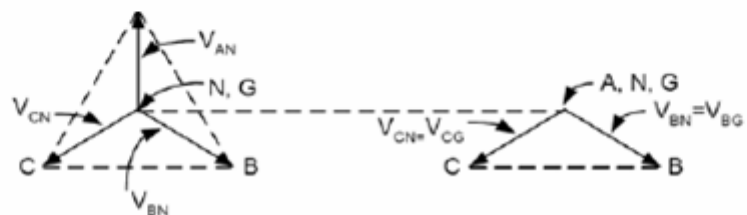
(a) sistema uniaterrado a 3 fios



(b) sistema uniaterrado a 4 fios



(c) sistema multiaterrado a 4 fios



(d) diagrama fasorial p/operação normal

(e) diagrama fasorial p/uma falta à terra

Figura 3.5 – Circuito do sistema trifásico aterrado e a correspondente representação fasorial.

3.2.5 - Aterramento ressonante

É o sistema que utiliza o aterramento através de um reator de alta impedância (variável) sintonizado com a capacitância fase-terra total do sistema. Este reator é denominado bobina de Petersen. É também conhecido como Bobina de Supressão de Arco ou neutralizador de faltas à terra. A Figura 3.6 ilustra um esquema típico.

Através do aterramento ressonante é possível se ter a auto-extinção do arco, pois o atraso no tempo de crescimento da tensão de restabelecimento propicia este fenômeno. Um benefício disso é a continuidade de suprimento de energia.

Outros benefícios são:

- Segurança Humana;
- Redução de danos;
- Redução de interferências;
- Redução do aterramento nas subestações.

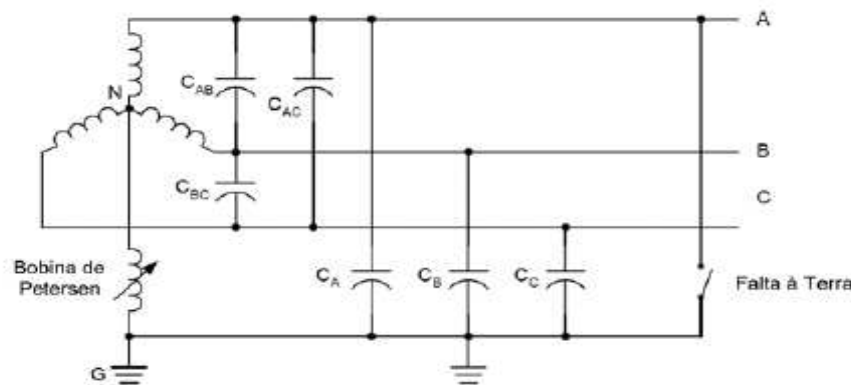


Figura 3.6 – Representação do circuito do sistema trifásico aterrado com bobina de Petersen.

3.3 – AUTO-EXTINÇÃO DE ARCO

A maioria das faltas à terra nos sistemas de distribuição causa um arco. Assim, quando um galho de árvore cai em cima de um cabo energizado ou quando um cabo energizado rompe e cai no chão é formado um arco. Os fatores que interferem na auto-extinção do arco são:

- Magnitude da corrente de falta;

- Tempo de crescimento da tensão de restabelecimento;
- Duração e comprimento do arco;
- Velocidade do vento.

Dentre esses, os mais significativos são a magnitude da corrente e a tensão de restabelecimento.

As curvas na Figura 3.7 mostram a corrente limite para auto-extinção do arco (1) em sistemas compensados e (2) em sistemas não aterrados, conforme DIN VDE 0228 [12]. No gráfico, o eixo horizontal indica a tensão nominal do sistema e no eixo vertical é indicada a corrente residual, para os sistemas compensados ou a corrente capacitiva de falta, para sistemas não aterrados.

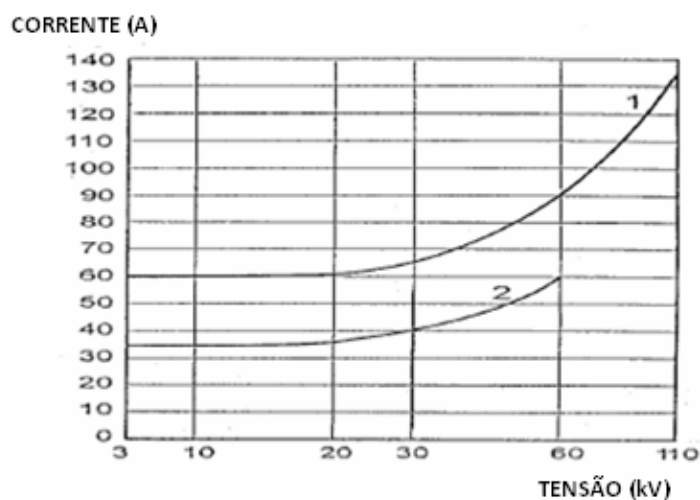


Figura 3.7 – Curva tensão do sistema x corrente limite de falta.

Analisando as curvas acima, observa-se que, por exemplo, no sistema de 20 kV, a corrente limite de falta à terra para auto-extinção do arco é 60 A, para sistema compensado e de 35 A para sistema não-aterrado.

3.4 – ESTADO DA ARTE

Apresenta-se a seguir, com mais detalhes, alguns desenvolvimentos industriais com aplicação da Bobina de Petersen.

3.4.1 - Bobina supressora de arco

Baseado no fato de que o tipo de falta mais comum no sistema de distribuição elétrica é a falta monofásica à terra, desenvolveu-se uma bobina supressora de arco tendo característica de um reator de alta impedância [28]. O seu ajuste é altamente dependente das capacitâncias à terra do sistema.

Através da bobina com variação contínua da relutância, obtêm-se a compensação da corrente de falta à terra. Assim, as variações da topologia do sistema de distribuição são compensadas através da indutância variável.

Dois tipos principais são usados:

- Com operação de chaveamento do reator, as bobinas são conectadas e desconectadas;
- Por contínua variação da relutância do circuito magnético, através de um mecanismo motorizado .

O sistema com ajuste contínuo da relutância tem as seguintes vantagens:

- Não há chaveamento, os quais podem introduzir perturbações no sistema durante a falta à terra;
- Através do ajuste da relutância (variação do *gap* de ar) pode-se encontrar o ponto ótimo para a corrente mínima de falta;
- O controle da relutância pode ser feito no local ou remotamente;
- A indução no núcleo é praticamente constante durante todo o processo de regulação e ligeiramente abaixo da saturação. Assim as sobretensões são limitadas;
- Construção compacta.

A seguir são mostrados alguns aspectos teóricos, começando com a representação do circuito na condição de falta à terra na Figura 3.8 e a correspondente representação fasorial na Figura 3.9 [12].

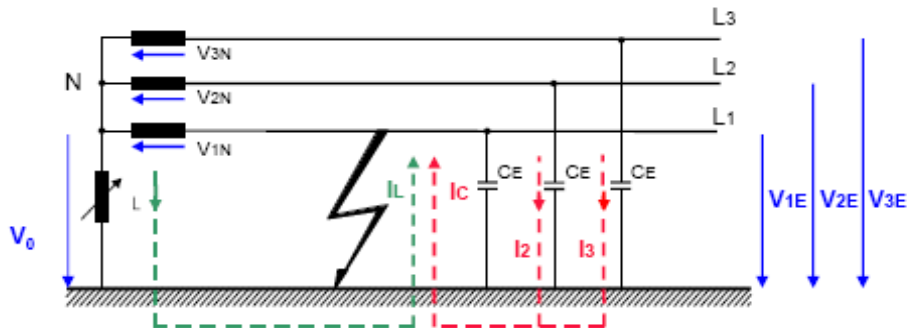


Figura 3.8 – Representação do circuito na condição de falta à terra.

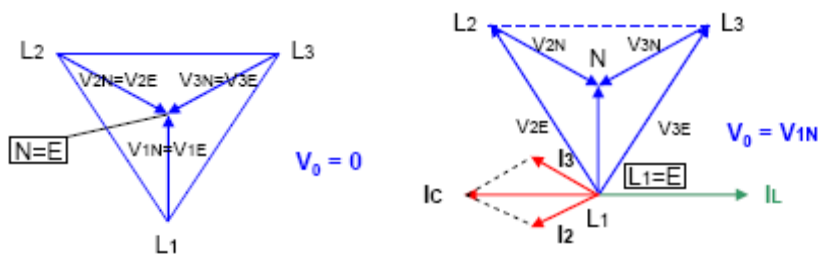


Figura 3.9 – Representação fasorial do circuito com aterramento ressonante com as tensões em operação normal e durante falta à terra.

Na Tabela 3.2 são apresentadas características resumidas dos principais sistemas de aterramento:

Tabela 3.2 - Características dos diversos tipos de aterramento.

ISOLADO	COMPENSADO	BAIXA RESISTÊNCIA
I_C	I_{res}	I_{SC}
$f_e = \sqrt{3}$	$f_e = \sqrt{3}$	$f_e \sim 1-1,4$
Auto extinção do arco	Auto extinção do arco	Arco permanente
Continuidade de alimentação	Continuidade de alimentação	Interrupção da alimentação
Limitado a pequenas redes com $I_C < 35$ A	Até I_C de centenas de A $I_{res} < 65$ A até 123 kV	> 123 kV

Sendo:

I_C . corrente capacitiva do sistema não aterrado

I_{res} . corrente residual do sistema compensado

I_{SC} . corrente de falta do sistema aterrado com baixa resistência

F_e . fator de elevação da tensão fase-terra em relação à tensão fase-neutro

A Figura 3.10 mostra uma representação aproximada, através da análise de componentes simétricas, do diagrama de sequência zero para uma falta à terra no sistema da Figura 3.8. A impedância de sequência zero de um sistema compensado tem uma magnitude muito elevada. Este valor permite que as impedâncias de sequência positiva e negativa sejam omitidas no circuito equivalente, para faltas monofásicas, sem perda de precisão significativa [21]. Neste circuito, a falta é representada conectando uma fonte equivalente de Thévenin em série com uma resistência no ponto de falta.

O sistema é considerado simétrico, com capacitância do condutor à terra $C_E = C$. Desconsideraram-se as resistências de dispersão e considerou-se que a tensão de Thévenin, tensão pré-falta no ponto de falta, é igual à tensão nominal fase-neutro do sistema E_1 e a indutância $3L$, em paralelo com a resistência $3R$, representam a bobina de Petersen.

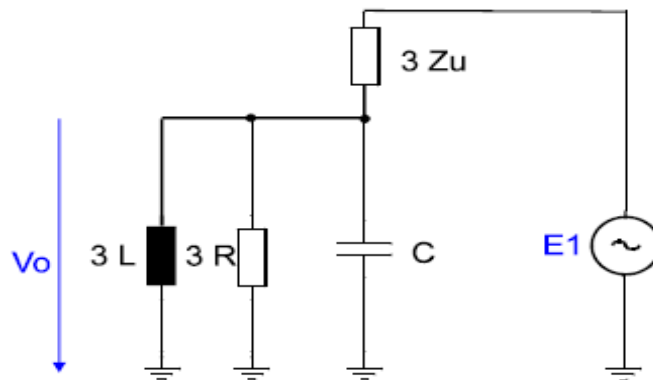


Figura 3.10 – Circuito equivalente de sequência zero.

Considerando o circuito equivalente da Figura 3.10, é possível levantar características envolvendo a corrente que flui pela bobina em função da relação V_0/E_1 . Uma curva em

escala logarítmica é mostrada na Figura 3.11. Através dela observa-se o ponto de ressonância, indicando o ajuste adequado para a bobina.

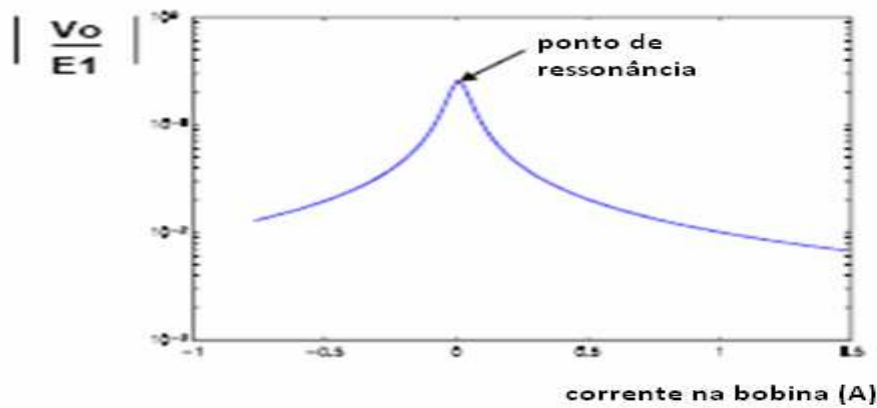


Figura 3.11 – Curva mostrando o ponto de ressonância em relação ao ajuste da corrente na bobina de Petersen e a tensão V_0/E_1 .

O ajuste da Bobina Supressora de Arco no ponto de ressonância implica:

- Mínima corrente de falta à terra;
- Aumento da auto-extinção do arco da falta à terra;
- Menor dano causado pelo arco;
- Baixa tensão de passo e toque no sistema de aterramento.

A Tabela 3.3 faz informações que permitem comparar um sistema isolado e um sistema cujo aterramento é compensado.

Tabela 3.3 – Comparação entre sistema isolado e sistema de aterramento compensado.

Sistema Isolado	Sistema Compensado
alta corrente de falta	70 a 80% de faltas transitórias Auto-extinção pela Bobina Supressora de Arco <ul style="list-style-type: none"> • Baixa corrente de falta • Atraso da tensão de restabelecimento fase-terra
auto-extinção reduzida	20 a 30% de faltas permanentes <ul style="list-style-type: none"> • Baixa corrente de falta • Aumento da segurança humana • Reduzido dano • Reduzida solicitação, do aterramento.
Resultado: interrupção do fornecimento	Resultado: reduzidas interrupções, aumento da qualidade da energia fornecida.

A seguir são apresentados alguns exemplos europeus de possibilidades de aterramento ressonante:

1) Abordagem tradicional

- Bobina Supressora de Arco garante auto-extinção do arco para faltas transitórias;
- Bobina Supressora de Arco minimiza a corrente de falta para faltas permanentes;
- Relés de detecção de falta à terra (admitância, $\cos\phi$, método transitório) para sinalização seletiva de faltas permanentes;
- Contínuo suprimento de energia também para faltas permanentes.

2) Abordagem especial

Método simplificado

- Bobina Supressora de Arco garante auto-extinção do arco para faltas transitórias;
- Relés de detecção de faltas à terra para desligamento seletivo de faltas permanentes;
- Faltas permanentes de baixa impedância seletivamente interrompidas;
- Faltas permanentes de alta impedância seletivamente sinalizadas (método da admitância).

Método combinado

- Bobina Supressora de Arco garante auto-extinção do arco para faltas transitórias;
- Bobina Supressora de Arco by-passada no caso de faltas permanentes;
- Proteção convencional de sobrecorrente para desligamento seletivo de faltas permanentes;
- Faltas permanentes de baixa impedância seletivamente interrompidas.

A Tabela 3.4 procura dar uma visão das extensões dos circuitos, nas várias tensões, e os respectivos sistemas de aterramento.

Tabela 3.4 – Comprimento dos circuitos dos sistemas em várias tensões x tipos de aterramentos, na Alemanha (também representativa para Áustria, Suíça, Hungria, Polônia, etc).

	Comprimento do Sistema (km)			
	10 kV	20kV	110kV	Total (%)
Isolado	8467	95	-	2
Aterramento Ressonante	74521	177151	53247	89
Aterramento com baixa resistência	13247	3901	12462	9
Comprimento total	96325	181147	65709	100

A tabela 3.5 dá um panorama geral de redução do número de interrupções com a instalação do aterramento ressonante, sendo que a indicação nº de meses x barra indica o total de meses em que cada bobina esteve em operação x nº de bobinas instaladas. Assim, por exemplo, em 2003 a tabela indica 3010 meses x barras, o que significa que as 128 bobinas ficaram em média 24 meses em operação.

Tabela 3.5 – Redução do número de interrupções na Itália (ENEL).

Redução no número de interrupções com o aterramento ressonante				
	Tempo (meses)	Transitório ($t \leq 1 \text{ min}$)	Curto ($1 \text{ min} < t \leq 3''$)	Longo ($t > 3 \text{ min}$)
2001, 77 bobinas, 431 meses x barras	5,6	- 48%	- 46%	-36%
2002, 163 bobinas, 1614 meses x barras	9,9	- 55%	-37%	-22%
2003, 128 bobinas, 3010 meses x barras	23,5	- 51%	-38%	-26%

Alguns tipos de conexão de bobinas são apresentados em [12]. As Bobinas Supressoras de Arco são conectadas entre o neutro do transformador e a terra. A escolha dos transformadores é feita considerando os seguintes parâmetros:

- Impedância de sequência zero Z_0 ;

- Carga adicional para a carga da corrente de neutro.

Tipos adequados de transformador:

- Configuração estrela – Zigzag;
- Configuração estrela – delta (Ynd ou Dyn);
- Configuração estrela-estrela com enrolamento de compensação (nominal para 33% da potência nominal do transformador).

Tipos inadequados de transformador:

- Configuração estrela-estrela sem enrolamento de compensação;
- Tipo “Shell”.

Na ausência de transformador com adequada capacidade ou ponto neutro disponível, o transformador de aterramento separado (configuração ZN) pode ser acrescentado para conexão à Bobina Supressora de Arco. Alguns tipos de conexão são mostrados na Figura 3.12.

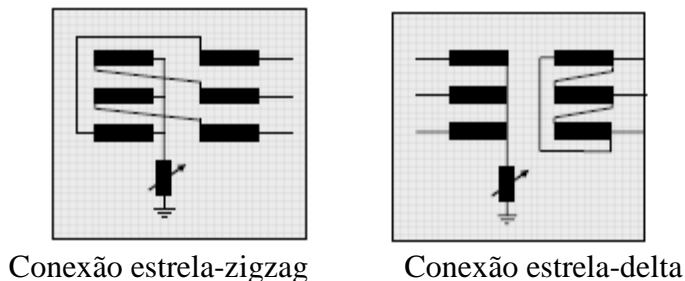


Figura 3.12 – Tipos de conexão de transformador de aterramento separado.

Devido às mudanças dinâmicas da topologia dos sistemas elétricos de distribuição, a indutância da bobina de supressão de arco deve ser variável.

O sistema “plunger core coil” consiste na variação contínua da relutância do circuito magnético através de comando mecânico. Ele oferece inúmeras vantagens em relação ao chaveamento tradicional em degraus (taps):

- Variação contínua através da variação do entreferro;

- O ajuste operado por mecanismo motorizado pode ser local ou remoto;
- Ajuste automático às atuais condições do sistema através da compensação controlada;
- A indução no núcleo é praticamente constante dentro da faixa de regulação e pouco abaixo da saturação. Com isto as sobretensões do sistema são limitadas.

A Tabela 3.6 mostra alguns parâmetros típicos de uma bobina [12]. Já a Figura 3.13 mostra detalhes do equipamento físico.

Tabela 3.6 – Características da bobina de supressão de arco [12].

Potência nominal	400 kVAr – 8000 kVAr (até 25 MVar)
Nível de tensão	$3.6/\sqrt{3}$ kV - $36/\sqrt{3}$ kV (até 145 kV)
Faixa de ajuste	1:10 (com mecanismo motorizado)

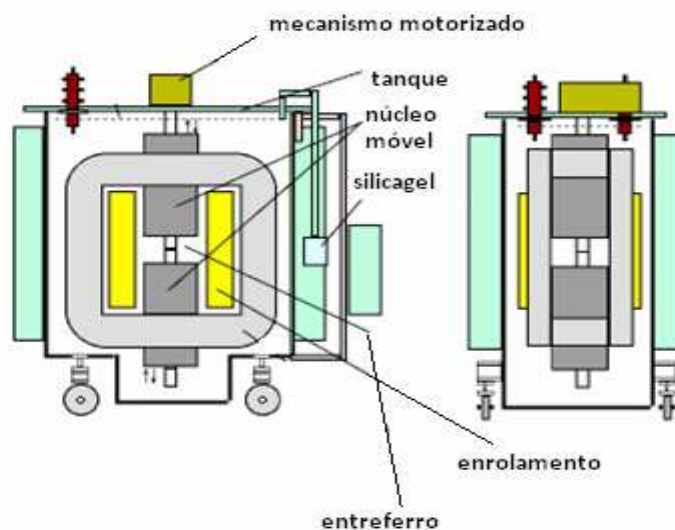


Figura 3.13 – Vista detalhada da bobina supressora de arco.

A Figura 3.14 mostra parte de uma subestação com Bobina Supressora de Arco e a figura 3.15 apresenta detalhes do equipamento.



Figura 3.14 - Vista de subestação 110/20 kV com bobina de supressão de arco.



Figura 3.15 - Vista geral da bobina supressora de arco

3.4.2 – Controladores da compensação de falta à terra [26]

Nos sistemas de distribuição aterrados através de alta impedância o neutro é conectado à terra através de um indutor de indutância controlada. Se o circuito ressonante formado pela bobina de indutância ajustável e a capacitância à terra do sistema é ajustado para o ponto de ressonância ou próximo, a corrente de falta é bastante reduzida para o caso de faltas fase-terra. Na maioria dos casos o arco causado pela corrente de falta é extinto sem

necessidade de desligamento do circuito defeituoso.

Em [26], o fabricante utiliza a propriedade de que num circuito ressonante a tensão neutro-terra depende do valor da indutância da Bobina Supressora de Arco e atinge o máximo quando a mesma é ajustada ao ponto de ressonância. Assim, esta dependência da tensão foi utilizada para desenvolver alguns tipos de equipamentos específicos tais como controladores de compensação de falta à terra com ajuste automático.

Durante a operação de ajuste da Bobina Supressora de Arco, usando a conhecida posição da bobina assim como a tensão neutro-terra medida antes e depois do ajuste, o controlador compara o valor ajustado de tensão, o valor da assimetria k e o valor do amortecimento que determinam a curva de ressonância da tensão neutro-terra. Levando em consideração o programa-ajustável sobre ou sub-compensado, o controlador calcula a posição necessária e ajusta diretamente a Bobina Supressora de Arco ao valor calculado. A Figura 3.16 mostra um equipamento típico, ilustrando os dados para ajuste da curva de ressonância.



Figura 3.16 – Vista dos controladores de compensação de falta EFC20 e EFC20i.

3.5 – EXPERIÊNCIA DE ALGUMAS EMPRESAS NO MUNDO

3.5.1 – Experiências de implantação do sistema de neutro ressonante na subestação de Gornitz [10]

Como aplicação da bobina de Petersen em sistemas práticos, enfatiza-se neste capítulo a experiência da Empresa Distribuidora de Energia Elétrica Iberdrola S.A. com a instalação de aterramento ressonante em barramento de subestação. A finalidade deste trabalho foi de pesquisar o comportamento deste sistema no que diz respeito à quantidade e duração dos desligamentos.

A potência de curto-circuito e o tempo do sistema de proteção afetam diretamente o dimensionamento do sistema de aterramento. Por outro lado, o sistema de aterramento empregado influencia no valor e duração da corrente de falta.

Em sistema com baixa impedância de aterramento uma falta monofásica provoca uma alta corrente, requerendo sistema de aterramento mais complexo, embora esse valor elevado de corrente permita a detecção e a eliminação mais rápida da falta.

No caso de sistema de aterramento ressonante usando bobina de Petersen, a corrente é reduzida por causa do ajuste da reatância indutiva que compensa a reatância capacitiva do sistema. Com isto, faltas transitórias são eliminadas sem a atuação da proteção, sem desligamento do sistema. Esta solução é adotada à décadas na Europa do Norte e Central. Países como França, Itália e Inglaterra, têm feito pesquisas e implantado mudanças nos seus sistemas.

A empresa espanhola Iberdrola instalou Bobina Supressora de Arco numa subestação com um transformador delta-estrela de 30/18 kV e 12 MVA de potência, com 5 alimentadores. Estes circuitos são constituídos por 35,7 km de linhas aéreas e 8,9 km de cabos subterrâneos. Este sistema alimenta um conjunto de 98 cargas, e possui as características apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Características dos circuitos alimentadores de uma subestação da Iberdrola.

Alimentador	Número de cargas	Potência		Comprimento (km)	
		P (kW)	Q (kVAr)	Linha aérea	Linha subterrânea
F1	5	72,5	31,4	2,9	0
F2	11	337,4	146,2	4,5	1,0
F3	18	995,6	431,5	0,6	3,4
F4	25	973,4	421,8	4,4	1,9
F5	39	621,1	269,2	23,3	2,6
Total	98	3000,0	1300,1	35,7	8,9

As características da bobina instalada no neutro do transformador são as seguintes:

- Potência Nominal 250 kVAr
- Max. Tensão 24 kV
- Tensão Nominal $3,8/\sqrt{3}$ kV
- Corrente Nominal 30 A
- Regulação de Corrente 6-30 A

A topologia do sistema empregada no estudo é a apresentada na Figura 3.17.

O trabalho proposto em [10] avalia dois casos distintos: um com falta fase-terra e outro com falta fase-fase. Em ambos os casos é considerada uma situação em que o sistema é solidamente aterrado e outra na qual é considerada a compensação por Bobina Supressora de Arco.

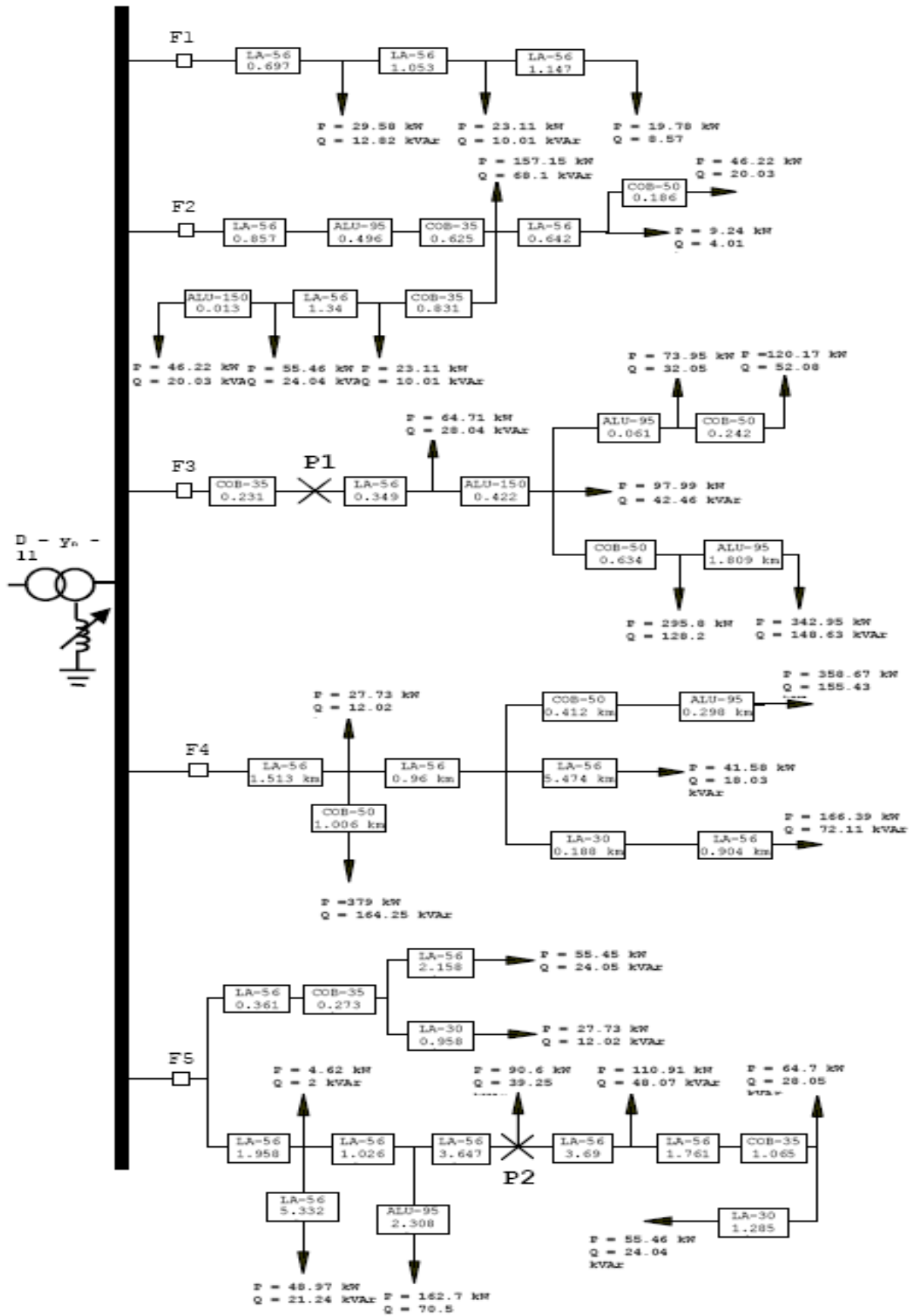


Figura 3.17 – Topologia do sistema de distribuição da Iberdrola

São comparadas nas Figuras 3.18 e 3.19 as curvas de corrente de falta monofásica à terra x tempo, para um sistema com neutro solidamente aterrado, e as curvas de corrente no ponto de falta e corrente na bobina supressora de arco x tempo.

Verifica-se que a corrente de falta é consideravelmente menor com o aterramento ressonante, devido ao efeito de compensação da bobina. A corrente de pico resultante em regime permanente, com aterramento ressonante é de 0.8 A, bem menor que 7226 A obtidos com o sistema solidamente aterrado.

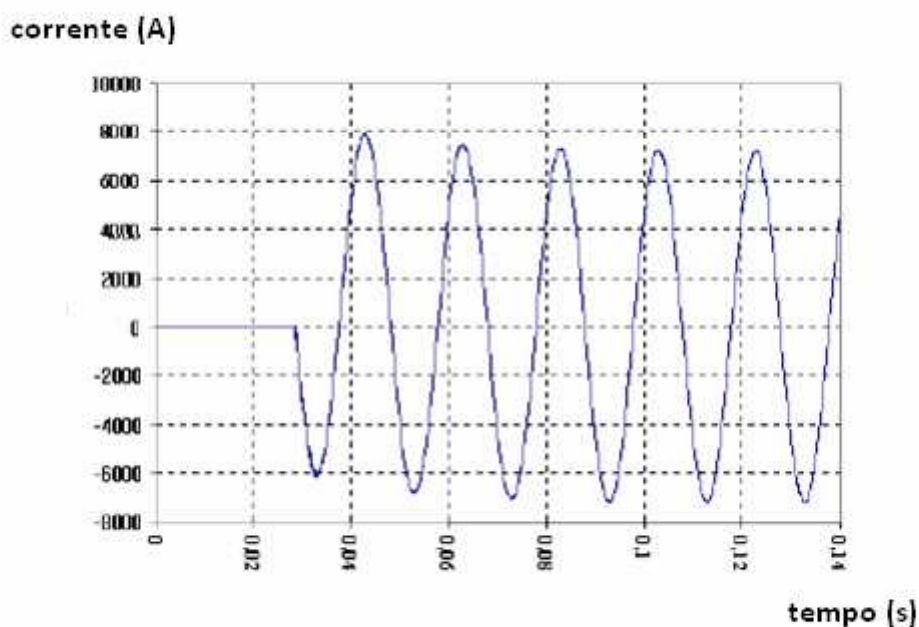


Figura 3.18 – Curva da variação da corrente de falta no ponto de falta, para sistema solidamente aterrado.

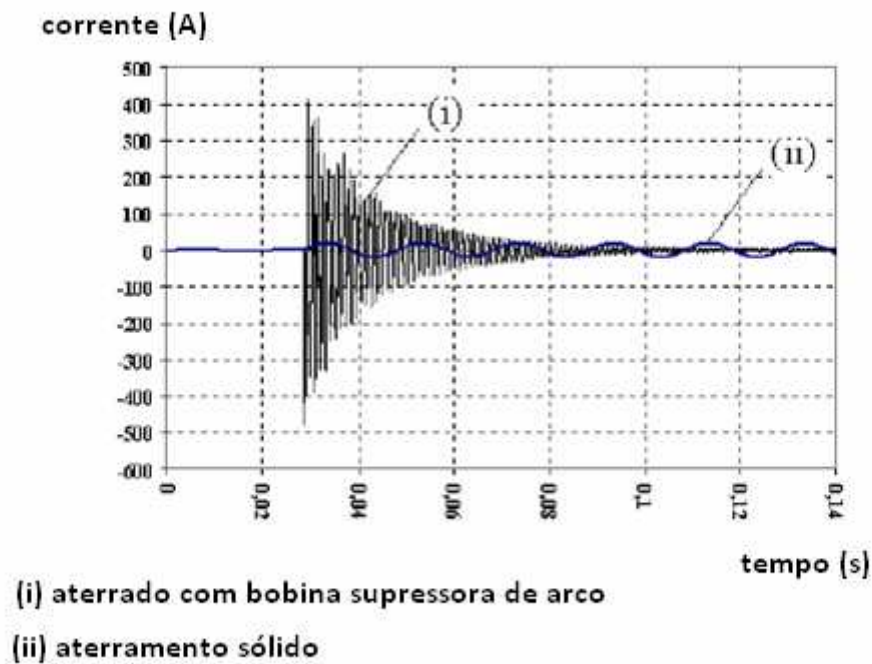


Figura 3.19 – Curva da variação da corrente no ponto de falta, para sistema aterrado através de bobina supressora de arco (ii), comparado com a corrente devido ao aterramento sólido (i).

A Figura 3.20 mostra as alterações das curvas de tensão para as situações (i) e (ii) mencionadas anteriormente

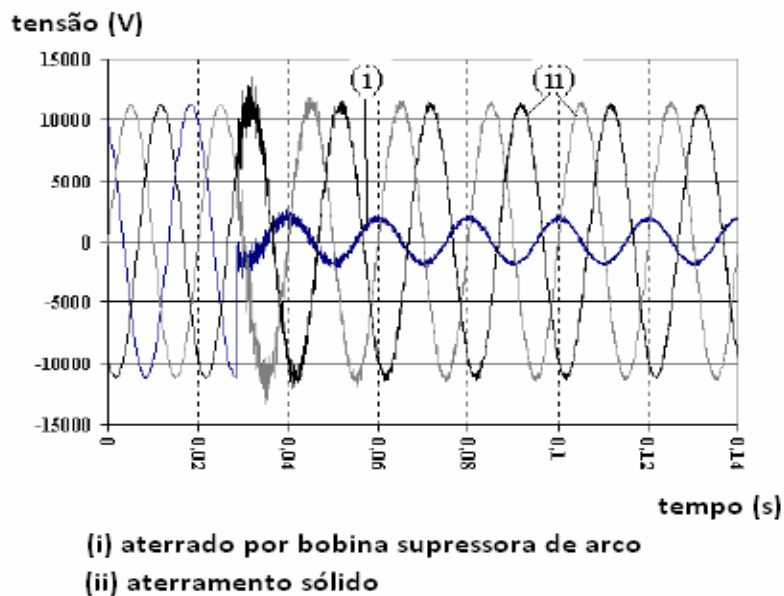


Figura 3.20 – Curvas da variação da tensão no ponto de falta, para sistema solidamente aterrado (i) e sistema aterrado através de bobina supressora de arco (ii).

Pode-se observar que no caso com aterramento ressonante, após a falta, as tensões fase-terra nas fases sãs são iguais à tensão fase-neutro antes da falta vezes 1,73.

Para demonstrar que o desempenho é válido também para outros tipos de falta, foi analisada a situação de falta bifásica à terra. Resultados semelhantes foram obtidos.

Como conclusão dos estudos tem-se:

- Baseado nos dados estatísticos de 1998 a 2002, observou-se que 40% do número total de faltas registradas poderiam ter sido evitadas com a utilização do aterramento ressonante;
- Durante o primeiro ano de operação com a bobina supressora de arco, ocorreram 55 faltas monofásicas à terra. Dessas, 37 foram transitórias (duração < 5 s). Portanto, o aterramento ressonante evitou que 50% das faltas monofásicas à terra provocassem interrupções indesejadas do suprimento de energia.

3.5.2 – Aumento da continuidade com bobinas de Petersen e automação na rede de média tensão

No início de 2004, a autoridade de regulação italiana alterou as regras relativas à continuidade de fornecimento e com isto no período de 2004 a 2007 foram introduzidas melhorias no projeto de automação.

A ENER DISTRIBUZIONE (Itália), tem como metas para melhorias de suas redes:

- Aterramento do ponto neutro (antes isolado) dos transformadores das subestações de AT/MT através de bobina de Petersen;
- Sistema automático de detecção/isolamento de falhas e restabelecimento do sistema.

Subestações de AT 132/150 kV e MT 10/15/20 kV operavam com neutro isolado. Com o

projeto Petersen [7], foi planejado introduzir no neutro do transformador uma impedância (bobina de Petersen + resistência) ligada à terra. O novo sistema de aterramento, em função dos baixos valores de corrente fase-terra, torna possível a isolação de faltas à terra sem abertura do disjuntor na saída do alimentador de Média Tensão.

As bobinas ajustáveis permitem melhor desempenho que as bobinas fixas. No entanto, esse sistema é mais crítico, pois exige medições periódicas para verificar o estado de ajuste da bobina. As melhorias instaladas asseguram uma redução média de 10 min na duração acumulada de interrupções, somando os ganhos do projeto Petersen com os da automação da Média Tensão.

A Tabela 3.8 ilustra como evoluiu a implantação de aterramento ressonante no sistema italiano.

Tabela 3.8 – Crescimento do número de barramentos com aterramento ressonante.

ANO	BARRAMENTOS	
	EM OPERAÇÃO	PLANEJADO
1998	4	4
1999	7	7
2000	40	100
2001	110	120
2002	700	700
2003	1000	1000
2004	971	1312

O sistema chamado de Automação é capaz de detectar automaticamente os ramais defeituosos, proceder o seu isolamento e restaurar a alimentação a partir dos ramais são localizados à montante daquela falta.

A meta seria equipar 2800 barramentos de média tensão até o ano de 2007.

Nessas condições, o ganho em termos de continuidade de fornecimento de energia foi de 4 minutos, em média, considerando duração acumulada de interrupções.

A Tabela 3.9 é referente ao período 2001 – 2003, mas as percentagens mais confiáveis são as referentes a 2003, com 128 bobinas durante 3010 mês x barramento, onde se tem uma média de 2 bobinas constantemente ligadas todo o ano.

Tabela 3.9 – Redução dos desligamentos em função do número de bobinas instaladas/número de meses/número de barramentos.

Tipo de interrupção - Período/Barramento		Transitória ($t \leq 1s$)	Curta ($1s < t \leq 3$ min)	Longa ($t > 3$ min)
Ano 2001	77 bobinas, 431 mês x barramento	-48%	-46%	-36%
Ano 2002	163 bobinas, 1614 mês x barramento	-55%	-37%	-22%
Ano 2003	128 bobinas, 3010 mês x barramento	-51%	-38%	-26%

Os dados desta tabela são os mesmos já mostrados na Tabela 3.5

No capítulo 4 serão realizados os testes para avaliação da influência do sistema de aterramento. Numa primeira parte serão simulados os sistemas isolado, solidamente aterrado e aterrado por resistência. Em uma segunda parte será feita a simulação com bobina de Petersen no neutro. Em particular, considerar-se-á este equipamento instalado em transformadores cujos alimentadores apresentam elevada capacitância.

4 - TESTES PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

4.1 - SISTEMAS ISOLADO, SOLIDAMENTE ATERRADO E ATERRADO POR RESISTÊNCIA

Uma vez que a forma como o neutro de um transformador de potência é conectado à terra determina o comportamento do sistema durante uma falta monofásica à terra, as variações de tensões e de correntes são analisadas neste capítulo, quando se considera um alimentador de distribuição. A análise será conduzida no domínio do tempo, levando-se em conta sistema isolado, solidamente aterrado e aterrado por meio de resistência no neutro. Serão enfocadas as condições de resistência de falta com os seguintes valores: 0, 1, 10, 100, 500 e 10.000 Ω .

No item 4.2 serão abordados os testes com a inserção de bobina de Petersen no neutro, ao invés de resistor.

O sistema utilizado nas simulações é um equivalente do sistema proposto em [42]. Este sistema será denominado IEEE13. Trata-se de um *benchmark* para testes de alimentadores de sistema de distribuição radial, aprovado pelo Subcomitê de Análise de Sistemas de Distribuição do IEEE, em 2000 (os dados completos deste sistema são mostrados no Apêndice A). Ele tem as seguintes características principais:

- Circuitos de 4,16 kV, curtos e com cargas relativamente altas;
- Linhas aéreas e subterrâneas, com circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos;
- Cargas desequilibradas distribuídas e concentradas;
- Um transformador trifásico, conexão delta (alta tensão) – estrela (média tensão), relação 115/4,16 kV, 5 MVA.

4.1.1 - Simulações transitórias no sistema IEEE13 modificado

O sistema IEEE13 tem 13 barras. Para efeito de simplificar a simulação, ao invés de se utilizar todos os alimentadores do sistema, considerou-se apenas aquele que sai do

transformador até a barra 632. Com este objetivo, foi calculada uma carga equivalente trifásica na barra 632. Em função dos dados de potência ativa e reativa na barra, bem como da tensão, obteve-se os seguintes valores para a representação da carga na forma de um circuito série RL:

$$Z_a = 6,1239 + j3,9342 \, \Omega, \quad Z_b = 5,0666 + j2,7326 \, \Omega \text{ e } Z_c = 5,0741 + j2,9665 \, \Omega$$

Como pode ser observado, a carga para satisfazer as condições do equivalente é desequilibrada. A Figura 4.1 mostra um esquema do alimentador, caracterizando o neutro do transformador, os locais de medição das grandezas, bem como o ponto onde ocorre uma falta fase-terra. As tensões e correntes serão medidas nas 3 fases, próximo ao ponto de falta e no neutro. Para a simulação a falta à terra será na fase A.

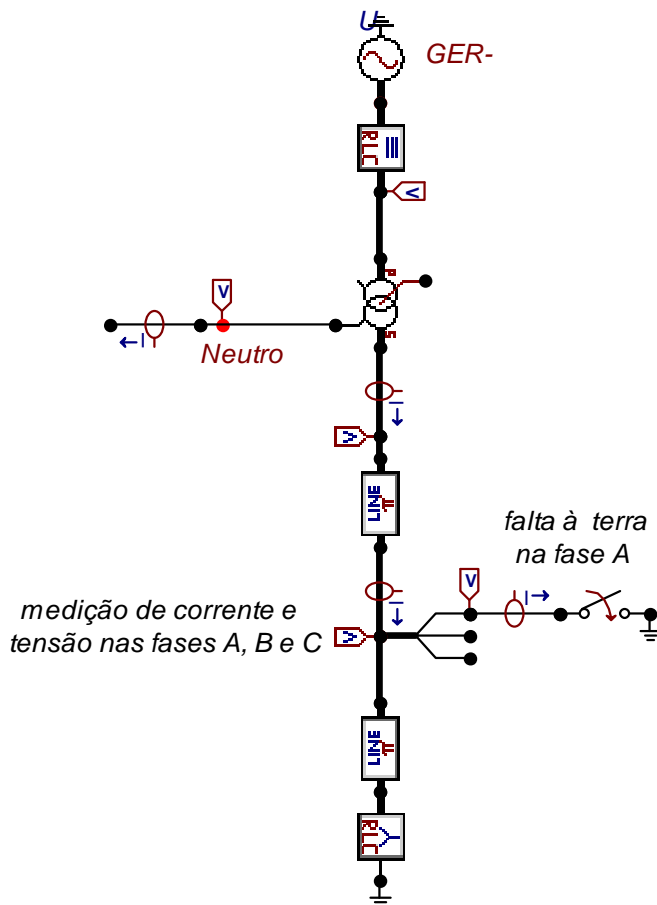


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do alimentador.

Desde que a impedância de falta é um parâmetro que afeta a tensão do neutro e a corrente de falta, nas simulações foram considerados diferentes valores de resistência de falta

conforme indicado. As simulações visam mostrar o comportamento das tensões das fases e neutro, as correntes das fases e pelo neutro, considerando o período pré-, durante e pós-falta, bem como a condição de regime permanente. Todas as simulações foram realizadas no *Alternative Transient Program* (ATP).

A tensão de fase eficaz no alimentador é igual a 2,402 kV. No entanto, nas simulações que serão vistas *a partir deste ponto*, as avaliações serão com base em valores de pico. Tanto para tensão, quanto para corrente. Para o caso em questão, a tensão nominal é igual a 3,397 kV.

Para avaliara a resposta do sistema a um distúrbio, é aplicada uma falta fase-terra, iniciando em 50 ms, sendo extinta em 100 ms.

4.1.1.1 - Sistema isolado

Nas simulações que se seguem, são mostradas formas de onda resultantes de tensão e de corrente para as diversas situações de resistência de falta R_f .

A Figura 4.2 mostra a condição de sistema isolado e $R_f=0$. O gráfico apresenta curvas de tensões nas fases sãs, faltosa e neutro. É possível observar que quando ocorre a falta na fase A, o transitório de tensão não é tão severo quanto após restabelecimento do sistema, ocasião em que o mesmo atinge níveis de tensões proibitivos nas fases e no neutro. As tensões nas fases sãs durante a falta alcançam o valor $\sqrt{3}$ vezes o valor antes da falta e na fase com falta a tensão é nula.

Diante desses resultados, a pior situação refere-se à tensão do neutro que atinge valores elevadíssimos.

O transitório de tensão que aparece quando a falta é eliminada é explicado em [26] pela extinção do arco e retorno da tensão na fase com falta.

A Figura 4.3 é o resultado para a falta fase-terra na fase A, quando $R_f=0$ em um alimentador com neutro isolado. Pode ser observado que a corrente na fase faltosa atinge valores superiores ao triplo da corrente em condições normais. Nas fases sãs, apesar de

níveis menores, os valores chegam ao dobro da corrente em condições normais.

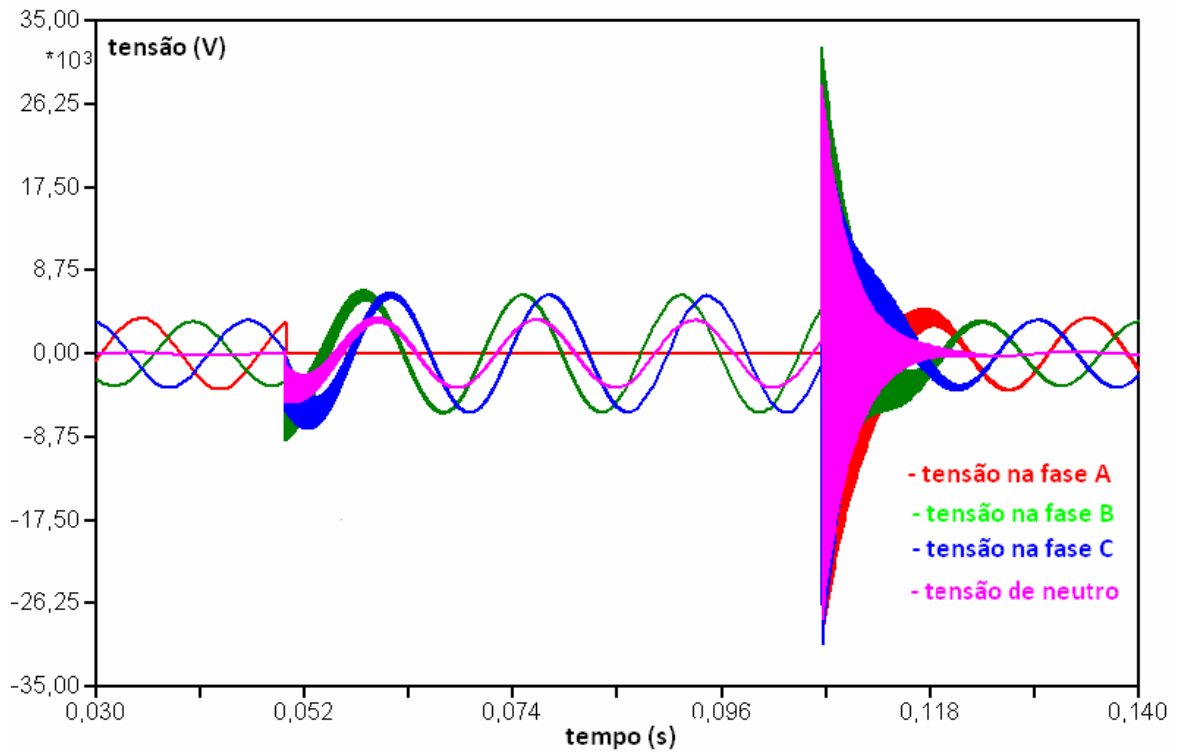


Figura 4.2 – Curvas das tensões – neutro isolado - resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

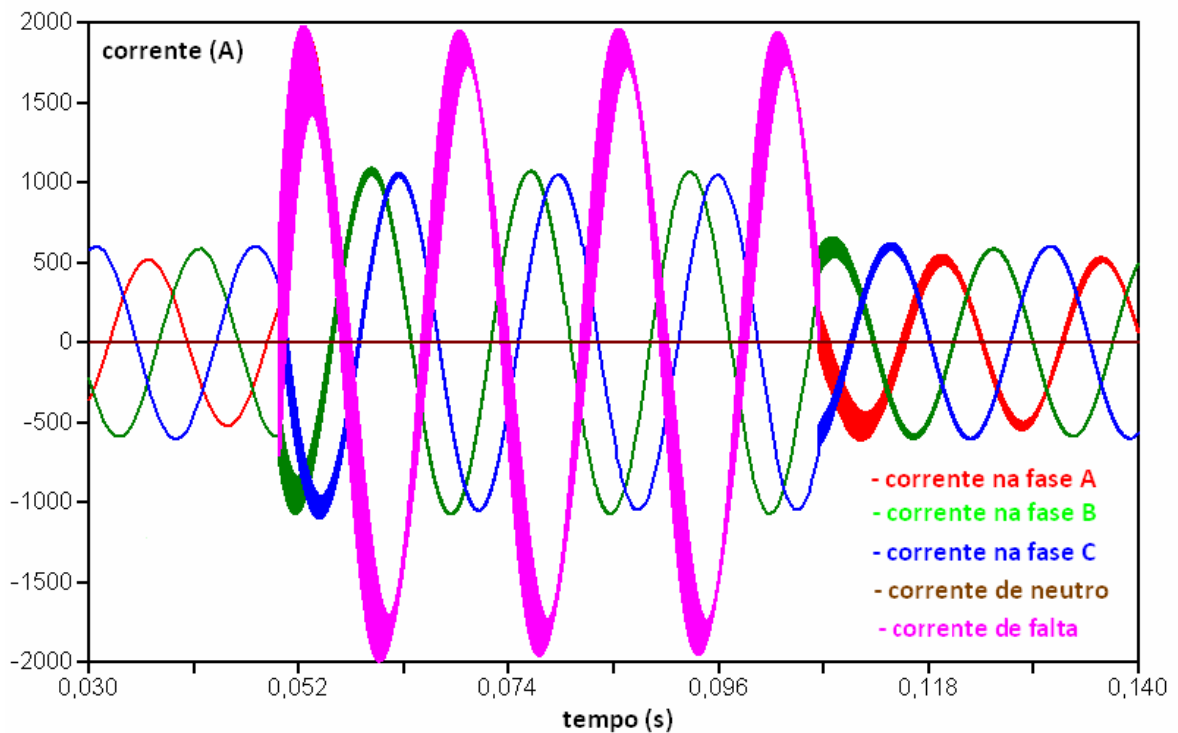


Figura 4.3 - Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

Quando o neutro é isolado e a resistência de falta apresenta valor finito ($R_f=1 \Omega$), mas muito baixo, as sobretensões são reduzidas, ficando evidente, no entanto, sobretensões nas fases sãs e um transitório na forma impulsional em uma das fases sãs. A Figura 4.4 evidencia esse resultado. Já a figura 4.5 mostra as curvas de corrente para esta mesma situação. A corrente na fase faltosa é elevada em comparação às correntes nas demais fases.

O transitório na tensão que aparece quando do início da falta na Figura 4.4 é explicado em [24] como sendo originário de:

- transitório de descarga, o qual inicia-se quando a tensão da fase faltosa cai e a carga armazenada nas capacitâncias à terra das linhas sãs é removida;
- aumento da tensão nas duas fases sãs, onde é criada uma componente de carga;
- sistemas com aterramento ressonante, onde há o transitório de decaimento da componente DC da bobina de supressão de arco.

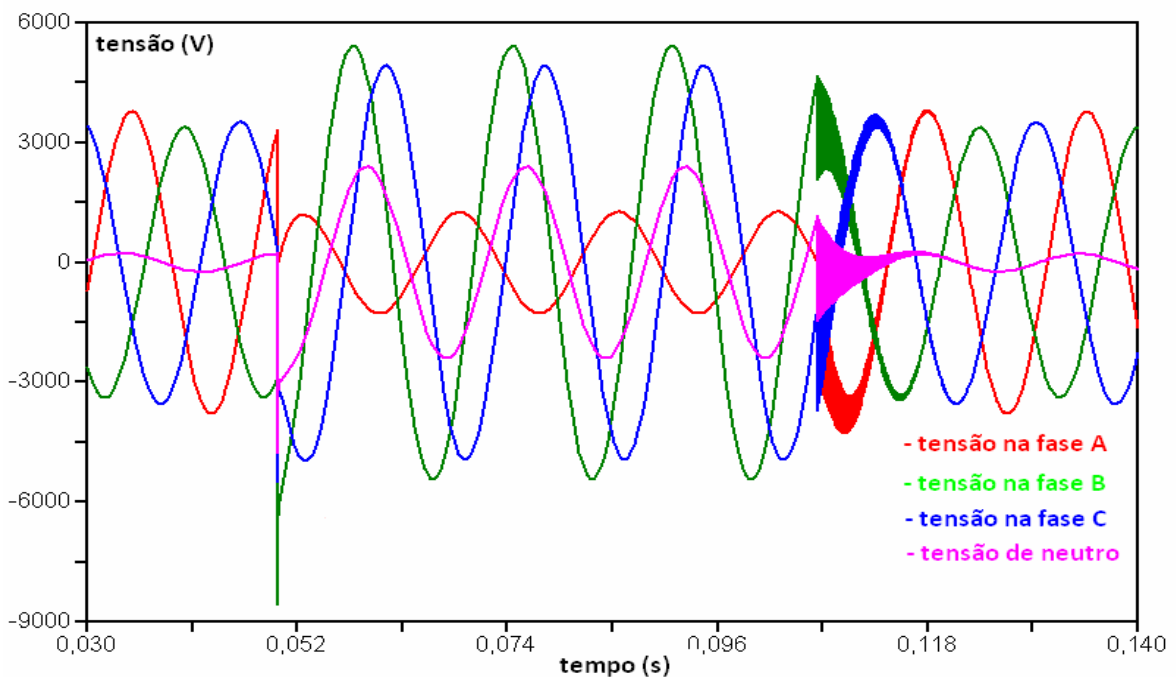


Figura 4.4 - Curvas das tensões - neutro isolado- resistência de falta $R_f=1 \Omega$ – falta na fase A

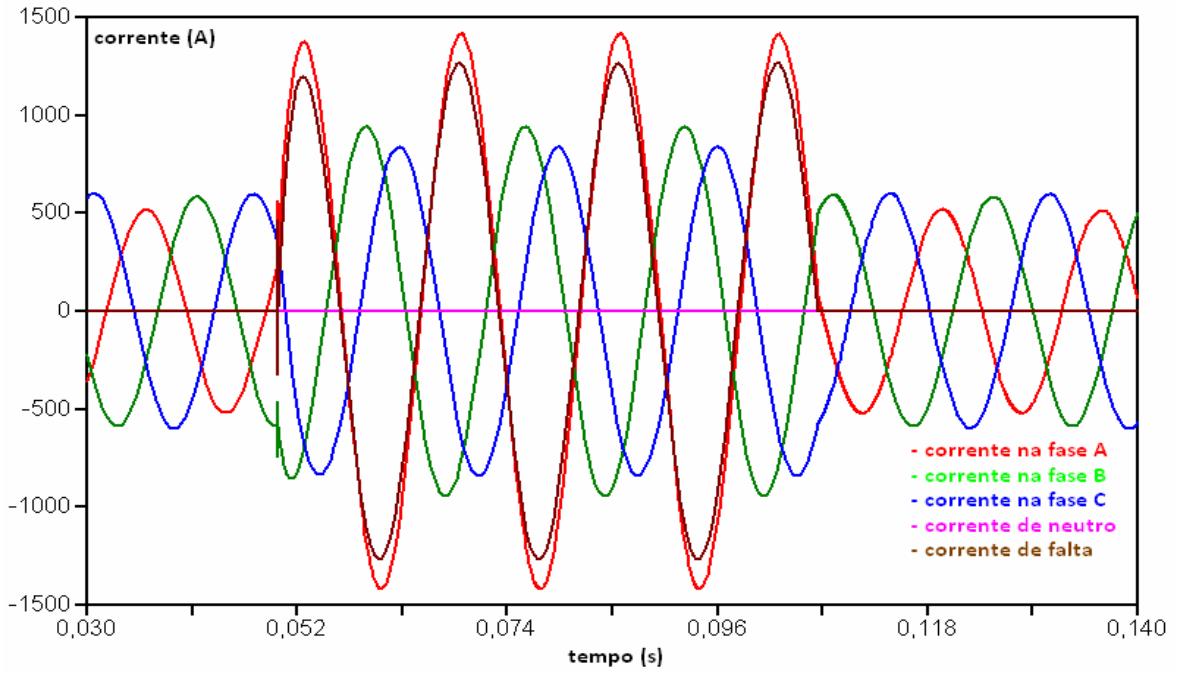


Figura 4.5 – Curvas das correntes - neutro isolado - resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta fase A

Com o neutro isolado e a resistência de falta em 10Ω , um perfil das tensões de fase e de neutro é mostrado na Figura 4.6. Da mesma forma, as curvas de corrente são aquelas observadas na Figura 4.7.

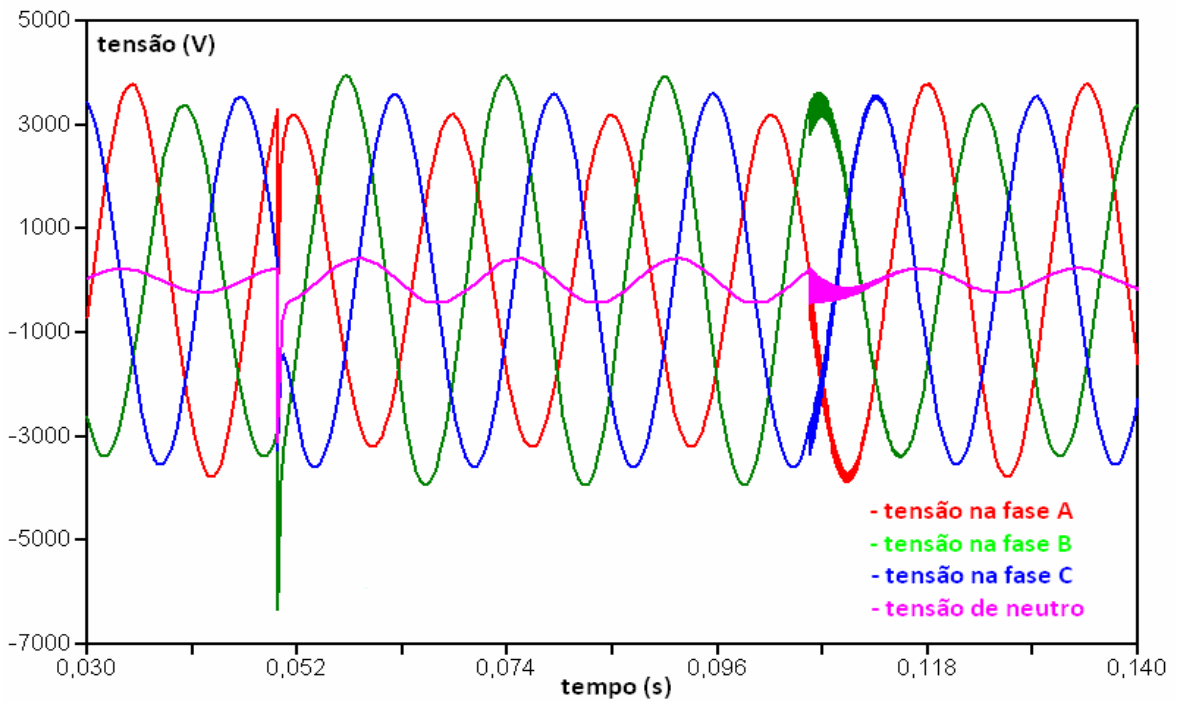


Figura 4.6 – Curvas das tensões – neutro isolado – resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A

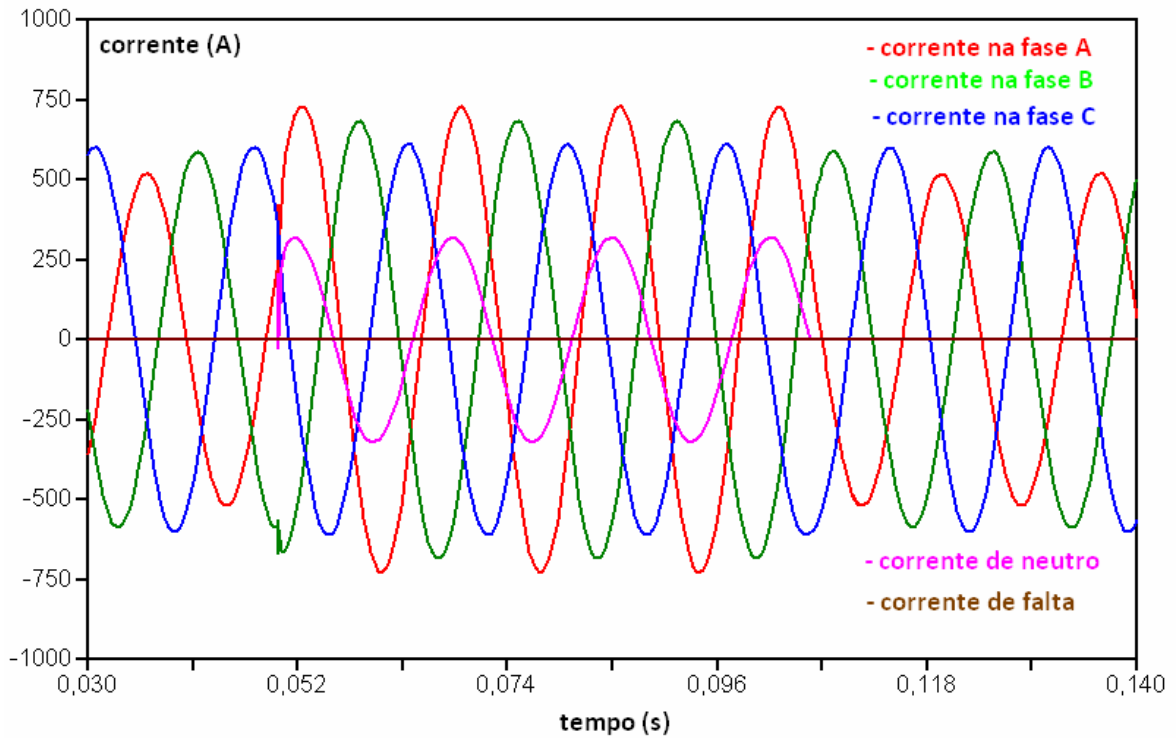


Figura 4.7- Curvas das correntes – neutro isolado – resistência de falta $R_f=10 \Omega$ – falta na fase A.

4.1.1.2 - Sistema aterrado solidamente

Nesta subseção é analisado o caso, considerando-se neutro solidamente aterrado e as faltas com diferentes valores de resistência.

A Figura 4.8 mostra as tensões de fase e de neutro durante o período transitório e regime permanente. A situação mais crítica ocorre quando o circuito é religado. Nesta situação ocorre modulação da tensão imediatamente após o religamento.

A Figura 4.9 ilustra como variam as correntes na situação em que o aterramento é sólido e a falta é franca para a terra. Observa-se neste caso elevada intensidade de corrente no neutro e na fase faltosa. Isto significa que o efeito das capacitâncias do alimentador é praticamente desprezível, visto que a mesma corrente que flui pela falta, passa também pelo neutro do transformador.

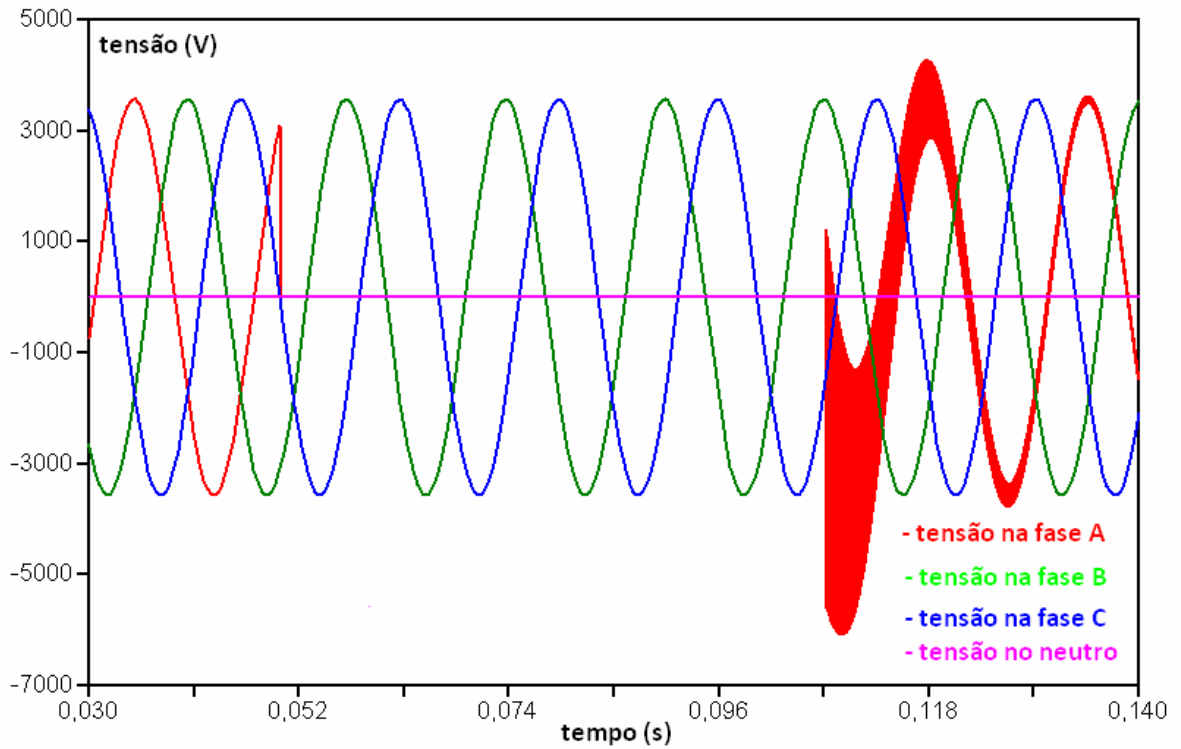


Figura 4.8 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

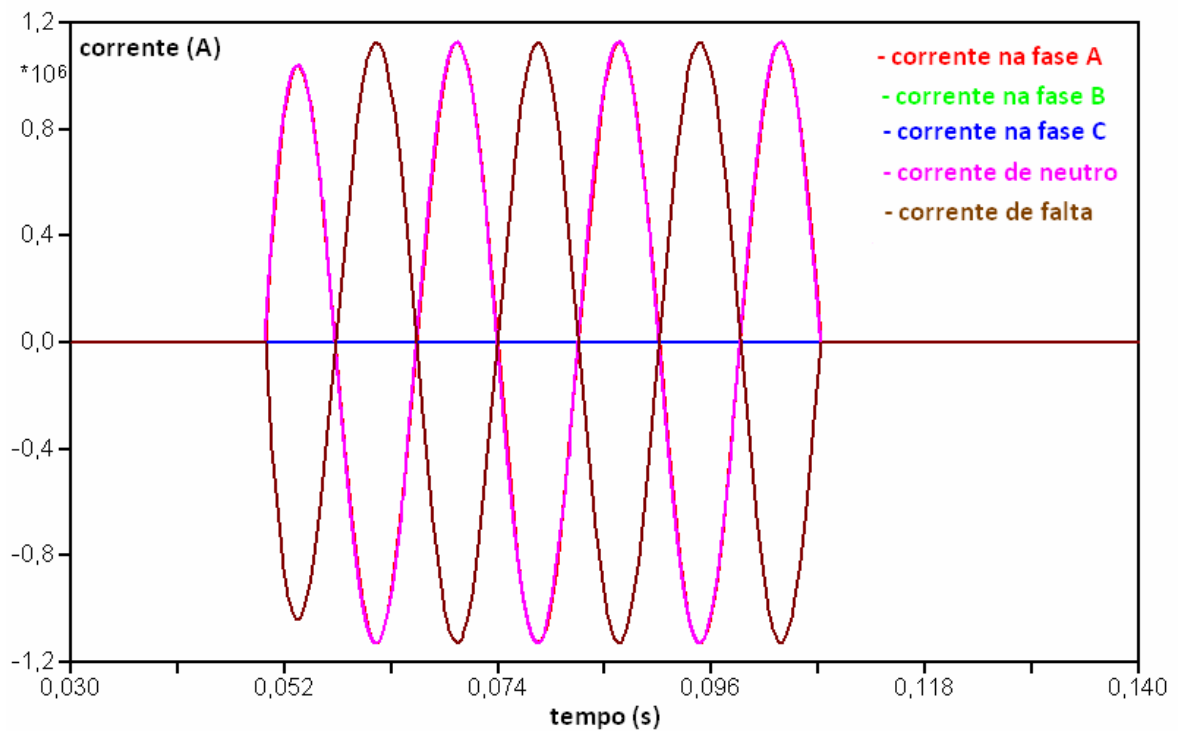


Figura 4.9 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

Outras situações de falta, considerando o sistema solidamente aterrado e a variação da resistência de falta foram estudadas, como feito na subseção anterior. As figuras 4.10 a 4.13 resumizam os resultados encontrados.

Observa-se que na Figura 4.11 a corrente na fase A, durante a falta atinge quase o triplo do valor antes da falta e no entanto não se observa alteração na tensão fato este que pode ser explicado pelo valor alto da resistência de falta.

O transitório de tensão observado na Figura 4.12 tem a mesma explicação dada para a Figura 4.4.

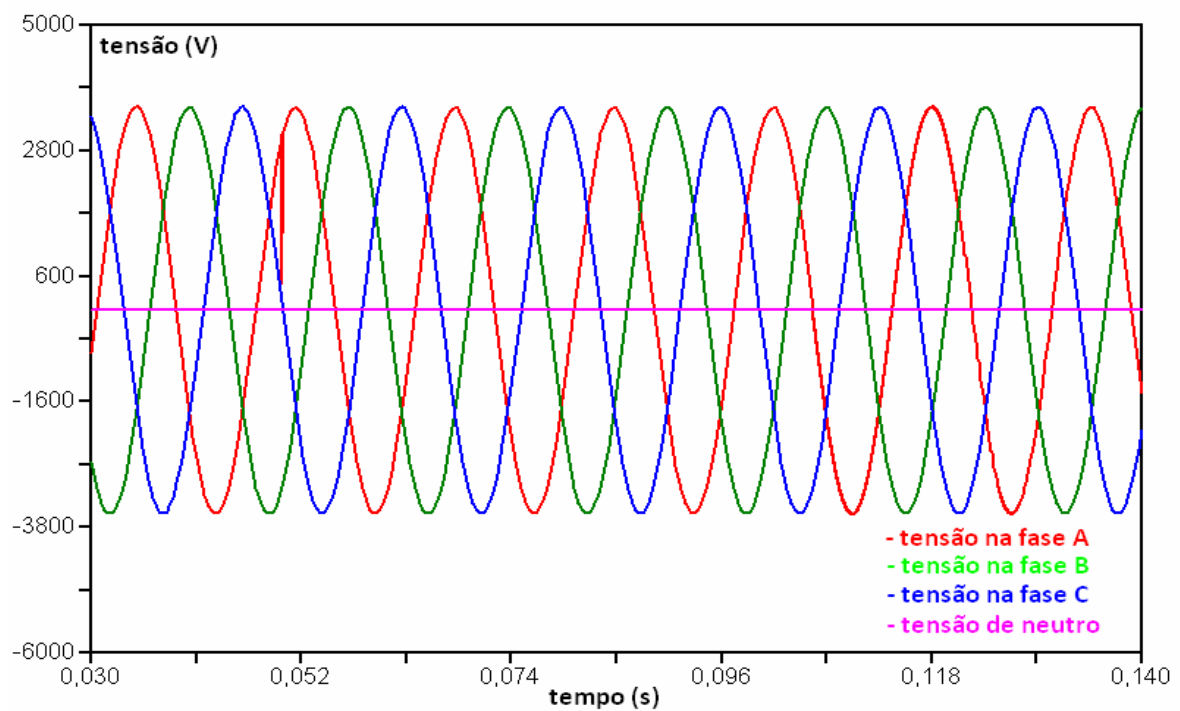


Figura 4.10 –Curvas das tensões– neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A

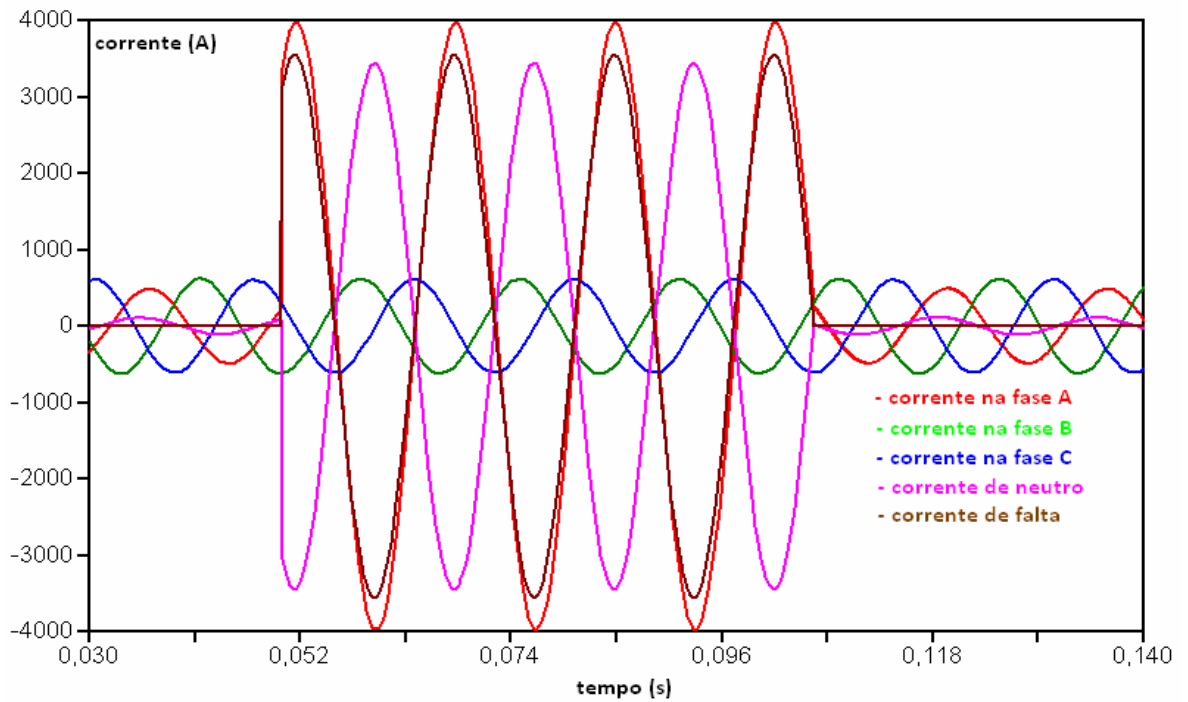


Figura 4.11– Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A

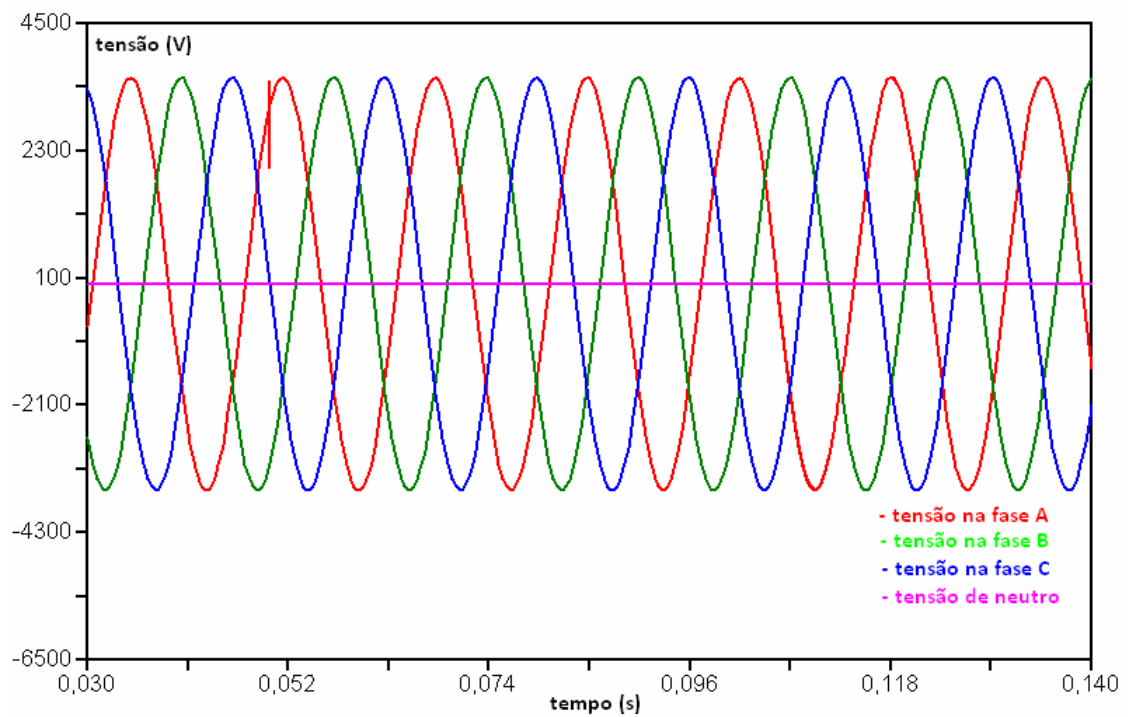


Figura 4.12 – Curvas das tensões - neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A

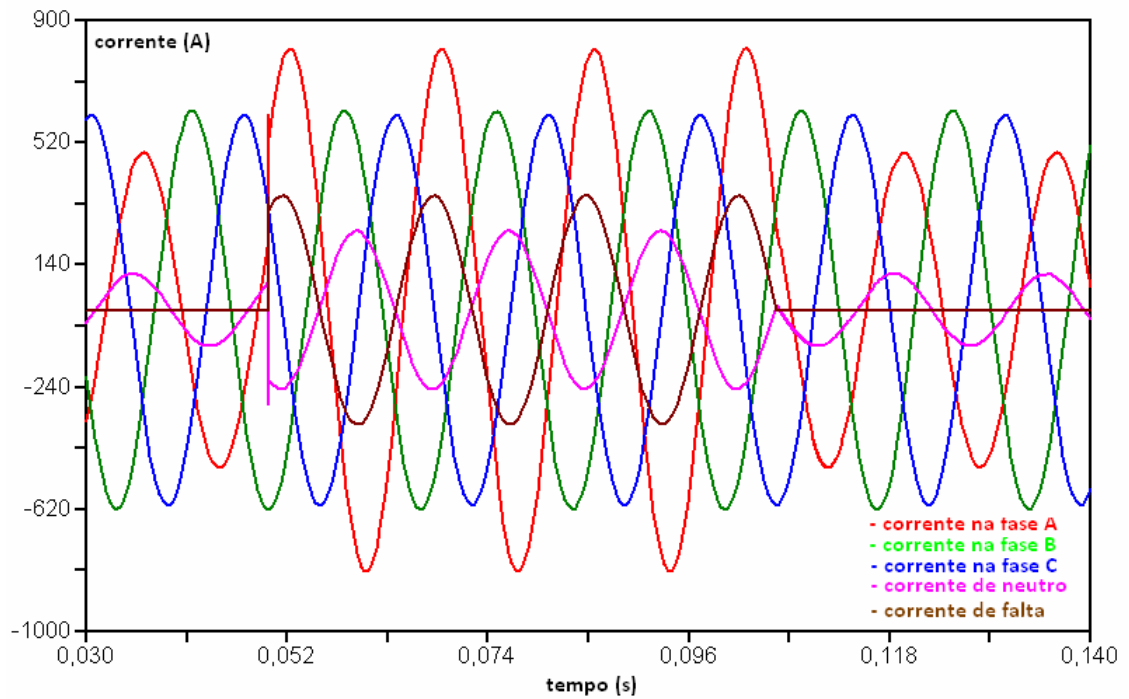


Figura 4.13 – Curvas das correntes - neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 10 \Omega$ – falta na fase A

4.1.1.3 - Sistema aterrado com $R_n = 10 \Omega$

Nas simulações subseqüentes, foi considerada uma situação intermediária entre aterramento sólido e neutro isolado. Repetiu-se o estudo para avaliação do impacto da resistência de falta sobre as grandezas, durante os períodos transitórios. Os resultados na forma gráfica são mostrados nas Figuras 4.14 a 4.19.

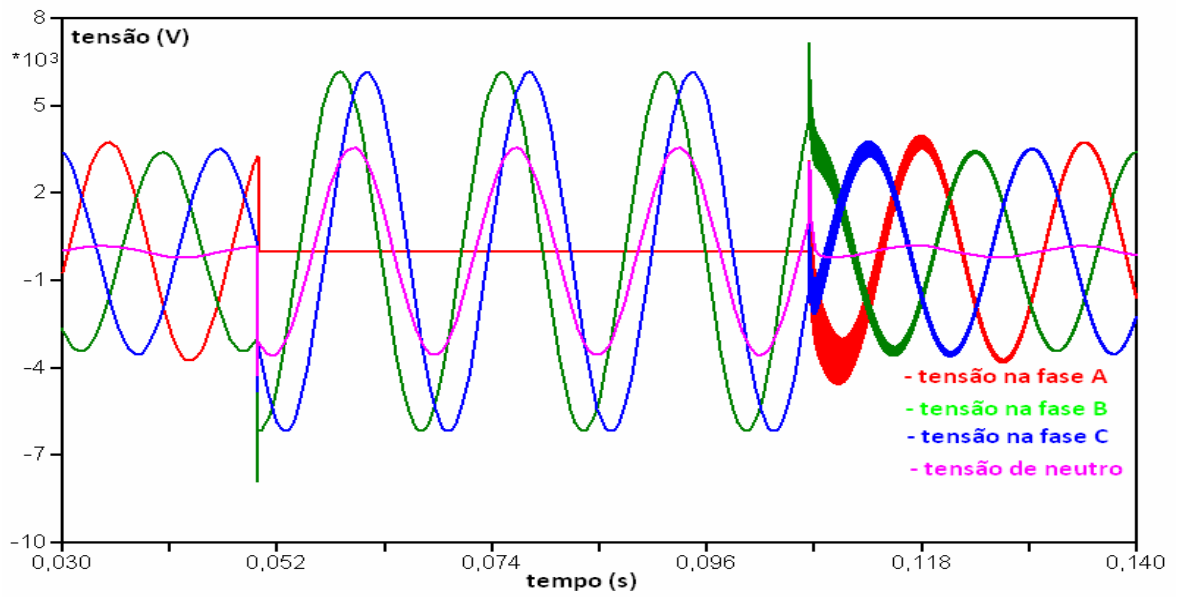


Figura 4.14 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

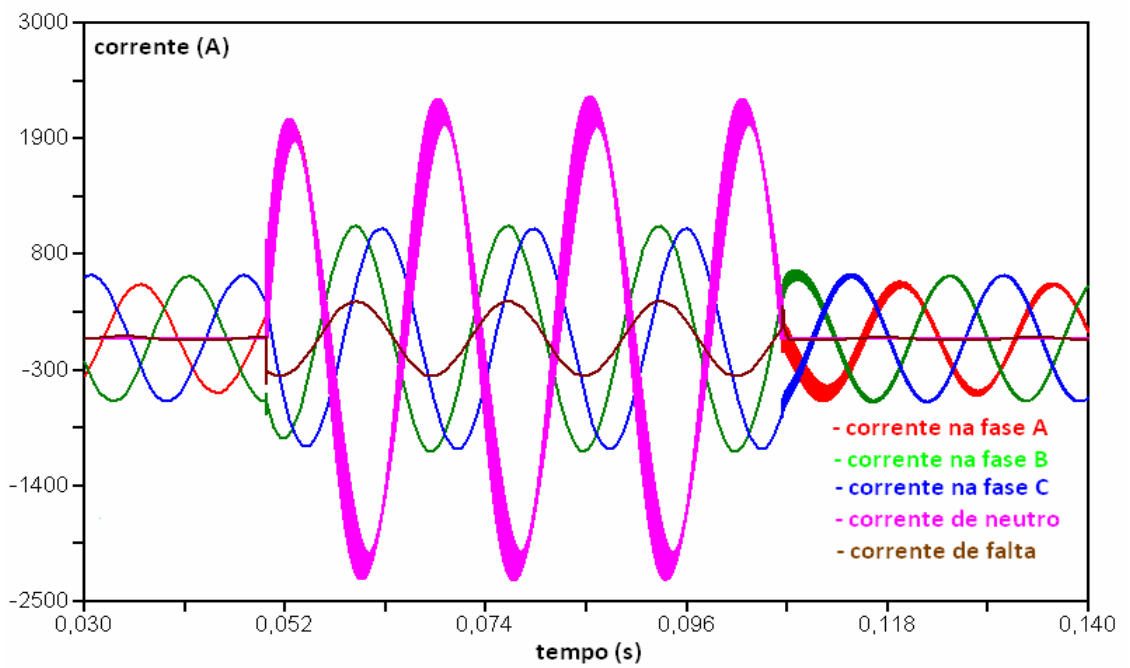


Figura 4.15 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

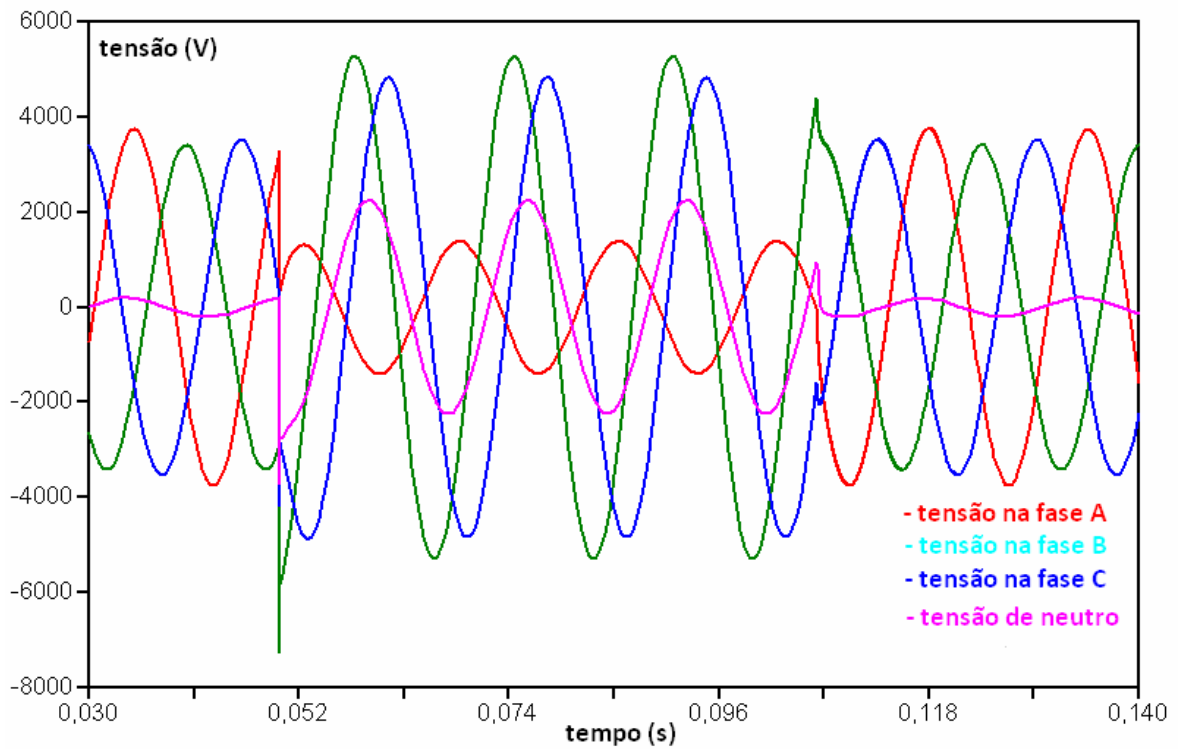


Figura 4.16 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=10\ \Omega$ - resistência de falta $R_f=1\ \Omega$ – falta na fase A

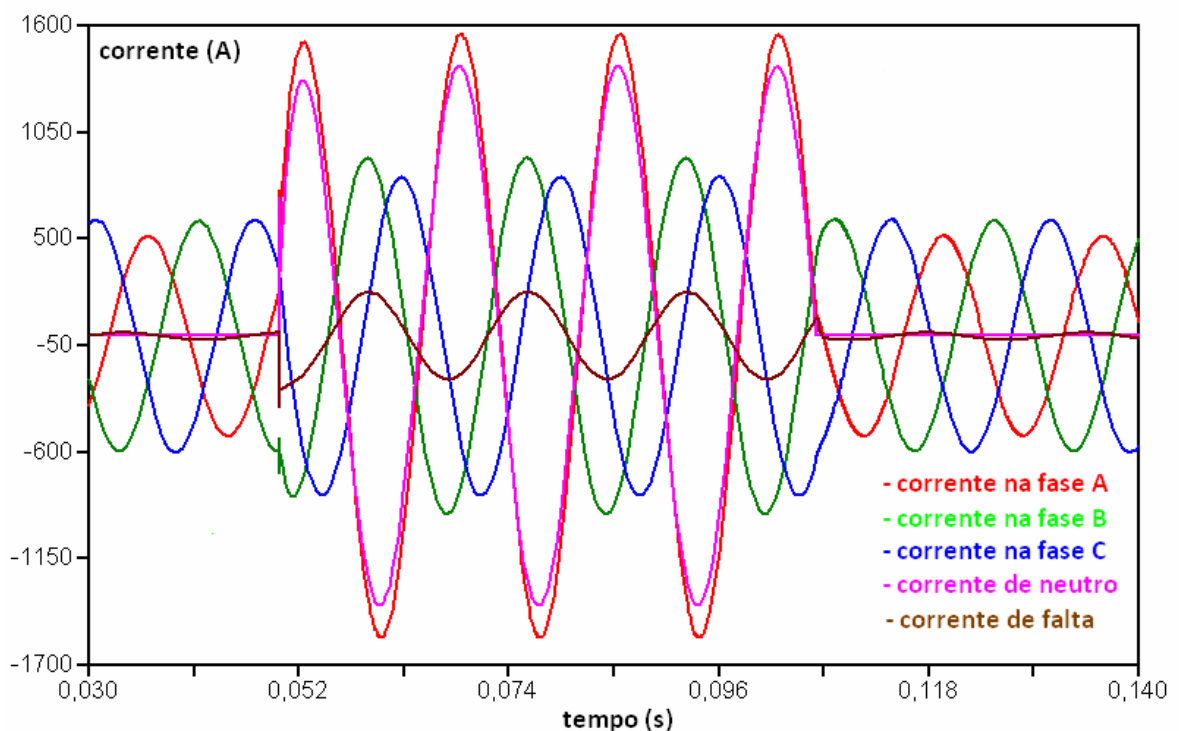


Figura 4.17 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=10\ \Omega$ - resistência de falta $R_f=1\ \Omega$ – falta na fase A

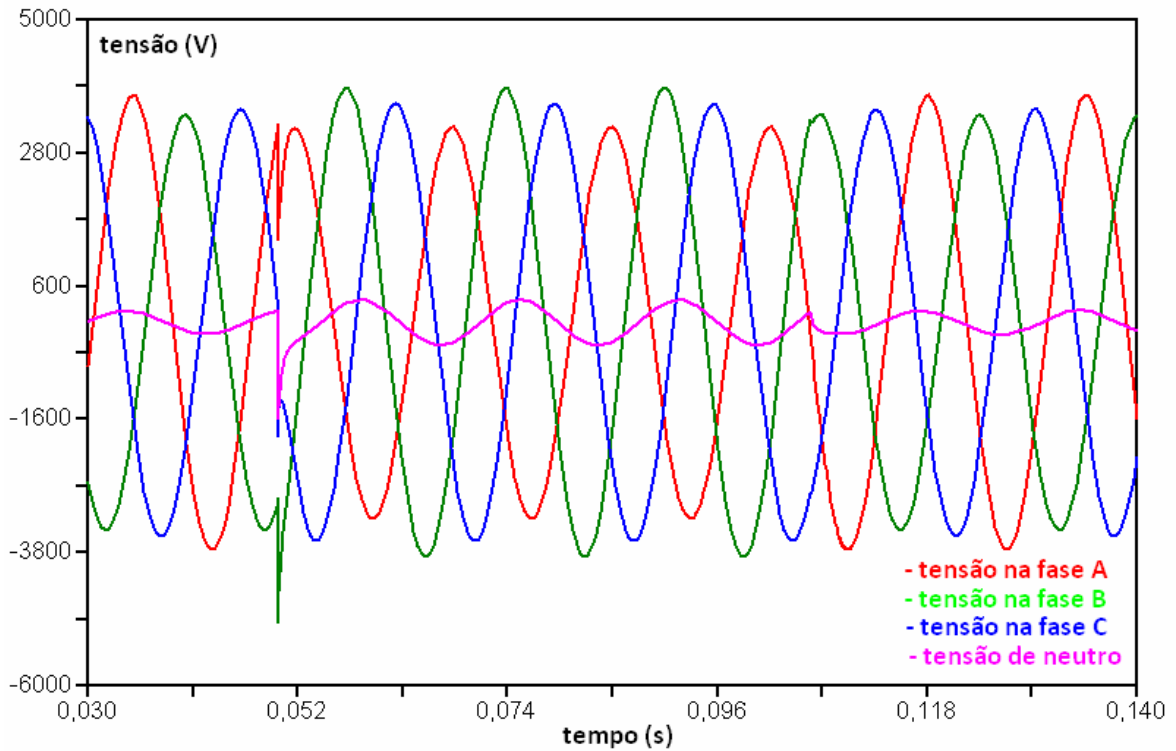


Figura 4.18 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=10\Omega$ - resistência de falta $R_f= 10\Omega$ – falta na fase A

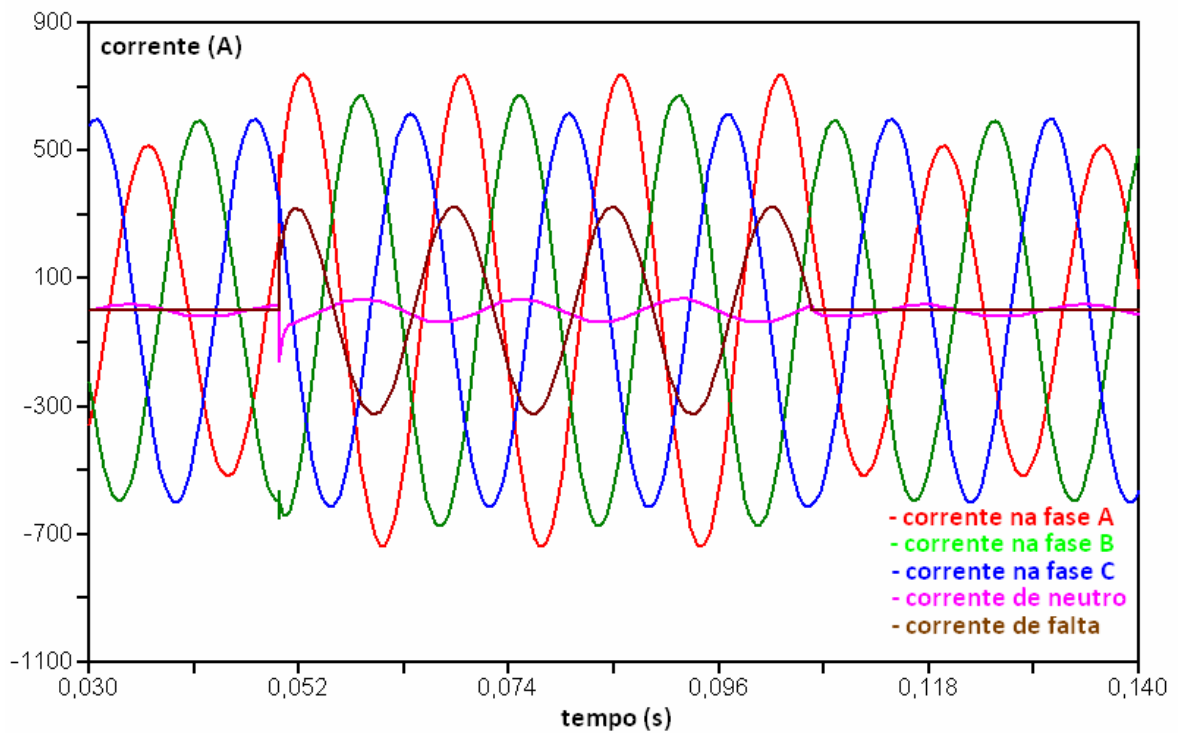


Figura 4.19 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=10\Omega$ - resistência de falta $R_f= 10\Omega$ – falta na fase A

4.1.1.4 - Sistema aterrado com $R_n=100 \Omega$

Simulações similares às anteriores são conduzidas nesta subseção. Aqui se considera que a resistência de aterramento do neutro do transformador é igual a 100Ω . Os resultados são apresentados nas Figuras 4.20 a 4.26

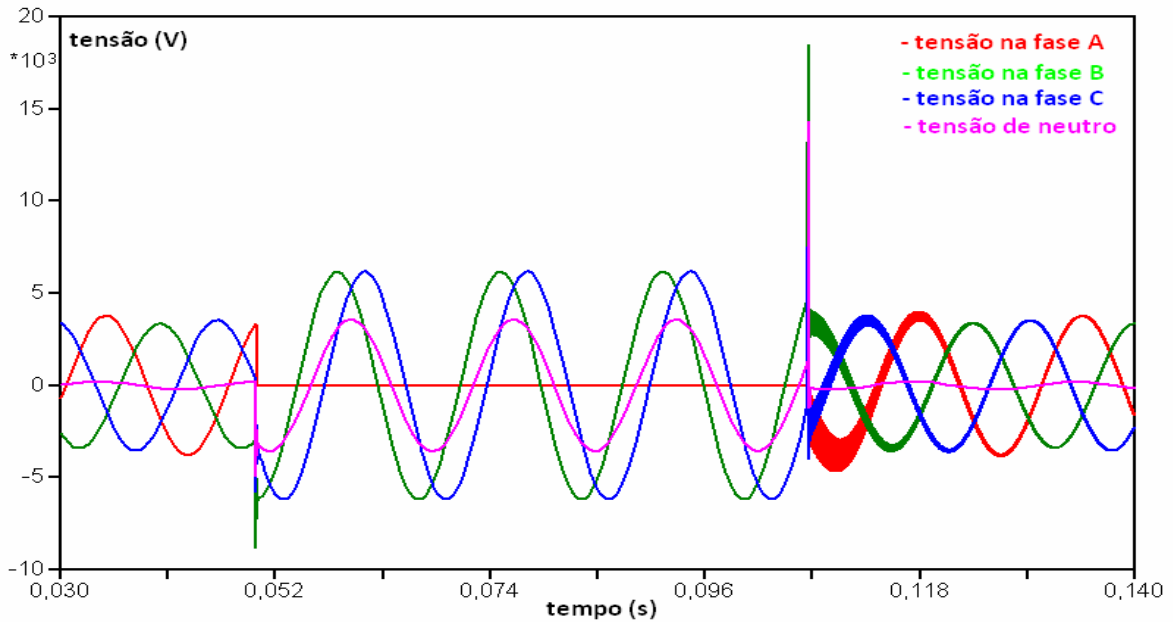


Figura 4.20 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A

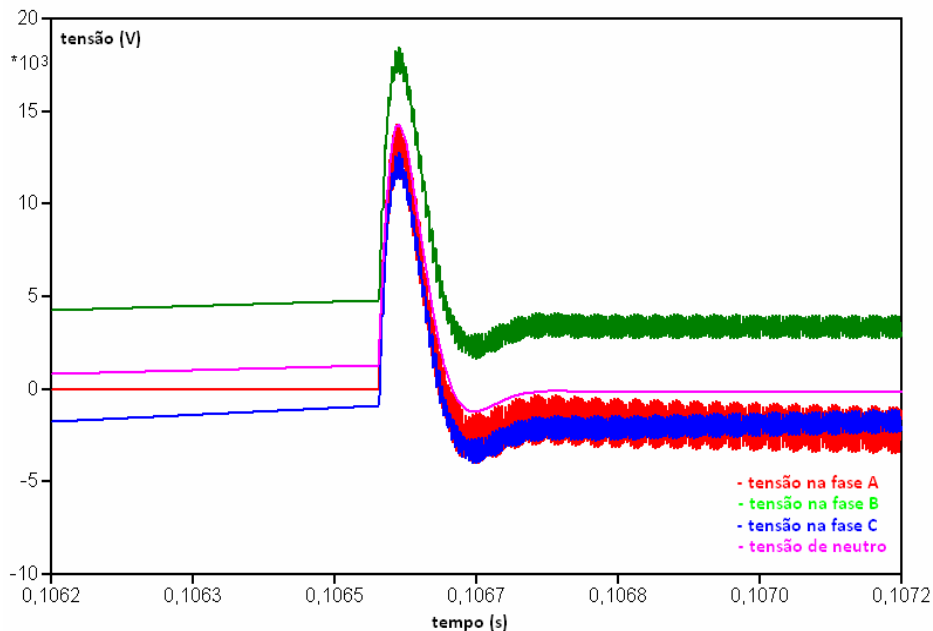


Figura 4.21 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=0$ – falta na fase A - zoom no ponto de transição logo que a falta é eliminada

O transitório ocorre pela extinção do arco e retorno da tensão na fase A [24]

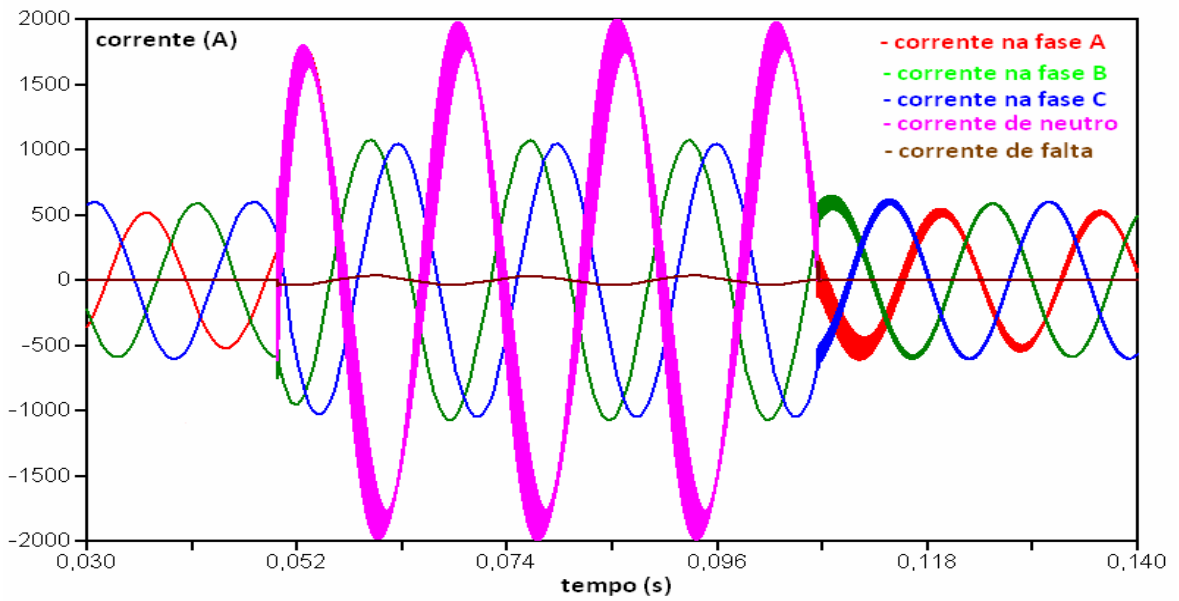


Figura 4.22 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=100\Omega$ - resistência de falta $R_f = 0$ – falta na fase A

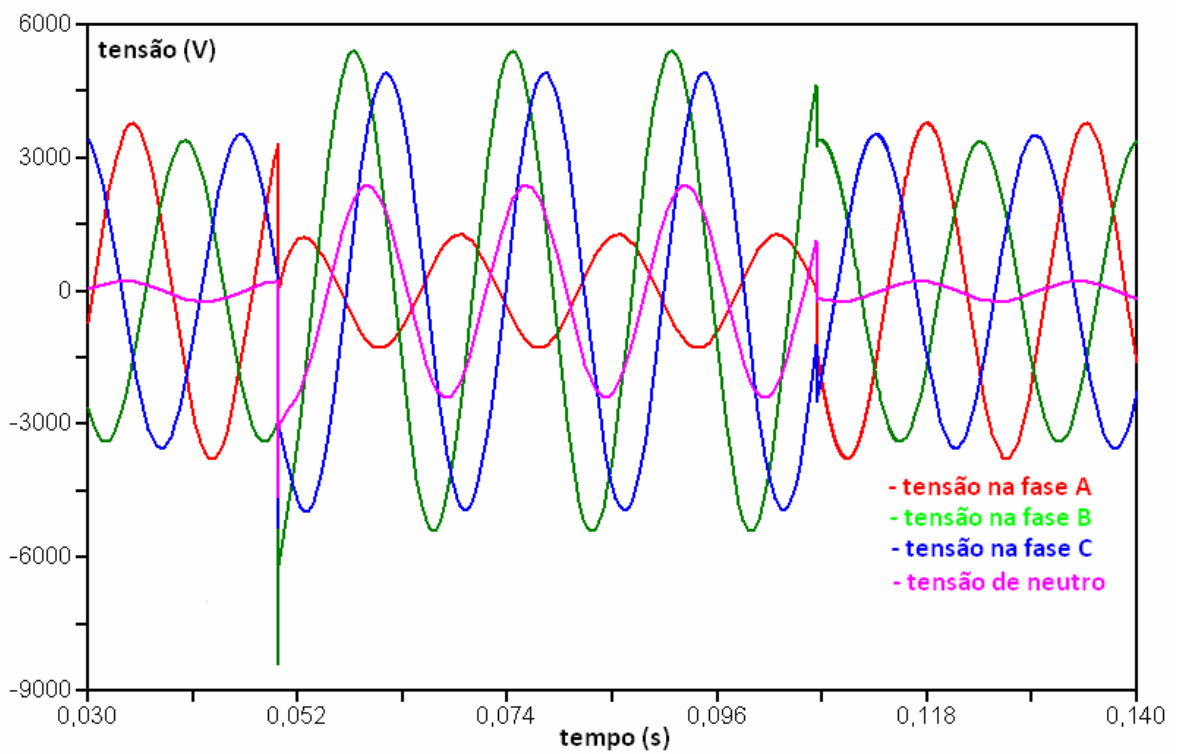


Figura 4.23 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=100\Omega$ - resistência de falta $R_f = 1\Omega$ – falta na fase A

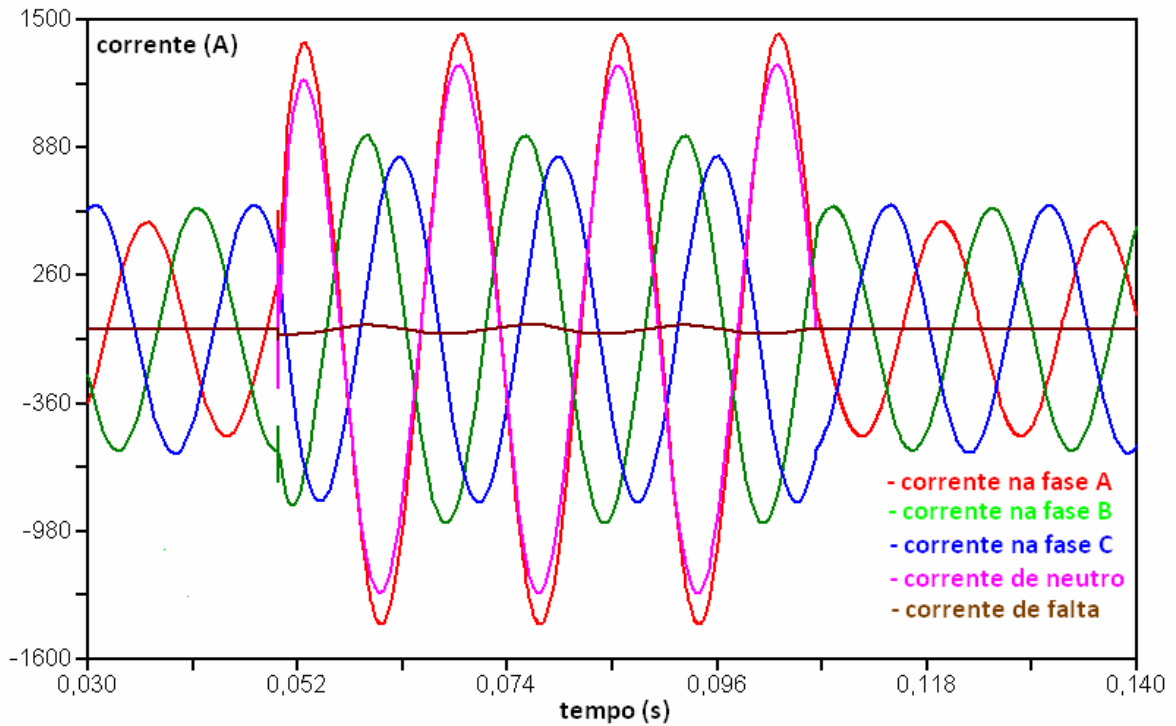


Figura 4.24 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=100\Omega$ - resistência de falta $R_f= 1\Omega$ – falta na fase A

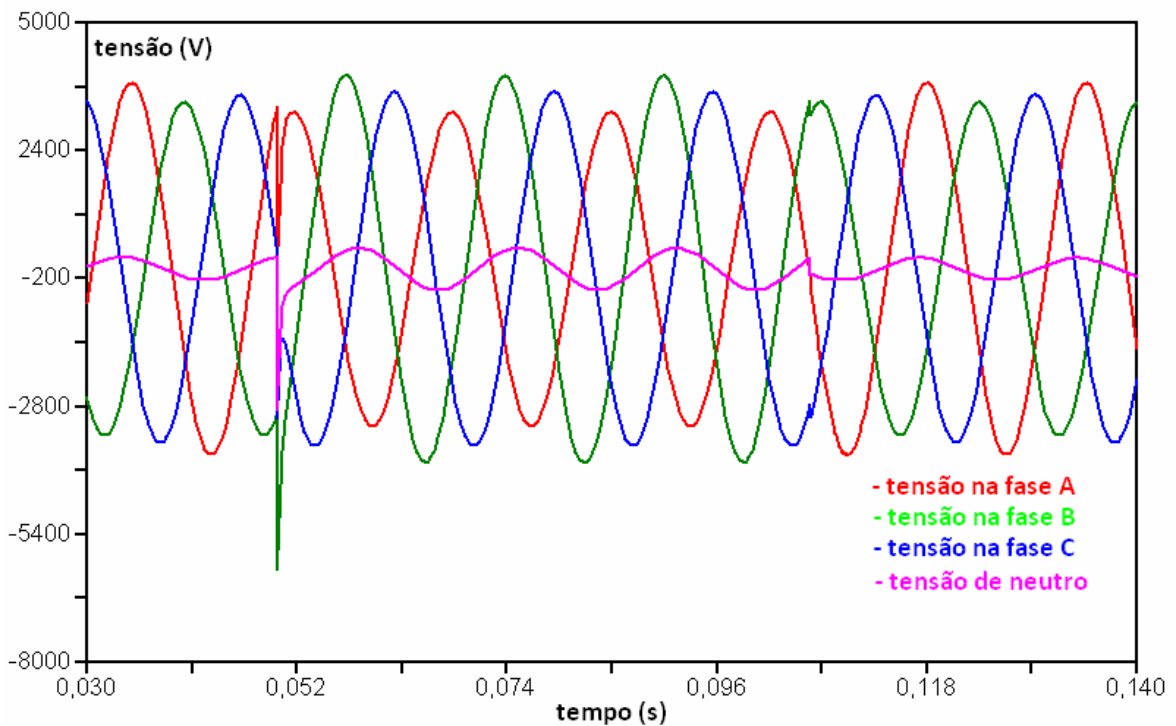


Figura 4.25 – Curvas das tensões - neutro aterrado com $R_n=100\Omega$ - resistência de falta $R_f= 10\Omega$ – falta na fase A

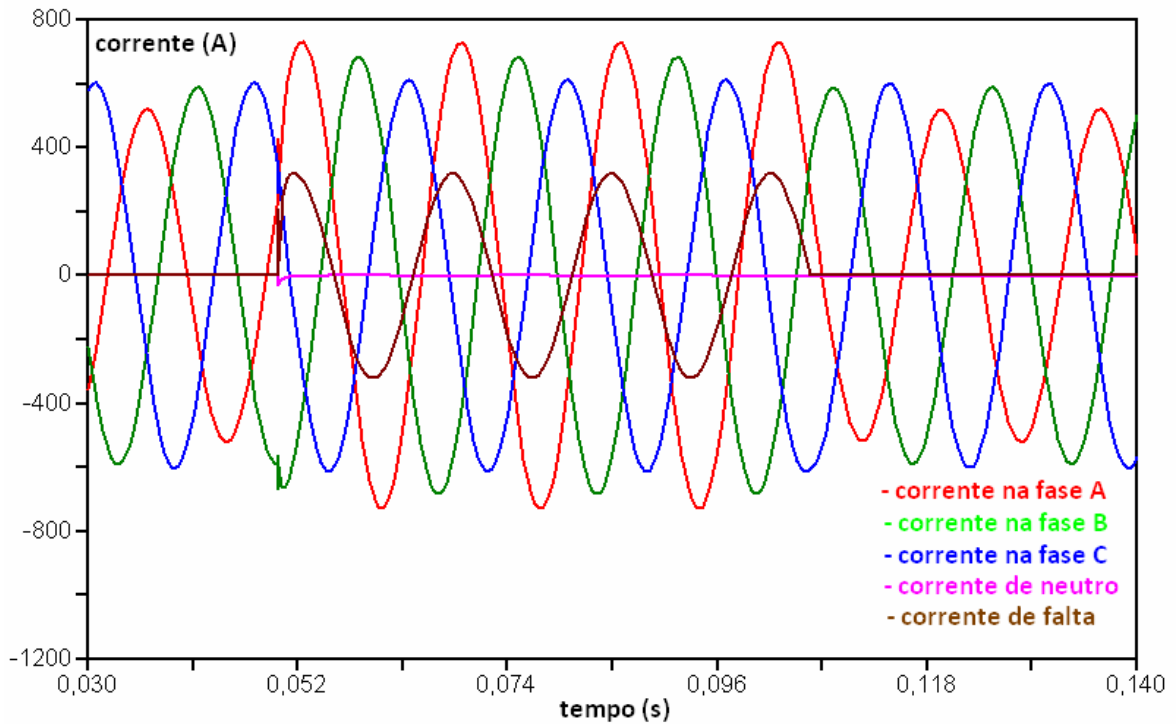


Figura 4.26 – Curvas das correntes - neutro aterrado com $R_n=100\Omega$ - resistência de falta $R_f = 10\Omega$ – falta na fase A

4.1.1.5 - Avaliação sobre os resultados das simulações

A respeito de sistemas isolados, com relação à tensão, são apontadas as seguintes observações:

- Quando a resistência de falta é zero, durante a falta, as tensões nas fases sãs são $\sqrt{3}$ maiores que antes da falta e na fase com falta é zero;
- À medida que a resistência de falta aumenta, a relação das tensões nas fases sãs, durante a falta, vai diminuindo em relação às tensões pré-falta, até chegar a se igualar quando a resistência de falta é igual a $10\text{ k}\Omega$ (Apêndice B);
- A tensão na fase faltosa vai aumentando à medida que a resistência de falta aumenta até chegar a se igualar para resistência de falta igual a $10\text{ k}\Omega$ (Apêndice B).

Com relação às correntes, pode-se destacar:

- Quando a resistência de falta é zero, durante a falta, as correntes nas fases são chegadas ao dobro do valor antes da falta e na fase com falta é máxima;
- À medida que a resistência de falta aumenta, a relação das correntes nas fases, durante a falta, vai diminuindo em relação às correntes antes da falta, até chegar a se igualar quando a resistência de falta é $10\text{ k}\Omega$ (Apêndice B);
- A corrente na fase faltosa vai diminuindo à medida que a resistência de falta aumenta, até chegar a se igualar à corrente antes da falta para resistência de falta $10\text{ k}\Omega$ (Apêndice B).

Sobre a tensão no sistema solidamente aterrado, conclui-se que as tensões antes e durante a falta não se alteram aparentemente. Mesmo ao se variar as resistências de falta, a menos da fase faltosa, para resistência de falta zero, quando a tensão durante a falta também é zero. Neste tipo de aterramento, as correntes nas fases são as mesmas antes e durante a falta à terra. Na fase faltosa, a corrente é máxima com resistência de falta zero e vai decaindo à medida que a resistência de falta aumenta.

Quando o neutro é aterrado com uma resistência razoavelmente baixa, as tensões nas fases, durante a falta, são maiores que as tensões antes da falta em mais de $\sqrt{3}$ o valor nominal. Para resistência de falta zero, a tensão de neutro é máxima. A tensão na fase faltosa, neste caso, é zero. Pode ser constatado que à medida que a resistência de falta aumenta, as tensões durante a falta caem. Observa-se que a partir da resistência de falta de $500\ \Omega$, a tensão de neutro volta a começar a crescer. A corrente de neutro durante a falta aumenta, porém decresce com o aumento da resistência de falta.

Para aterramento com resistências elevadas, como o caso de $100\ \Omega$ (Apêndice B), as tensões nas fases durante a falta são maiores que as tensões antes da falta em mais de $\sqrt{3}$ o valor nominal. Para resistência de falta zero a tensão de neutro é máxima, enquanto na fase faltosa, a tensão é nula quando a resistência de falta é zero. Por outro lado, à medida que a resistência de falta aumenta, as tensões durante a falta decaem. Observa-se que a partir da resistência de falta de $500\ \Omega$ (Apêndice B), a tensão de neutro volta a começar a crescer. A corrente de neutro durante a falta aumenta, porém decresce com o

aumento da resistência de falta.

Nos sistemas isolados, os transitórios e as sobretensões à frequência industrial são maiores do que as obtidas em um sistema aterrado através de resistência.

Os transitórios no início da falta e quando a falta é eliminada são explicados em [24], conforme já citado nos comentários das Figuras 4.2 e 4.4.

Observando-se as curvas das simulações, nota-se o aparecimento de transitórios de tensão nos seguintes casos:

a) Sistema isolado - início da falta:

- Resistência de falta 1 Ω ;
- Resistência de falta 10 Ω ;

b) Sistema isolado – na extinção da falta:

- Resistência de falta zero.

c) Sistema solidamente aterrado – na extinção da falta:

- Resistência de falta zero.

d) Sistema aterrado com resistência de 10 Ω – início da falta:

- Resistência de falta zero;
- Resistência de falta 1 Ohm;
- Resistência de falta 10 Ohms.

e) Sistema aterrado com resistência de 10 Ω – na extinção da falta:

- Resistência de falta zero.

f) Sistema aterrado com resistência de 100 Ω – início da falta:

- Resistência de falta zero;
- Resistência de falta 1 Ω ;
- Resistência de falta 10 Ω ;

g) Sistema aterrado com resistência de 100 Ω – na extinção da falta

- Resistência de falta zero
- Resistência de falta 1 Ω .

No item 4.2 aborda-se a questão dos testes com a inserção da bobina de Petersen.

4.2 - TESTES COM A INSERÇÃO DA BOBINA DE PETERSEN

4.2.1 - Introdução

Na subseção 4.1, abordaram-se testes no qual foi destacado o aterramento por resistor de neutro. Nesta subseção apresentam-se testes e resultados, onde explora-se o impacto da inserção da bobina de Petersen nos neutros de transformadores de média tensão. Estes transformadores podem conectar alimentadores com condutores aéreos convencionais ou cabos com elevadas capacitâncias. Por esta razão, optou-se neste capítulo por apresentar testes em dois sistemas com essas características. Um dos sistemas é constituído por um alimentador aéreo com condutores tradicionais de alumínio. O outro é um alimentador constituído por cabos compactos, com elevadas capacitâncias.

Nesta subseção, as simulações são realizadas no domínio da frequência e do tempo. Em alguns casos, havendo uma comparação das duas abordagens. O enfoque no domínio da frequência, ou de fasores, é adequado para a situação na qual é possível realizar-se o ajuste da bobina de Petersen por meio de um circuito equivalente de Norton. Além disso, o enfoque pode ser utilizado para avaliar o conteúdo de frequências dominantes, quando transitórios estão presentes em determinados sinais, como semelhantes àqueles mostrados no sub-item anterior.

4.2.2 - Sistema aéreo com baixas capacitâncias

Este é o mesmo sistema-teste utilizado nas simulações anteriores. O seu estudo aqui serve apenas para ilustrar a dificuldade (ou impossibilidade) de ajuste da bobina de Petersen para um alimentador no qual a participação das capacitâncias dos cabos são pouco significativas. Neste tipo de alimentador, de comprimento pequeno a médio, as correntes capacitivas são desprezíveis, mesmo quando a operação ocorre a vazio. Como o critério tradicional e a justificativa para inserção da bobina de Petersen em redes de média tensão, é baseado no cancelamento das correntes capacitivas, este método será verificado aqui para apontar as dificuldades que se encontra para o ajuste da bobina de Petersen para este tipo de alimentador.

4.2.2.1 - Sistema-teste com alimentador aéreo

Como mencionado antes, o sistema utilizado nesta parte das simulações é um equivalente daquele apresentado em [42], destacando-se apenas o alimentador que sai do lado de baixa tensão do transformador. Nas simulações, o transformador foi considerado ideal, tendo tensão 115kV/4,15kV, com ligação delta no primário e estrela no secundário, onde é conectado o alimentador. O alimentador foi dividido em duas partes. Uma que vai até um ponto onde ocorre uma falta fase-terra, na fase “a”. E outra que se estende desse ponto a uma carga trifásica. A representação do alimentador é através de um circuito “PI”, cujos parâmetros equivalentes são mostrados na Tabela 4.1. Os parâmetros de elementos mútuos foram desconsiderados por não apresentarem contribuições expressivas nos estudos conduzidos.

Tabela 4.1 Parâmetros do alimentador.

Grandeza	Fase “a”	Fase “b”	Fase “c”
<i>R</i>(Ω/km)	21,83	21,33	21,50
<i>X</i>(Ω/km)	64,33	66,17	65,33
<i>Y</i>($\mu S/km$)	4,0	3,8	3,6

A parte do alimentador que vai do transformador ao ponto de falta tem 300 m. Uma segunda parte, que se estende do ponto de falta até a carga trifásica foi modificada (o alimentador original apresentava apenas 600 m), para 6,0 km. Justamente para verificar se aumento das capacitâncias seria significativo para as parcelas de correntes A carga trifásica é formada por uma resistência ligada em série com uma reatância. A carga é desequilibrada e apresenta os seguintes parâmetros por fase: $R_a=6,12 \Omega$, $X_a=3,93 \Omega$, $R_b=5,07 \Omega$, $X_b=2,73 \Omega$, $R_c=5,07 \Omega$, $X_c=2,97 \Omega$. Para o transformador ideal, foi considerada a relação de transformação $n:1$, onde $n=115/2,4018=47,88$.

Todas as faltas foram consideradas do tipo fase-terra. Para este sistema, a fase faltosa foi sempre a “a” e a resistência de falta foi igual a 10Ω em todos os casos.

As simulações foram realizadas no domínio da frequência e do tempo. No domínio da

frequência, a determinação dos picos de ressonância e da natureza da impedância (indutiva ou capacitiva em dada frequência) é feito de forma direta, uma vez que se dispõe da resposta em frequência (magnitude e fase da grandeza). Além disso, pode-se observar o espectro das grandezas, avaliando-se em que frequência ocorre dominância. É bastante adequado para se determinar a impedância (ou admitância) em um dado ponto do sistema. A simulação no domínio do tempo visa mostrar como as grandezas se comportam em regime permanente e transitório. Em todas as simulações, o software utilizado foi o ATP [43]. Embora vários cálculos tenham sido realizados a partir de dados gerados no ATP, em algumas simulações foi utilizado também o Matlab. No ATP, exploraram-se as aplicações "*time simulation*" e "*frequency scan*". Esta última aplicação é pouco empregada entre os usuários do ATP, por preferirem simulações no domínio do tempo. Para usar esta aplicação, o usuário deve fornecer a frequência inicial, em Hz; a frequência final, em Hz; o incremento df de frequência (quando $df=0$, o aplicativo assume escala logarítmica na base 10 para a frequência); e NPD ao número de pontos por década. A escala de frequência em Hz, aparece na base logarítmica decimal.

4.2.2.2 Simulações no domínio do tempo e da frequência

Uma avaliação da tensão do neutro foi realizada, considerando-se alguns valores para o seu aterramento por meio de uma resistência R_n e por uma reatância X_n . A Figura 4.27 mostra as situações em que $R_n=X_n= 1M\Omega$ (neutro isolado) e $R_n=X_n=100 \Omega$. Supôs-se que o alimentador estava em duas situações extremas: com e sem carga. Esta última condição pode ocorrer quando há rejeição de carga, ou quando a mesma é desligada pela atuação da proteção, mas a falta é permanente. Quando na situação sem carga, a tensão no neutro atinge valores elevados, tanto para a frequência síncrona, quanto próximo à frequência de ressonância. Na condição de operação com carga, níveis de tensão bem menores são obtidos. Isto se justifica, porque parte da corrente capacitiva é absorvida pela carga, não havendo necessidade de elemento para compensá-la. Os comportamentos da tensão do neutro são bastante similares nas condições com e sem carga.

Outra avaliação considerada, foi reduzir as impedâncias de aterramento, sendo simuladas as seguintes situações: com e sem carga. Aqui, foram usados os casos em que $R_n=50 \Omega$ e $X_n=0,1 \Omega$; e $R_n=0,1 \Omega$ e $X_n=0,1 \Omega$. A Figura 4.28 mostra as curvas obtidas.

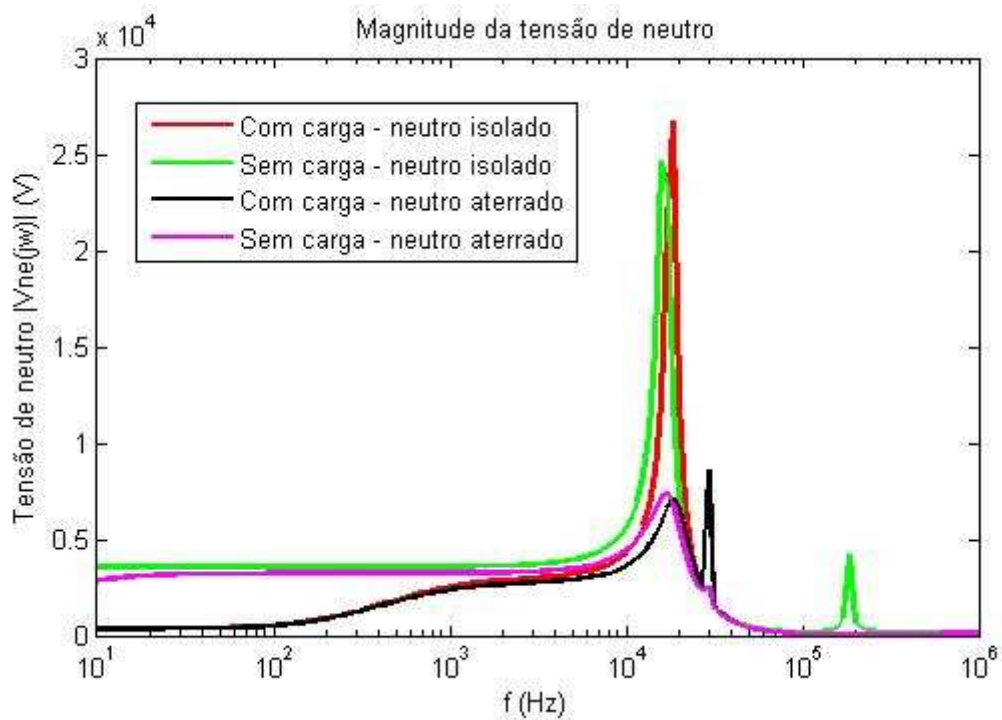


Figura 4.27 – Tensão no neutro para duas situações de operação e para algumas situações de aterramento do neutro.

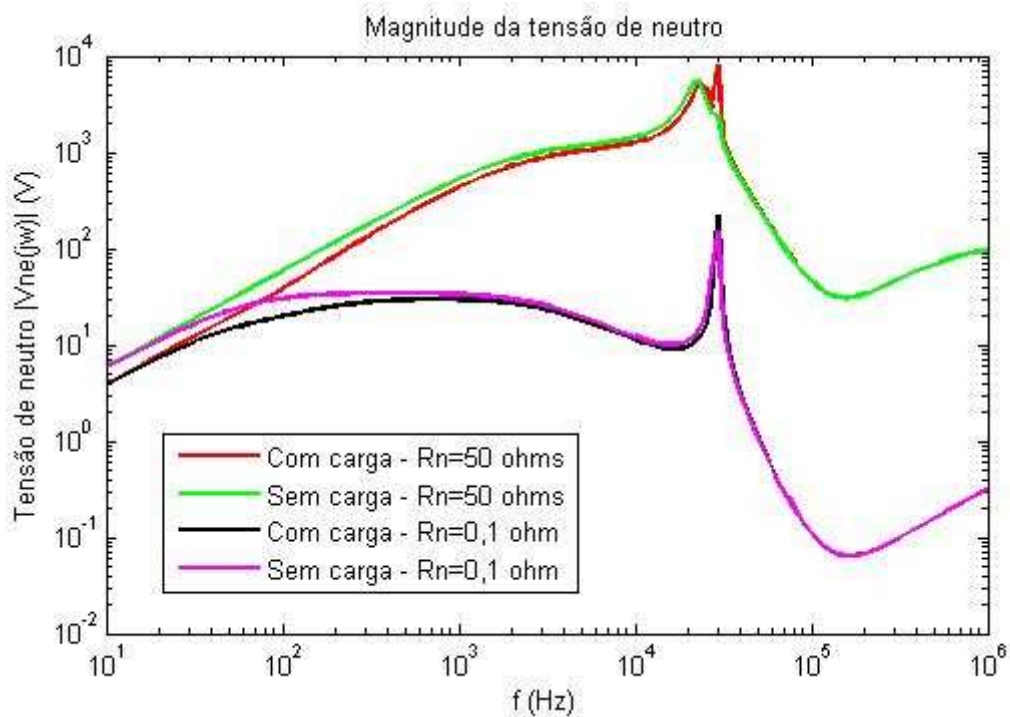


Figura 4.28 – Tensão do neutro para duas situações de operação e de aterramento do neutro – a escala vertical esta em escala logarítmica para melhor ilustrar juntos os resultados das quatro situações simuladas.

Para o caso das curvas mostradas na Figura 4.28, a tensão do neutro atinge valores inferiores a 100 V, exceto na frequência de ressonância, para as situações com e sem carga. Em todos os casos, os comportamentos na situação com e sem carga são similares. Uma outra constatação é que alterações em R_n e X_n não modificam significativamente o ponto de ressonância. Entretanto, afeta a magnitude da tensão de neutro e, como consequência, modifica também a corrente de neutro.

Tendo em vista que a análise para as condições com e sem carga têm comportamento similares, e que a condição sem carga é a mais crítica para a tensão do neutro, considerar-se-á, então, esta condição de operação para a análise que se segue.

Com o objetivo de avaliar a impedância do neutro do transformador, foram calculadas a admitância e a impedância vista desse ponto. O resultado é útil para possível compensação no neutro através de bobina de Petersen. As curvas de admitância foram obtidas diretamente do ATP, ajustando a simulação para o domínio da frequência, fazendo-se uso da aplicação “*frequency scan*”. Calculou-se a corrente gerada por uma fonte de tensão senoidal unitária fictícia conectada entre o neutro e o terra do sistema. Para esta finalidade, as fontes de tensão efetivas do sistema foram zeradas. Então, a corrente gerada por essa fonte é a própria admitância equivalente vista do neutro do transformador.

A Figura 4.29 mostra a magnitude da admitância $Y(j\omega)$ em função da frequência no ponto onde deve ser inserida a bobina. A Figura 4.30 mostra a fase correspondente dessa admitância.

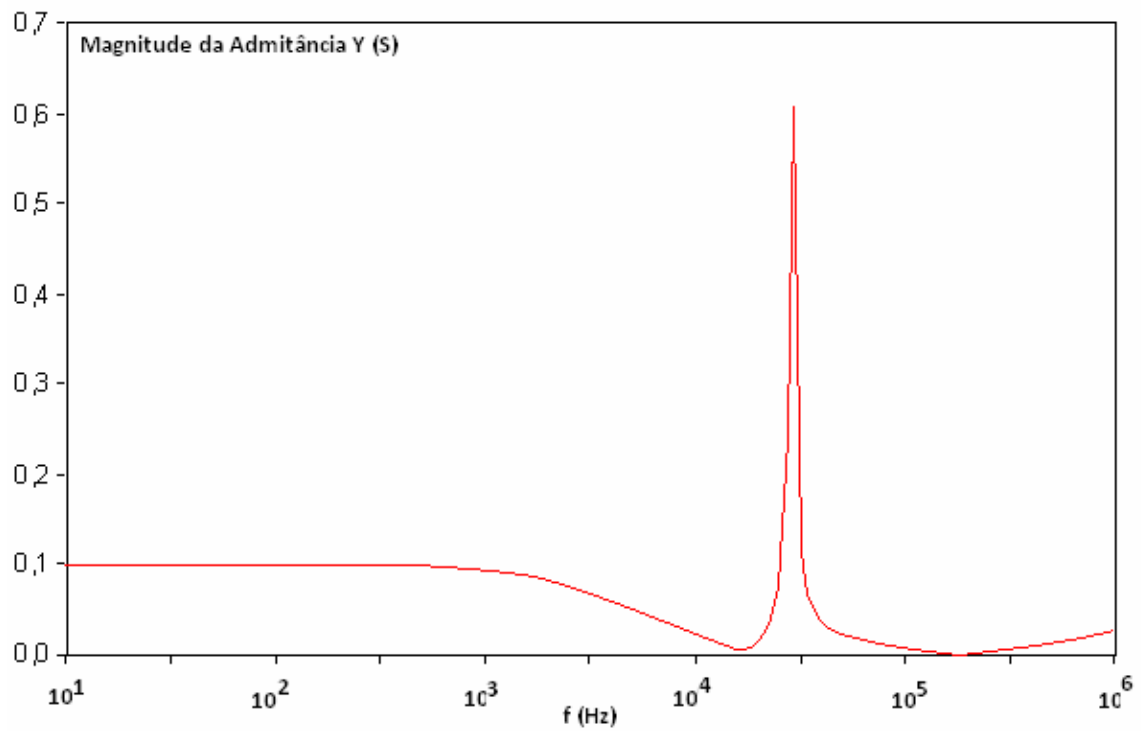


Figura 4.29 – Magnitude da admitância $Y(j\omega)$, em Siemens.

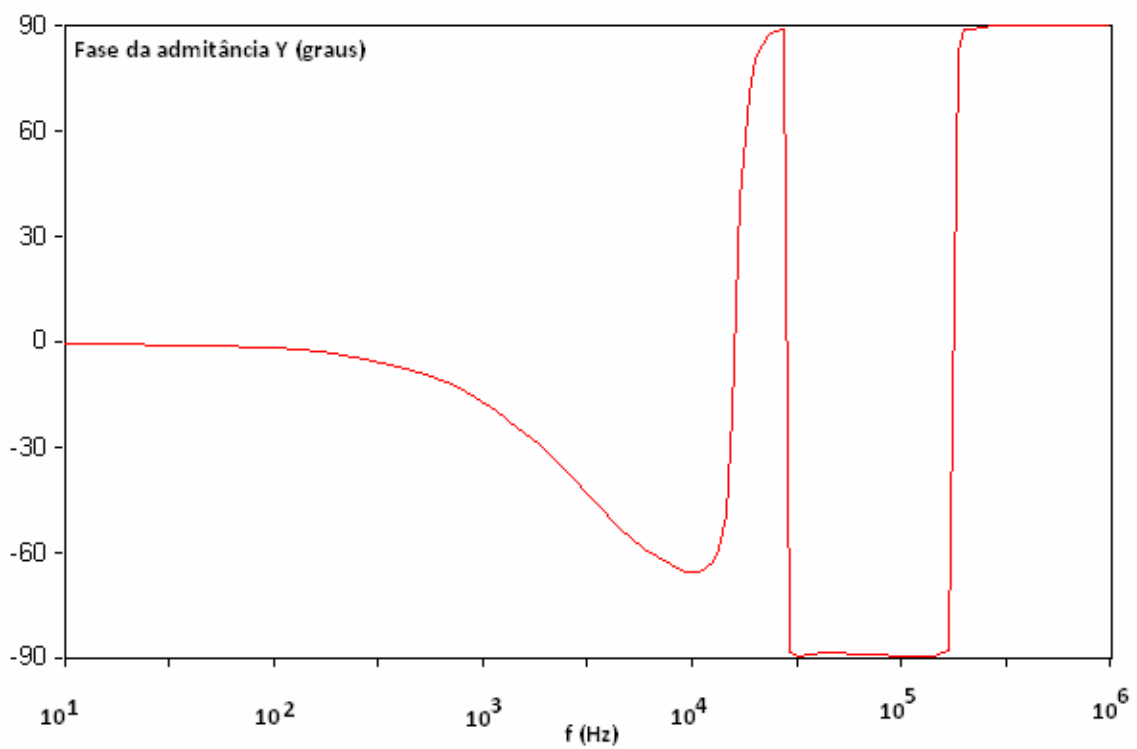


Figura 4.30 – Fase da admitância $Y(j\omega)$, em graus.

A partir da magnitude da admitância, em função da frequência, observa-se um ponto de ressonância na frequência 29,56 kHz ($10^{4,4707}$). A partir da curva em fase, verifica-se que a admitância apresenta fase menor ou igual a zero até 26,41 kHz, indicando característica indutiva do circuito visto a partir do neutro do transformador. Ao contrário, na faixa $26,41 < f < 27,91$ kHz o circuito é capacitivo. Nesta faixa, a bobina de Petersen faria efeito, uma vez que a sua função é compensar correntes capacitivas. Na faixa seguinte de 27,91 até 177,83 kHz, o circuito volta a ser indutivo. Finalmente, ele volta a ser capacitivo a partir de 177,83 kHz em diante. Os dados de $Y(j\omega)$ foram exportados para o ambiente Matlab e utilizados para computar a impedância em função da frequência $Z(j\omega)$, ou seja, $Z(j\omega)=1/Y(j\omega)$.

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram a magnitude e a fase da impedância, respectivamente. O resultado indica que há ressonância em duas frequências: em $f_0=15,85$ kHz, onde a magnitude de $Z(j\omega)$ é igual a 240Ω ; e em $f_0=184,80$ kHz, onde o módulo de $Z(j\omega)$ passa a ser 6.500Ω . Na primeira frequência de ressonância, o circuito é indutivo, conforme já comentado na análise do comportamento da admitância. No segundo valor, corresponde à fase igual a -83° , caracterizando assim impedância capacitiva. Portanto, este último resultado, além de ser o que apresenta maior magnitude, é justamente o que apresenta natureza capacitiva. Logo, somente teria sentido alocar uma bobina de Petersen no neutro do transformador para compensar essa última frequência. Logicamente, este é um indicador que mostra a inviabilidade para se usar uma bobina de Petersen neste sistema. Estas informações indicam também que transitórios de muito altas frequências no tempo devem ocorrer preponderantemente nessas frequências.

Realizaram-se simulações no tempo para avaliar a influência dessas duas frequências de ressonância sobre os resultados transitórios. Foi considerado inicialmente $R_n=X_n=1000$ k Ω , simulando uma condição na qual o neutro pode ser suposto isolado da terra. Também, mais próximo da representação do efeito apenas da impedância equivalente $Z(j\omega)$ vista do ponto de neutro do transformador. Consideraram-se fontes de tensão fornecendo tensão nominal (valor de pico por fase de 98,591 kV). A Figura 4.33 mostra uma parte parcial da curva de corrente de falta no domínio do tempo. Note-se que a falta ocorreu no instante 50 ms. O período transitório é caracterizado por curta duração, enfatizando-se apenas o intervalo que se estende por 0,6 ms. No instante imediatamente após a falta, a corrente é

alterada por uma componente de elevada frequência e amplitude. Em seguida, a amplitude é reduzida, sendo amortecida completamente ao final de 0,6 ms. Estas informações confirmam o que foi obtido a partir da característica da impedância equivalente. A corrente de falta apresenta baixa amplitude em regime permanente, porque não há carga sendo alimentada. Obviamente, com carga, o valor seria elevado bem como a corrente transitória. Resultado semelhante pode ser observado para a tensão do neutro. A Figura 4.34 ilustra este fato.

Efetuada aterramento com $R_n=X_n=100 \Omega$, tanto a componente transitória quanto a de regime permanente crescem consideravelmente. A corrente de falta para esta situação pode ser observada na Figura 4.35. O transitório (mostrado apenas como impulso no instante da falta) neste caso fica mais atenuado que no caso quando o neutro era isolado. O resultado indica que a corrente de falta em regime permanente aumenta e com isto também a corrente de neutro. As tensões nas fases a, b e c são mostradas na Figura 4.36. Nota-se considerável sobretensão em regime permanente nas fases sãs b e c. Durante o transitório, a fase c é bastante afetada, porque a falta ocorreu, para esta fase, em um máximo de tensão.

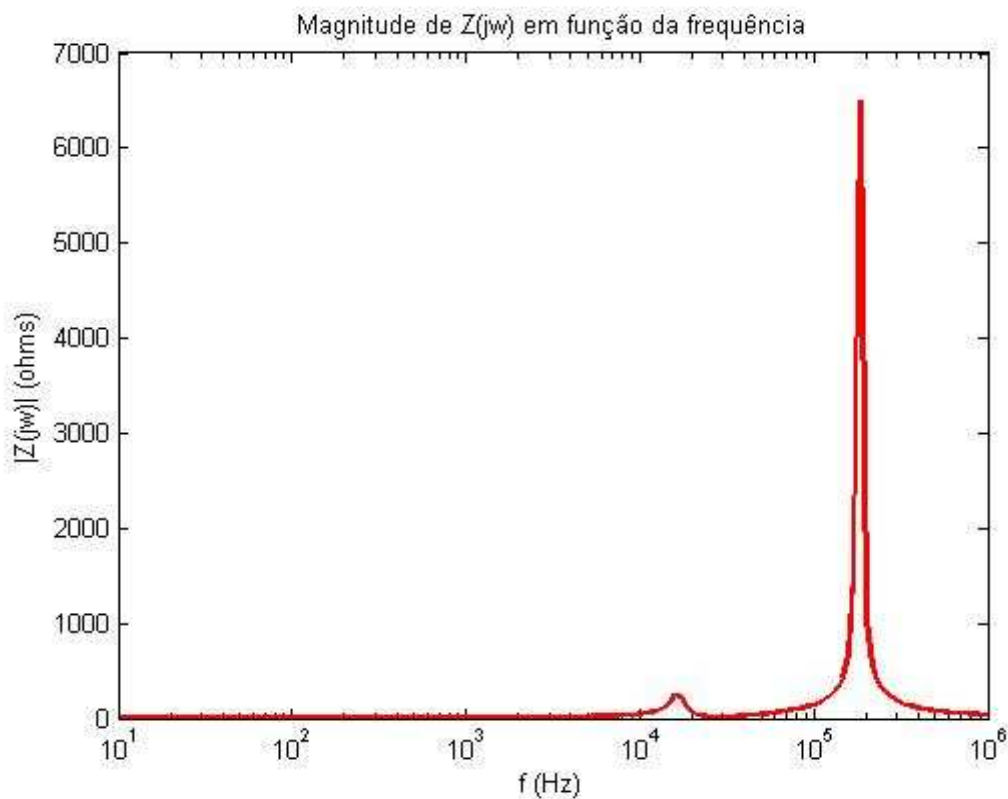


Figura 4.31 – Magnitude de $Z(jw)$.

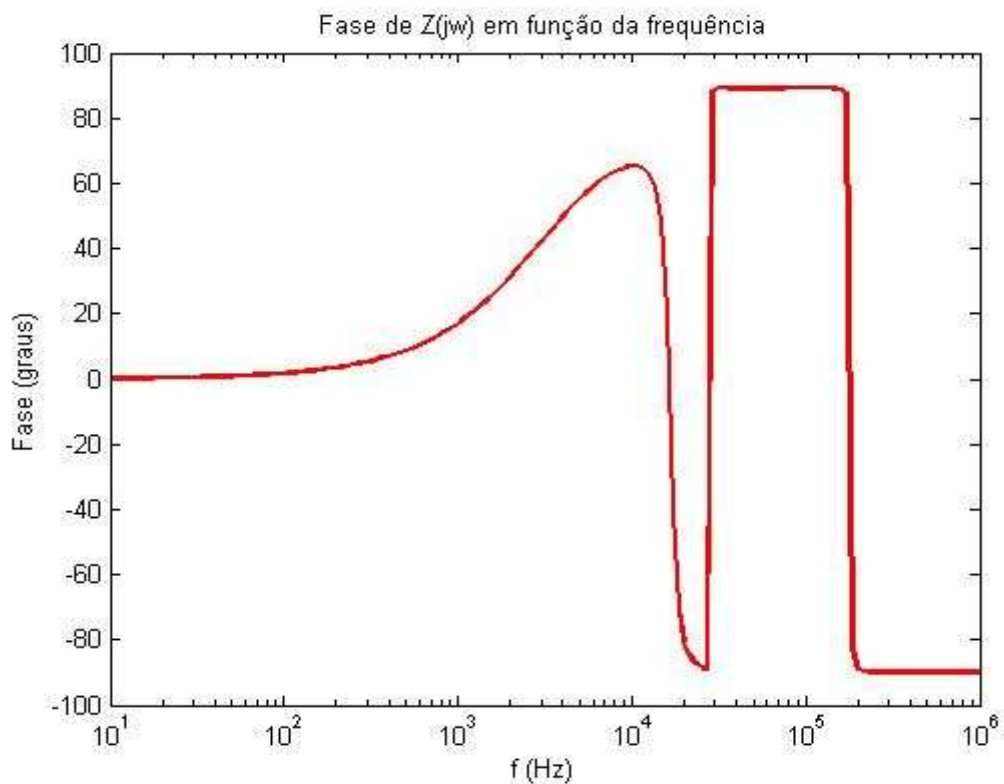


Figura 4.32 – Fase de $Z(j\omega)$.

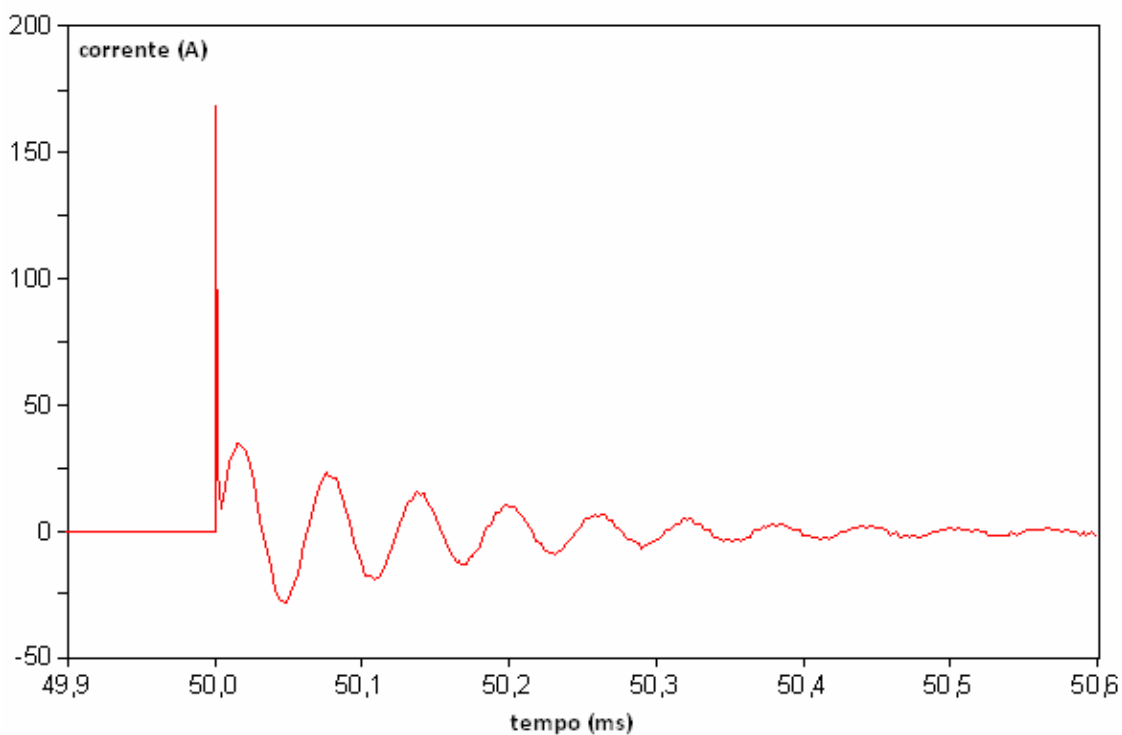


Figura 4.33 – Corrente de falta enfatizando as características transitórias dominantes em altas frequências.

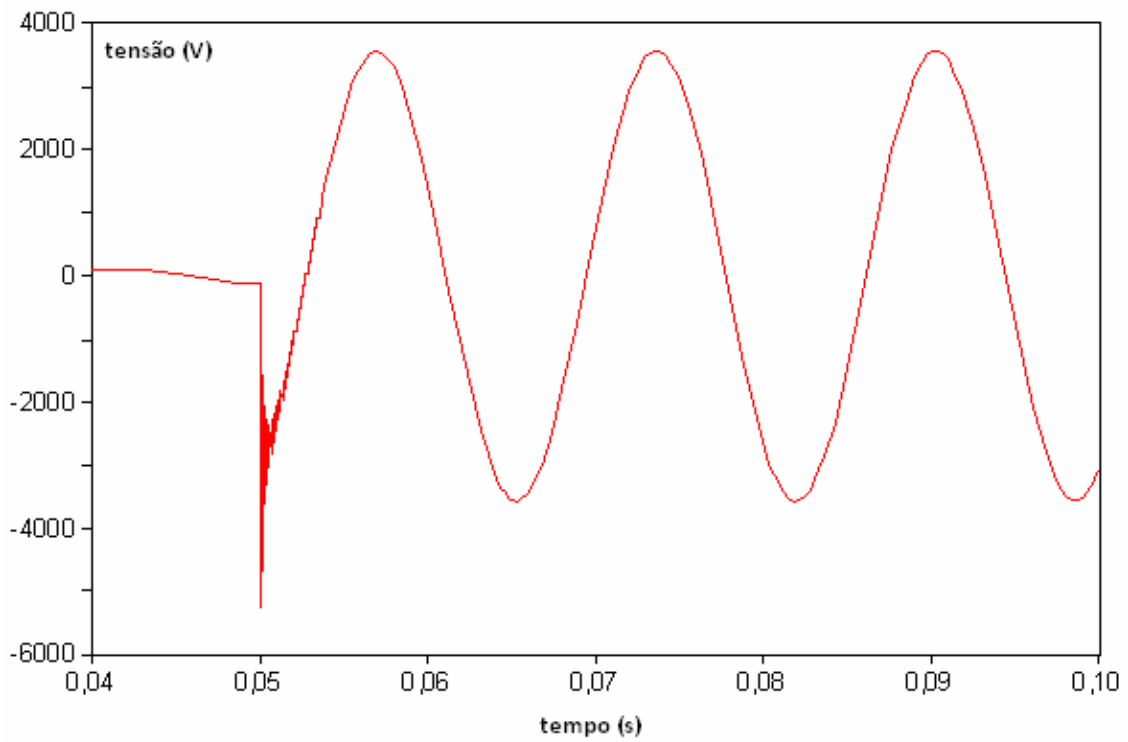


Figura 4.34 – Tensão no neutro.

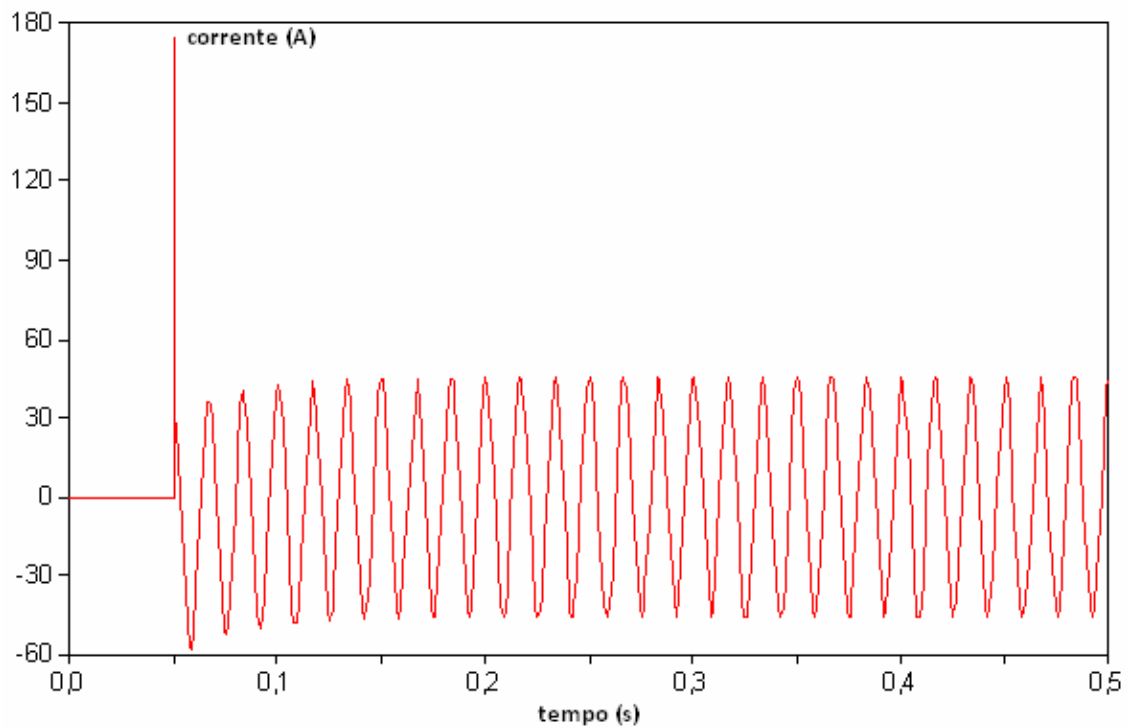


Figura 4.35 – Corrente de falta com valores de $R_n=X_n=100$ ohms.

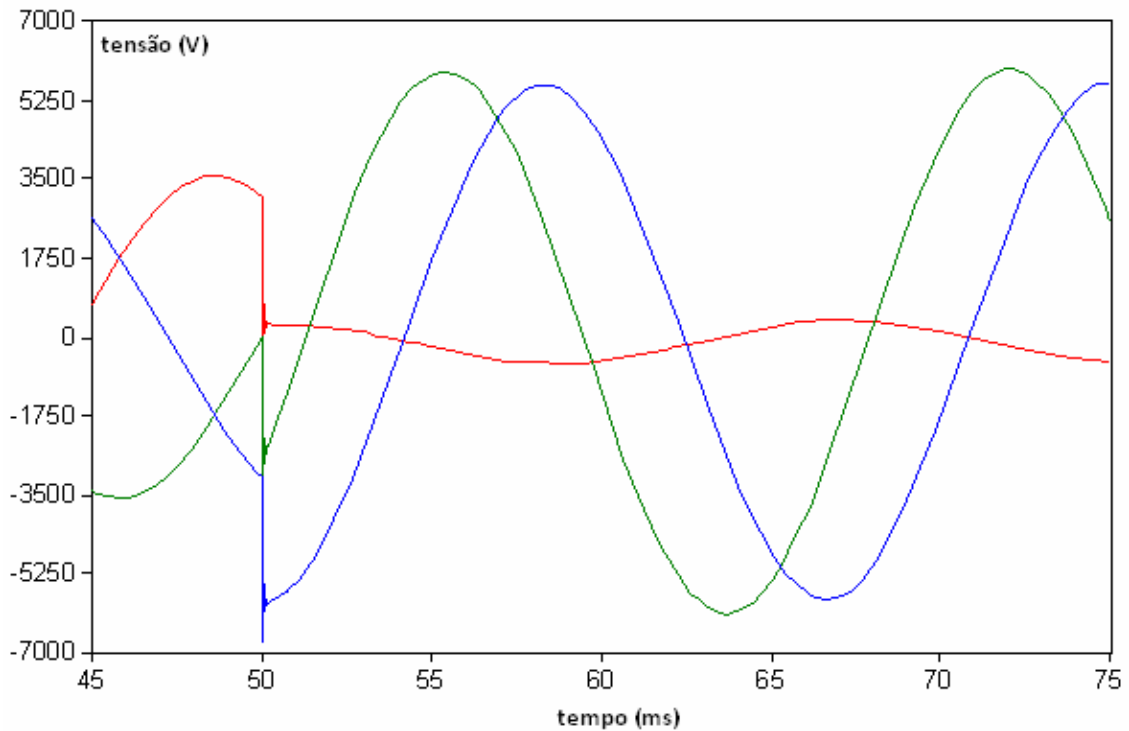


Figura 4.36 – Tensões resultantes no ponto de falta.

Observa-se então que a função da Bobina Supressora de Arco em sistemas desta natureza não traz resultados esperados, podendo o controle da corrente de neutro ser feito, de forma mais eficiente, por outro meio de aterramento convencional, como o mediante uso de resistor de aterramento, conforme mostrado no capítulo anterior.

4.3 SISTEMA COM ALIMENTADOR FORMADO POR CABOS COMPACTOS

4.3.1 – Descrição do sistema

As simulações que se seguem foram realizadas tomando-se como base o sistema descrito na Figura 4.37, retirado e adaptado de [44].

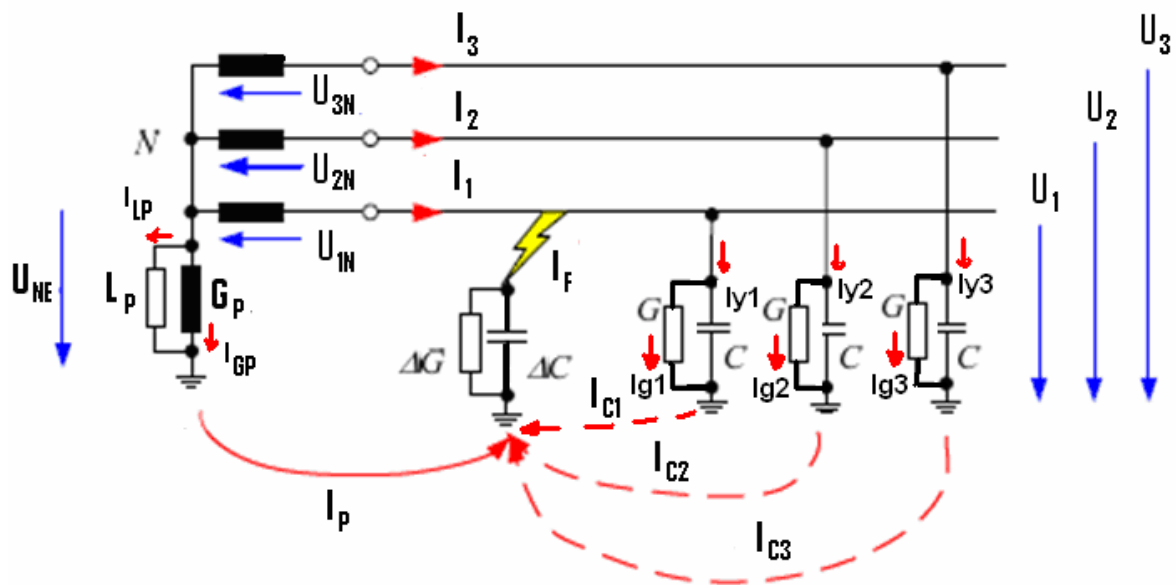


Figura 4.37 – Modelo equivalente de alimentador com “aterramento ressonante”.

onde U_{NE} é a tensão do neutro; L_P e G_P são a indutância e a condutância da bobina de Petersen; U_{1N} , U_{2N} , e U_{3N} são tensões representando uma fonte ideal de tensão senoidal; I_P é a corrente de neutro; I_1 , I_2 e I_3 são correntes de linha no alimentador; I_{C1} , I_{C2} e I_{C3} são correntes resultantes que passam pelos capacitores nas fase 1, 2 e 3 do alimentador mais as condutâncias nas mesmas fases. Mas, pelos capacitores as correntes são I_{y1} , I_{y2} e I_{y3} e pelas condutâncias I_{g1} , I_{g2} e I_{g3} . I_F é a corrente de falta; G é uma condutância e C é a capacitância do alimentador; U_1 , U_2 , e U_3 são tensões ao final do alimentador. ΔG e ΔC são incrementos da condutância e da capacitância respectivamente. Suponha que I_{LP} seja a corrente que passa pela bobina, I_{GP} seja a corrente que passa pela condutância que é ligada em paralelo à bobina e que a soma dessas duas componentes seja igual à corrente do neutro denotada por I_P . Note-se que uma carga resistiva pode ser simulada, para efeito de simplificação, atribuindo-se valores a G . A restrição imposta aqui ao se usar somente G ao invés de um outro valor de impedância, não invalida a metodologia apresentada na seqüência.

O sistema mostrado na Figura 4.37 é a representação simplificada de um alimentador constituído de cabos compactos. Assume-se que a resistência e a reatância são muito menores que os parâmetros capacitivos [44], sendo os mesmos desconsiderados. O equivalente do transformador é representado apenas pelos enrolamentos no lado em estrela, cujo neutro será o objeto da avaliação neste estudo. Estes enrolamentos, então, são substituídos por uma fonte equilibrada trifásica ideal com tensões U_{1N} , U_{2N} , e U_{3N} e com

frequência síncrona igual a 50 Hz. O alimentador utilizado tem tensão de linha nominal igual a 20 kV.

Nas simulações, desconsiderou-se o efeito de ΔC e fez-se ΔG o inverso da resistência de falta. Adaptação semelhante foi feita considerando-se uma carga resistiva, ao se fixar um determinado valor para o parâmetro G. Os dados considerados foram: além da frequência 50 Hz, susceptância capacitiva ($Y_C=2\pi fC$) igual a 4.330 μS , condutância relativa à carga resistiva igual a 200 μS , $U_{1N}=16330$ V de pico. Alguns valores de resistências de falta foram utilizados e mostrados mais adiante, conforme o caso simulado. Supôs-se que os parâmetros $R_n=1/G_p$ e $X_n=2\pi fL_p=1/B_p$ são variáveis que são calculadas, conforme o objetivo delineado para o ajuste da bobina.

4.3.2 Procedimento de ajuste da bobina de Petersen

O objetivo que se busca nas simulações é determinar os melhores ajustes de R_n e X_n da BP visando encontrar o ponto de ressonância na frequência do sistema. Para verificação do ponto de ressonância, as simulações foram realizadas no ATP, no domínio da frequência. Entende-se aqui como ajuste objetivando-se determinar o ponto de ressonância, o procedimento para calcular um valor para reatância X_n da bobina a fim de anular a parte capacitiva da corrente que circula no local de falta, em regime permanente. É o que se denomina aterramento ressonante. O objetivo que será seguido é *minimizar a intensidade* da corrente no local de falta. Evidentemente, ao se efetuar esse ajuste, outras variáveis deveriam ser monitoradas e controladas com a finalidade de atender determinados critérios.

Ao se variar os parâmetros R_n e X_n no neutro do transformador e verificar que é possível realizar a compensação da corrente capacitiva, através do controle da corrente do neutro, um passo inicial é avaliar como proceder aos cálculos de X_n e R_n . Um procedimento para se verificar isto é avaliar a resposta em frequência do sistema no neutro, calculando-se a admitância vista desse ponto, na frequência síncrona $\omega_0=2\pi f_0$. Este parâmetro nada mais é que a admitância de um circuito equivalente de Norton (poderia ser utilizado também um equivalente de Thévenin). A admitância e a fonte de corrente independente desse equivalente podem ser calculadas, abrindo-se o neutro e calculando-se a tensão fasorial, V_{oc} , neste ponto para a frequência síncrona. O outro cálculo necessário, é o da corrente de

curto-circuito no neutro, I_{sc} . Com estes fasores, determina-se a admitância $Y(j\omega_0)=G_0+jB_0=I_{sc}/V_{oc}$. A corrente I_{sc} é a própria corrente do equivalente de Norton, cuja fonte deve ser ligada em paralelo com a admitância.

No próximo passo, liga-se esse equivalente em paralelo à condutância do neutro e à susceptância da bobina, como mostrado na Figura 4.38.

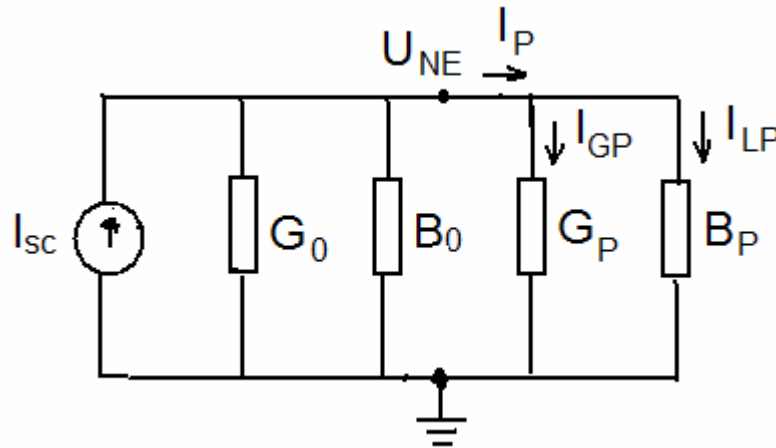


Figura 4.38 – Circuito equivalente de Norton no neutro do transformador

Como o circuito da Figura 4.38 é utilizado quando B_0 é capacitivo, então para que ocorra ressonância à frequência síncrona, $B_P=B_0$. Para esta condição, a corrente de neutro é $I_P=I_{GP}+I_{LP}$. A tensão no neutro está relacionada então por $(G_0+G_P)U_{NE} = I_{sc}$. Tendo em vista que G_0 é um valor conhecido, determinando-se a tensão no neutro, é possível calcular a variável G_P e assim obter-se o ajuste da bobina.

O parâmetro G_P é utilizado para limitar a corrente de falta. Sabendo-se que a componente de corrente I_{LP} que flui pela bobina é indutiva e sua contribuição visa eliminar as correntes capacitivas, então a componente da corrente de neutro I_P que efetivamente contribuirá para a falta será somente $I_{GP}=U_{NE}G_P$. Porém, além dessa componente, à corrente de falta deve ser acrescentada também a componente devido às condutâncias G . Esta componente pode ser calculada da seguinte forma

$$I_G = G(U_1 + U_2 + U_3) = 3GU_0 \quad (4.1)$$

onde U_0 é a componente de sequência zero das tensões de fase onde está conectado G à terra.

No ponto de falta resulta então, considerando ressonância, a seguinte equação de balanço de corrente:

$$I_G + I_{GP} + I_F = 0 \quad \Rightarrow \quad I_F = -(I_G + I_{GP}) \quad (4.2)$$

Supondo que a componente I_G pode ser estimada, então fixando-se a corrente I_F em um valor máximo, determina-se a corrente I_{GP} . Uma forma mais direta é desconsiderar o efeito de I_G . Neste caso, ao ser fixado o limite superior de I_F , calcula-se I_{GP} como igual a este limite, a menos do sinal. Este último procedimento resulta ser mais simples, apesar da componente I_G precisar ser avaliada na simulação após os ajustes. Evidentemente, haverá uma diferença entre I_F e I_{GP} , que ao final deverá ser igual a I_G . Na situação limite em que $G=0$, $I_F=-I_{GP}$.

Dado que I_{GP} foi utilizado para limitação da corrente de falta, este valor também corresponde a

$$I_{GP}=U_{NE}G_P=I_{\max} \quad (4.3)$$

onde I_{\max} deve ser fixado para limitar a corrente de falta.

No circuito da Figura 4.38, quando $B_P=B_0$, a tensão no neutro pode ser calculada através da expressão $G_P U_{NE} + G_0 U_{NE} = I_{sc}$. Tendo em vista que as condutâncias têm fase nula, conclui-se que a fase da tensão de neutro tem que ser igual à fase da corrente I_{sc} . Logo, na expressão, podem ser consideradas apenas as magnitudes de U_{NE} e I_{sc} . Diante deste fato, utilizando (4.3) e a condição de ressonância no circuito da Figura 4.38, verifica-se que

$$G_P U_{NE} + G_0 U_{NE} = I_{sc} \quad \Rightarrow \quad U_{NE} = \frac{I_{sc} - G_P U_{NE}}{G_0} = \frac{I_{sc} - I_{\max}}{G_0} \quad (4.4)$$

Deste modo, U_{NE} tem módulo calculado por (4.4) e ângulo igual ao de I_{sc} . Consequentemente, o parâmetro G_P poderá ser calculado como:

$$G_P = \frac{I_{GP}}{U_{NE}} \quad (4.5)$$

Como no ajuste dos parâmetros priorizou-se a determinação de X_n no ponto de ressonância, para cancelamento da parcela capacitiva da corrente de falta, e que o outro objetivo foi a limitação da corrente de falta, a tensão do neutro é função desses ajustes.

4.3.3 Simulações realizadas

A seguir são mostrados resultados de testes realizados considerando o sistema apresentado no sub-item 4.3.2.

As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram os resultados para alguns ajustes efetuados para a bobina de Petersen. A primeira tabela apresenta as tensões de circuito-aberto U_{NEoc} resultante no neutro; a corrente de aterramento sólido no neutro, representando a corrente de curto-circuito do equivalente de Norton, I_{Psc} . A admitância equivalente à frequência síncrona é calculada através de $Y(j\omega_0) = I_{Psc}/U_{NEoc}$. As duas últimas colunas da Tabela 4.2 mostram resultados obtidos referentes aos parâmetros do ajuste. Foram consideradas quatro situações, as quais foram criadas a partir de supostas variações na resistência de falta, compreendendo os valores 10, 100, 500 e 1000 Ω . Para todas as simulações considerou-se o valor de $G=1/5000$ S. A tensão de circuito-aberto no neutro foi computada, realizando-se simulação do sistema e atribuindo-se valores elevados para R_n e X_n no ATP (utilizou-se o valor 10^9 para ambas as variáveis). Procedimento similar foi seguido para calcular a corrente de curto-circuito no neutro. Porém, neste caso, utilizou-se o valor 10^{-3} . Uma vez determinada a reatância X_n , fixou-se a corrente $I_{GP} = G_p U_{NE}$ de modo a limitar a corrente de falta, tendo em mente que outra parcela relativa às condutâncias G também deverá contribuir para o aumento da referida corrente de falta. Em todos os casos simulados, limitou-se então $G_p U_{NE}$ de modo que esta corrente não ultrapassasse 5 A. Com este resultado e os demais parâmetros do circuito equivalente mostrado na Figura 4.38, foi possível calcular a tensão U_{NE} do neutro. Com esta variável determinada, calculou-se G_p e R_n . Estes parâmetros foram então utilizados no ATP para confirmação do ajuste das grandezas calculadas a partir do circuito equivalente. Os cálculos foram realizados no Matlab e verificados em seguida no ATP. A Tabela 4.3 mostra os valores calculados pelos dois aplicativos. O cálculo da corrente de falta no Matlab foi feito somente após conhecimento das tensões de fase (no ATP), a fim de que pudesse ser feito o cálculo da tensão de sequência zero e assim determinar a parcela de corrente $3GV_0$.

Tabela 4.2 – Parâmetros do equivalente de Norton e do ajuste da bobina.

$R_f(\Omega)$	$U_{NEoc}(V)$	$I_{Psc}(A)$	$Y(j\omega_0) (S)$	$X_n(\Omega)$	$R_n(\Omega)$
10	16098 -67,39°	1633 -60°	0,1014 7,39	76,67	3.241,6
100	9739,9 -140,79°	163,3 -60°	0,0168 50,79	76,98	2.987,1
500	2465,3 -138,68°	32,66 -60°	0,0132 78,68	76,98	2.127,4
1.000	1247,7 -142,98°	16,33 -60°	0,0131 82,98	76,98	1.416,6

Tabela 4.3 – Grandezas calculadas considerando o ajuste

Matlab	$R_f(\Omega)$	$U_{NE}(V)$	$I_{GP}(A)$	$I_{LP}(A)$	$I_F(A)$
	10	16183 -60°	5 -60°	211,1 -150°	14,7 120°
	100	14935 -60°	5 -60°	194,1 -150°	13,96 120°
	500	10637 -60°	5 -60°	138,2 -150°	11,38 120°
	1.000	7083 -60°	5 -60°	92,0 -150°	9,25 120°
ATP	$R_f(\Omega)$	$U_{NE}(V)$	$I_{GP}(A)$	$I_{LP}(A)$	$I_F(A)$
	10	16183 -60°	5 -60°	211,1 -150°	14,7 120°
	100	14934 -60°	5 -60°	194,1 -150°	13,96 120°
	500	10638 -60°	5 -60°	138,2 -150°	11,38 120°
	1000	7082 -60°	5 -60°	92,0 -150°	9,25 120°

A partir da Tabela 4.2, observa-se que a reatância da bobina de Petersen é pouco sensível à resistência de falta, para a faixa de valores investigados. Por outro lado, a resistência de aterramento acompanha as variações estudadas. Possivelmente, em situações de operação na qual a carga seja representada de outra forma, sendo composta também por reatância, a variação de X_n seja evidenciada. Esta situação não foi avaliada nesta dissertação.

As grandezas calculadas e mostradas na Tabela 4.3 são semelhantes, tanto pelo cálculo efetuado via Matlab, quanto no ATP. Este resultado comprova que o ajuste da bobina de Petersen utilizando equivalente de Norton é adequado para a determinação dos parâmetros para o ajuste.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 – CONCLUSÕES GERAIS

As experiências das várias concessionárias citadas ao longo desta dissertação mostram a eficiência da aplicação da bobina de Petersen e os resultados alcançados quando da aplicação do seu princípio em circuitos simplificados. Mostram também que este sistema de aterramento de neutro é eficiente para o objetivo proposto para linhas aéreas, sendo uma alternativa importante no sistema elétrico para se obter uma qualidade de fornecimento melhor, com melhor aproveitamento de equipamentos.

Sabe-se que 80% das faltas à terra em linhas aéreas são temporárias, mas provocam a abertura dos disjuntores e a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Levando-se em conta que o aterramento ressonante permite a auto-extinção do arco em 80% das faltas temporárias à terra, conclui-se que mais de 60% das faltas à terra nas linhas aéreas são eliminadas sem a abertura do disjuntor.

Em circuitos subterrâneos o desempenho não é tão bom uma vez que os danos à isolação do cabo são geralmente definitivos. Isto por causa das características dos cabos, em geral, de altas capacitâncias. Mostrou-se que a utilização da bobina de Petersen é altamente eficiente neste tipo de sistema, contribuindo para eliminar a parcela de corrente capacitiva que ocorre durante uma falta.

Vários fabricantes têm desenvolvido equipamentos que utilizam o princípio da bobina de Petersen. Estes sistemas com neutro compensado com alta impedância, pela redução da corrente de falta, requerem dispositivos de proteção de alta confiabilidade e seletividade, o que não acontece com os sistemas com neutro com baixa impedância de neutro.

Nesta dissertação, abordaram-se os diferentes tipos de aterramento do neutro, sendo realizadas numerosas simulações para demonstrar a influência deste procedimento, quando se utiliza somente resistores de aterramento ou apenas bobina de Petersen. Este último mecanismo mostrou-se bastante adequado para limitação da corrente de falta em alimentadores com elevadas capacitâncias.

Foram apresentados resultados de projetos bem sucedidos de empresas que utilizam bobinas de Petersen no mundo, sendo estes resultados indicativos da eficácia do equipamento.

Foi mostrado que para o caso de alimentadores com elevadas capacitâncias, o ajuste da bobina pode ser feito utilizando um circuito simplificado. Neste trabalho, optou-se por realizá-lo utilizando o ATP e o Matlab, pois são ferramentas computacionais mais abrangentes, que, por outro lado, têm capacidade para lidar com sistemas mais complexos, como aqueles dotados de alimentadores desequilibrados, com acoplamentos mútuos tanto de capacitâncias como de indutâncias, carga etc.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas referentes à utilização da bobina de Petersen merecem destaque e deverão ser objeto de mais estudos de tal forma a permitir um desenvolvimento maior e maior aplicabilidade:

- Controle automático da indutância da bobina de Petersen;
- Aplicação da bobina de Petersen nas fases de circuito de transmissão/distribuição para limitação da corrente de falta não envolvendo a terra;
- Métodos de ajuste que contemple desequilíbrio da rede elétrica;
- Estudo abrangendo o ajuste simultâneo de várias bobinas em diferentes transformadores de um mesmo sistema de distribuição.

O projeto e a modelagem de dispositivos limitadores de corrente consistindo de um circuito eletromagnético de núcleo de ferro e armadura com entreferro ajustável merece atenção. Tal dispositivo com corrente de carga tem uma impedância mínima à frequência industrial. Durante as condições de falta, a corrente é utilizada para fornecer a força necessária para mudar a indutância à máxima impedância. Há dois métodos principais para ajuste da indutância da bobina nestas condições:

- a) Por operação de chaveamento da bobina, onde espiras ou seções são conectadas ou desconectadas;

- b) Através da continua variação da relutância do circuito magnético via mecanismo motorizado.

Tendo em vista que o controle da bobina de Petersen pode ser feito alterando-se sua relutância e monitorando a tensão neutro-terra, tal tarefa depende da detecção da mudança da configuração do sistema e do ajuste do ponto de ressonância para um valor pré-definido com sub ou sobre-compensação. Assim, seria interessante a aplicação deste princípio a um sistema de distribuição complexo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alsthom Publication R6554A Contents – Application Notes KCEU 142,242 - Application Of Sensitive Earth Fault Relays To Petersen Coil Earthed And Insulated Power Systems – Application Notes, 1998.
- [2] Nortroll - Intelligent Directional Fault Current Indicator For 6-132 kV Overhead Lines – Product News, 2001.
- [3] Gernot Druml and Andreas Kugi - Control Of Petersen Coils – IEEE XI International Symposium On Theoretical Electrical Engineering, 2001.
- [4] Re-Evaluation Of Protection Philosophies For Medium Voltage 20 kV Distribution Grid.
- [5] Jozéf Lorenc, Poznan University Of Technology (Poland), Jerzy Andruszkiewicz - Limiting The Danger Electric Current Shock In Relation To The Mean Of Neutral Point Earthing In The MV Networks – Power Distribution Co. – Poland, 1999.
- [6] Seppo Hanninen & Matt Lehtonen - Earth Fault Distance Computation With Fundamental Frequency Signals Based On Measurements In Substation Supply Bay – VTT Tiedotteita – Research Notes 2153 – Technical Editing Marja Kettunen – Otamedia Oy, ESPOO, 2002.
- [7] Alberto Cerreti, Giorgio Di Lembo e Giovanni Valtorta - Aumento Da Continuidade com Bobinas De Petersen e Automação na Rede De Média Tensão – Enel Distribuzione Spa (Itália) – Revista Distribuição, 2006.
- [8] Earthfault Protection System Electronic Components – Trench – Catalogue, 2000.
- [9] Earth Fault Protection – Compensated Networks – Trench – Catalogue, 2000
- [10] ZamoraI, Mazon A.J. - Experience of neutral resonant system implantation in Gorliz substation – 17ª International Conference on Electricity Distribution, 2003.

- [11] Marco Bronzini, Pasquale Pugliesi - Messa a terra del neutro nelle reti a MT mediante bobina Petersen e power quality – Convegno A.E.I. su “Evoluzione della rete in MT per il miglioramento della qualità del servizio – Bari, 2001 .
- [12] Trench (Austria) - Earthfault Protection System EPSY – Catalogue, 2007.
- [13] T. Henriksen, A. Petterteig - Detection of earth in a médium voltage distribution network – International Conference on Power Systems Transients, Lyon, France, 2007.
- [14] Ouis Chaari, Michel Meunier - Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 3, 1996.
- [15] Siemens - Earth-fault Protection in a Resonant Earthed System – Siemens PTD EA – Application for SIPROTEC Protection Relays, 2005.
- [16] Schneider Electric – Basic selection of MV public distribution networks- Cahier technique n° 203, 2001.
- [17] L.C. Zanetti Jr., M. Pereira - Limitation of Line Fault Currents with the UPFC – International Conference on Power Systems Transients, in Lyon, France, 2007.
- [18] Normann Fische, Daqing Hou - Methods For Detecting Ground Faults in Medium-Voltage Distribution Power Systems – Schweitzer Engineering Laboratories Paper, 2006.
- [19] XiangJun Zeng, Xianggen Yin, Deshu Chen - A Novel Technique for Measuring Grounding Capacitance and Grounding Fault Resistance in Ineffectively Grounded Systems – IEEE Power Engineering Review, March, 2001.
- [20] Marco Bronzini, Rossela Dalessandro, Pasquale Pugliesi - Security, safety e power quality nei sistemi industriali a media tensione: possibili vantaggi dell’ esercizio con neutro a terra con bobina Petersen Detection of earth in a medium voltage distribution network – Convegno Scientifico Nazionale – “Sicurezza nei sistemi

complessi”, Bari, Ottobre, 2003.

- [21] Jeff Roberts, Dr. Hector J. Altuve e Dr. Daqing Hou - Análise dos métodos de proteção contra faltas à terra nos sistemas da distribuição aterrados, não aterrados e compensados - . Schweitzer Engineering Laboratories, Inc – SEL, 2001

- [22] Germont Druml André as Kugi, Bodo Parr - Control of Petersen Coils – XI International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, August, 2001.

- [23] Emad S. Ibrhim - Electromagnetic Fault Current Limiter – Electric Power Systems Research 42, 1997.

- [24] Seppo Hanninen – VTT - Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks – Technical Research Centre of Finland – ESPOO,2001.

- [25] Witold Hoppel, Josef Lorenc - Limiting the danger of electric current shock in relation to the mean of neutral point earthing in the MV Networks - Poznan University of Technology, ul. Piotrowo 3a, Poznan, Poland, 1998.

- [26] Trench - Earth-Fault Compensation Controller EFC20/EFC20i – Catalogue, 2005.

- [27] Trench - Neutral Earthing Aggregates – Catalogue, 2003.

- [28] Trench - Arc Suppression Coils – Catalogue, 2005.

- [29] V. Meerovich, V. Sokolovsky - Experimental study of a transformer with superconducting elements for fault current limitation and energy redistribution Physics Department, Ben-Gurion University of the Negev, Ber-Sheva, Israel, 2001-2004 .

- [30] C. Neumann, J. Bock, Huth - Three phase resistive fault current limiter – impact on system design, 2004.

- [31] Hyongku Kang, Min Cheo Ahn, Hyung Jin Kim - Design and Cooling Characteristics

Results of Cryogenic System for 6.6 kV/200A – Inductive Fault Current Limiter, 2004.

- [32] H. Schmidt, J. Amon, D. Braun - Fault Current Limiters – Application, Principles and Experience, CIGRE SC A3 & B3 – Joint Colloquium in Tokyo, 2005.
- [33] Khosru Mohammad Salim, Tsutomu Hoshino - Preliminary Experiments on Saturated Dc Reactor Type Fault Current Limiter, Prep. Of MT-17, Geneva, Switzerland 24-28, September, 2001.
- [34] High Fault Currents, Queensland Government, 2003.
- [35] G. Tang, M. R. Iravani - Application of a Fault Current Limiter to Minimize Distributed Generation Impact on Coordination Relay Protection, International Conference on Power Systems Transients in Montreal, Canada, June 2005.
- [36] M. S. Hibbert, Connell Wagner - Analysis of Unexpected Fault Current Limiter Operation using EMT Programs, 2005.
- [37] Trench - Variable Shunt Reactors for Reactive Power Compensation – Catalogue, 2006.
- [38] William H. Kersting - Distribution System Modeling and Analysis – New Mexico State University – New Mexico 2001.
- [39] Módulo 8 do PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – ANEEL, 2005.
- [40] K.M. Winter, “Swedish Distribution Networks a New Method for Earthfault Protection in Cable and Overhead Systems”, Proceedings of the Fifth International Conference on Developments in Power System Protection – DPSP’93, Reino Unido, IEEE Conference Publication N° 368, PP. 268-270, 1993.

- [41] V. Leitloff, L. Pierrat e R. Feuillet - “Study of the Neutral to Ground Voltage in a Compensated Power System”, European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol. 4, n°2, PP. 145-153, 1994.
- [42] IEEE 13 Node Test Feeder - Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000
- [43] Alternative Transient Program, ATPDRAW tool Release 5.1, 2007
- [44] Eberle Gmbh & CoKG - “Petersen Coil Controller REG-DPA with Optional Current Injection: REG-DPA Operating Manual”, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A
Dados do IEEE 13 Node Test Feeder[42]

Tabela A.1: Dados da configuração com cabo subterrâneo:

Configuração	Faseamento	Cabo	Neutro	Espaço ID
606	A B C N	250,000 AA, CN	None	515
607	A N	1/0 AA, TS	1/0 Cu	520

Tabela A.2: Dados da configuração com linha aérea:

Configuração	Faseamento	Cabo	Neutro	Espaço ID
		ACSR	ACSR	
601	B A C N	556,500 26/7	4 /0 6/1	500
602	C A B N	4/0 6/1	4 /0 6/1	500
603	C B N	1/0	1/0	505
604	A C N	1/0	1/0	505
605	C N	1/0	1/0	510

Tabela A.3: Dados do trecho de linha

Nó A	Nó B	Comprimento (pés)	Configuração
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Tabela A.4: Dados do capacitor

Nó	Fase A	Fase B	Fase C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

Tabela A.5: Dados do regulador

Regulador ID	1		
Trecho de Linha	650-632		
Localização	650		
Fases	A-B-C		
Conexão	Trifásica		
Monitoramento de fase	A-B-C		
	2.0 Volts		
Relação do Transf. Potencial	20		
Relação do Transf. Corrente Primário	700		
Ajustes Compensação	Fase A	Fase B	Fase C
R-Ajuste	3	3	3
X-Ajuste	9	9	9
Nível de Tensão	122	122	122

Tabela A.6: Dados do transformador

	kVA	kV-Alta	kV-Baixa	R%	X%
Subestação	5,000	115-D	4.16 Gr Y	1	8
XFM-1	500	4.16-Gr W	0.48-Gr W	1.1	2

Tabela A.7: Dados da carga concentrada

Nó	Carga	Fase 1	Fase 1	Fase 2	Fase 2	Fase 3	Fase 3
	Tipo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-1	0	0	0	0	170	151
611	Y-1	0	0	0	0	170	80
	Total	1158	606	973	627	1135	753

Tabela A.8: Dados da carga distribuída

Nó A	Nó B	Carga	Fase 1	Fase 1	Fase 2	Fase 2	Fase 3	Fase 3
		Tipo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

APÊNDICE B

Simulações complementares para avaliação do sistema de aterramento por resistor de neutro

Na Figura B1 são apresentadas as tensões, quando o neutro é isolado e a resistência de falta é igual a 100Ω . A Figura B2 mostra as correntes resultantes para esta situação.

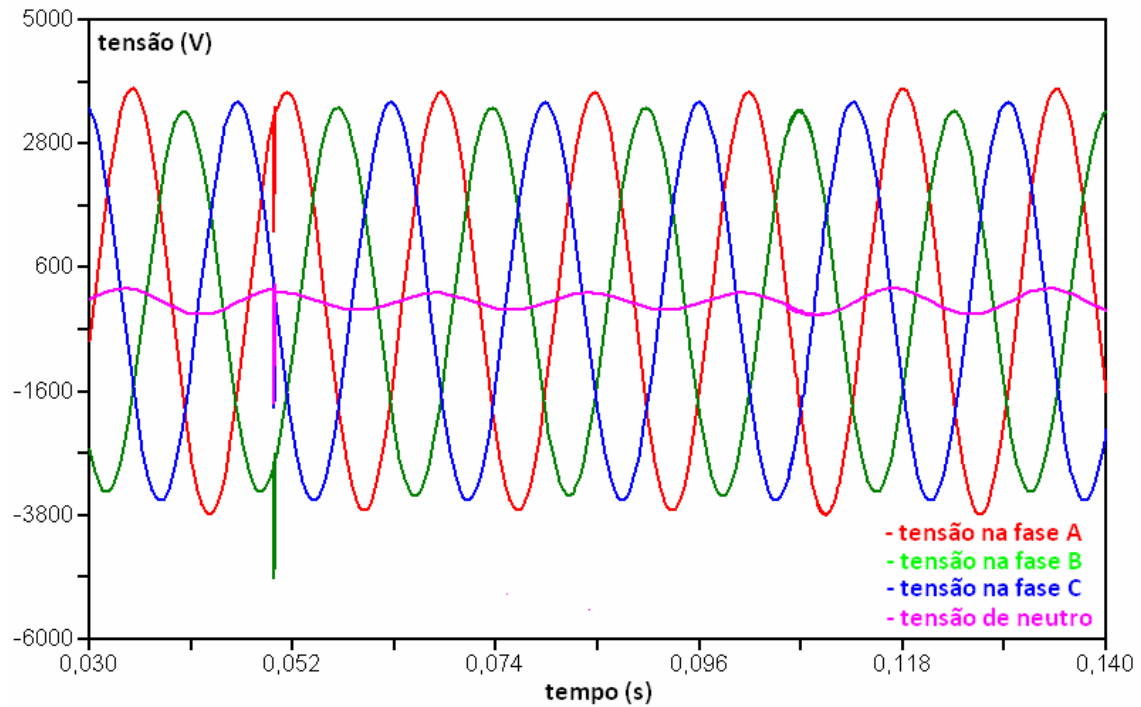


Figura B1 – Curvas das tensões - neutro isolado - resistência de falta $R_f=100 \Omega$ - falta na fase A

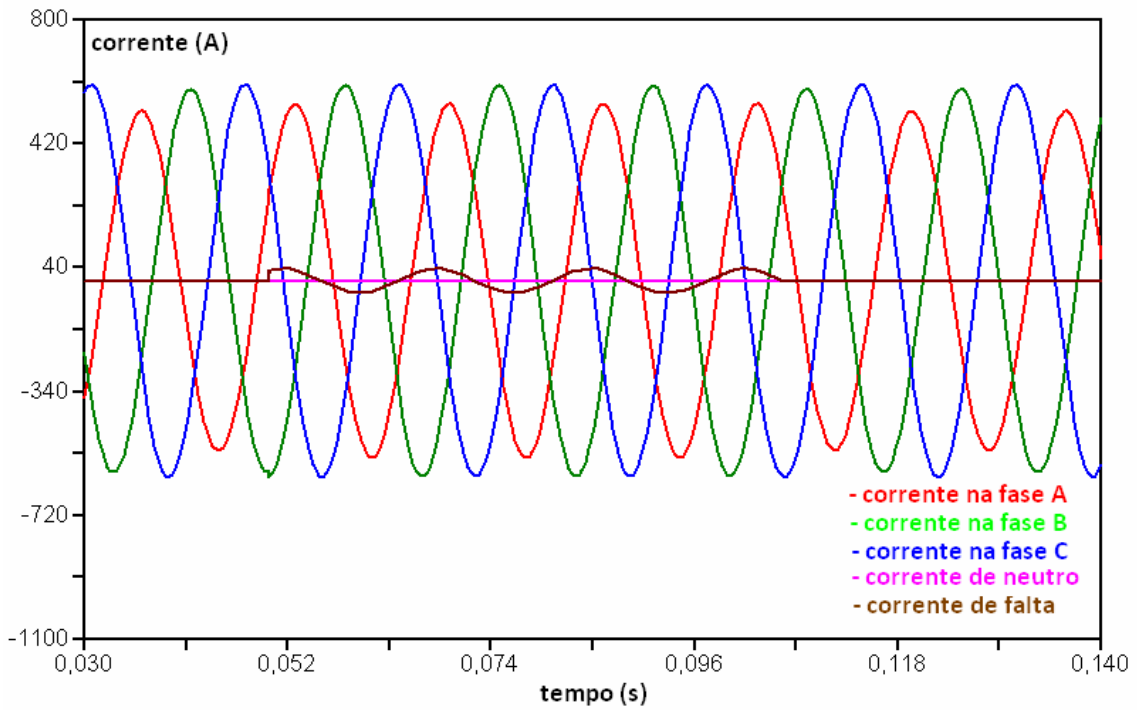


Figura B2 – Curvas das correntes - neutro isolado - resistência de falta $R_f=100 \Omega$ - falta na fase A

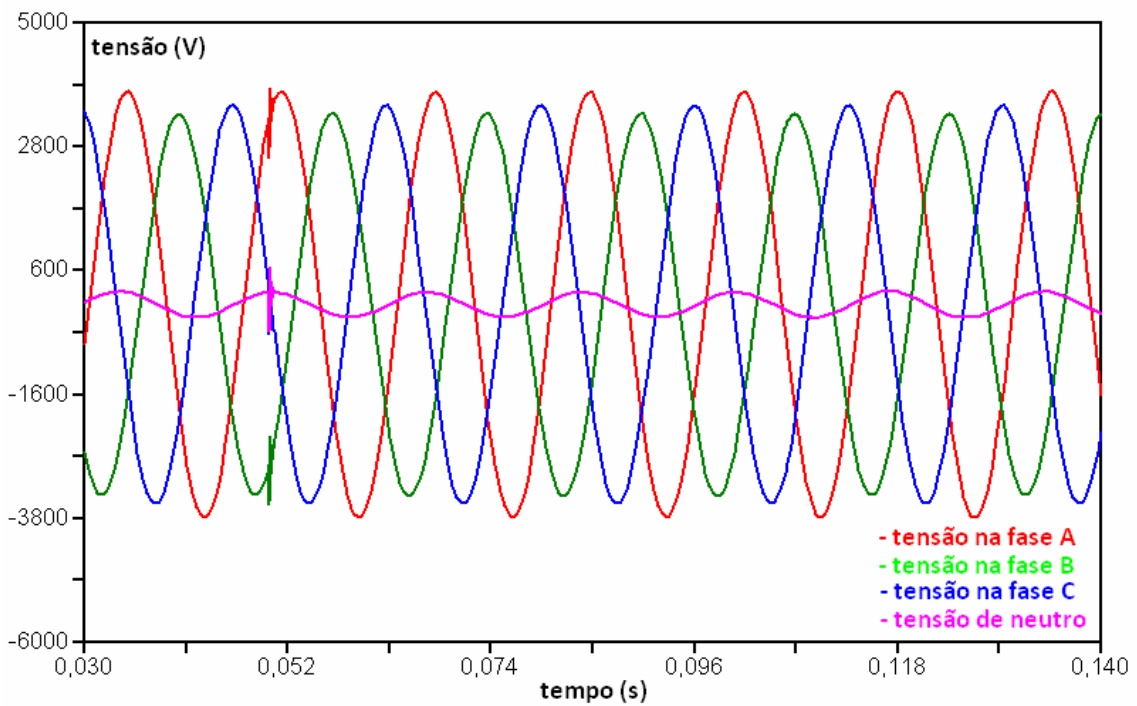


Figura B3 – Curvas das tensões - neutro isolado - resistência de falta $R_f=500 \Omega$ - falta na fase A

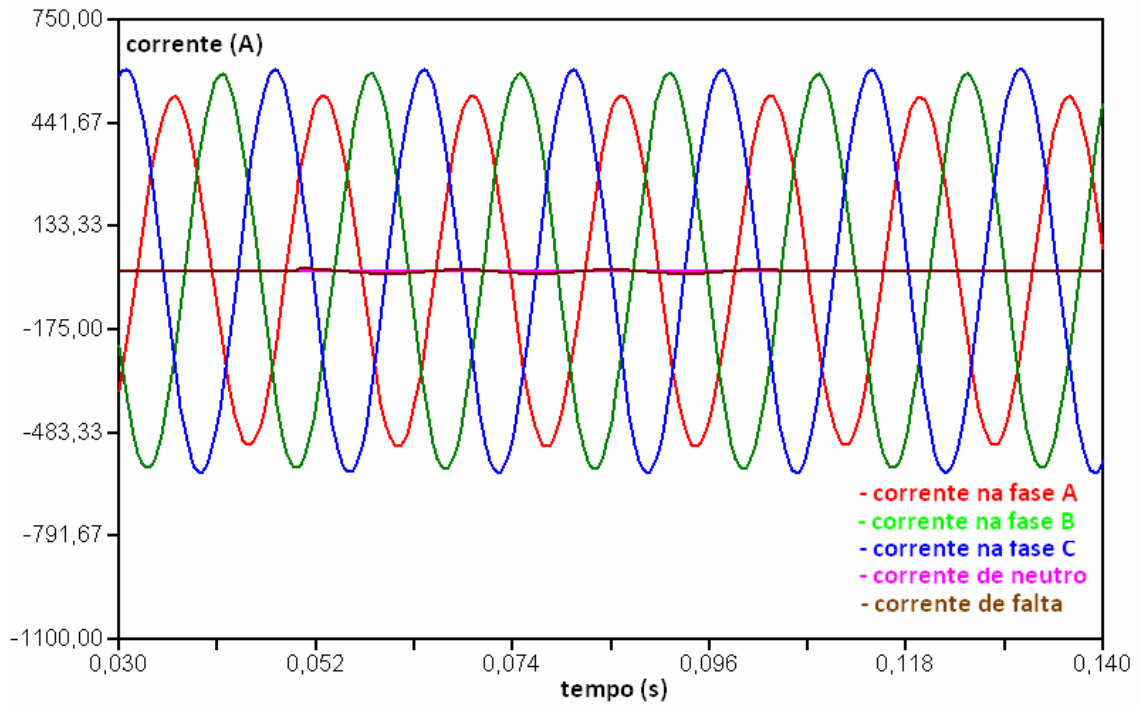


Figura B4 – Curvas das correntes - neutro isolado - resistência de falta $R_f = 500 \Omega$ - falta na fase A

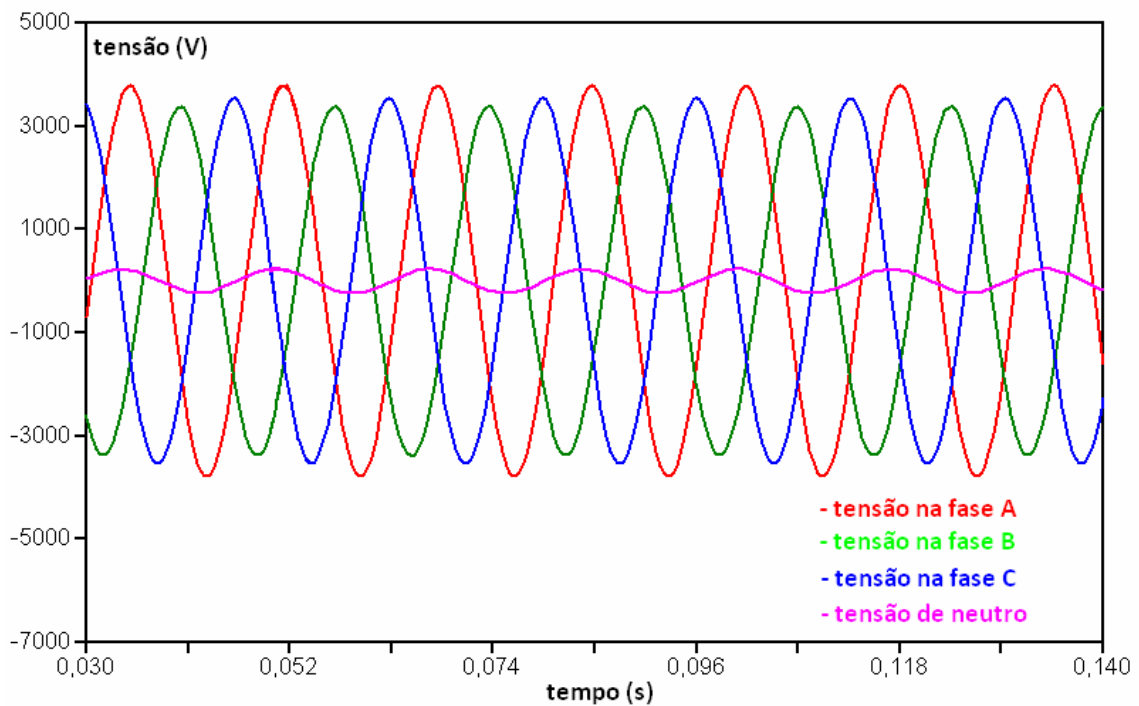


Figura B5 – Curvas das tensões - neutro isolado - resistência de falta $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ - falta na fase A

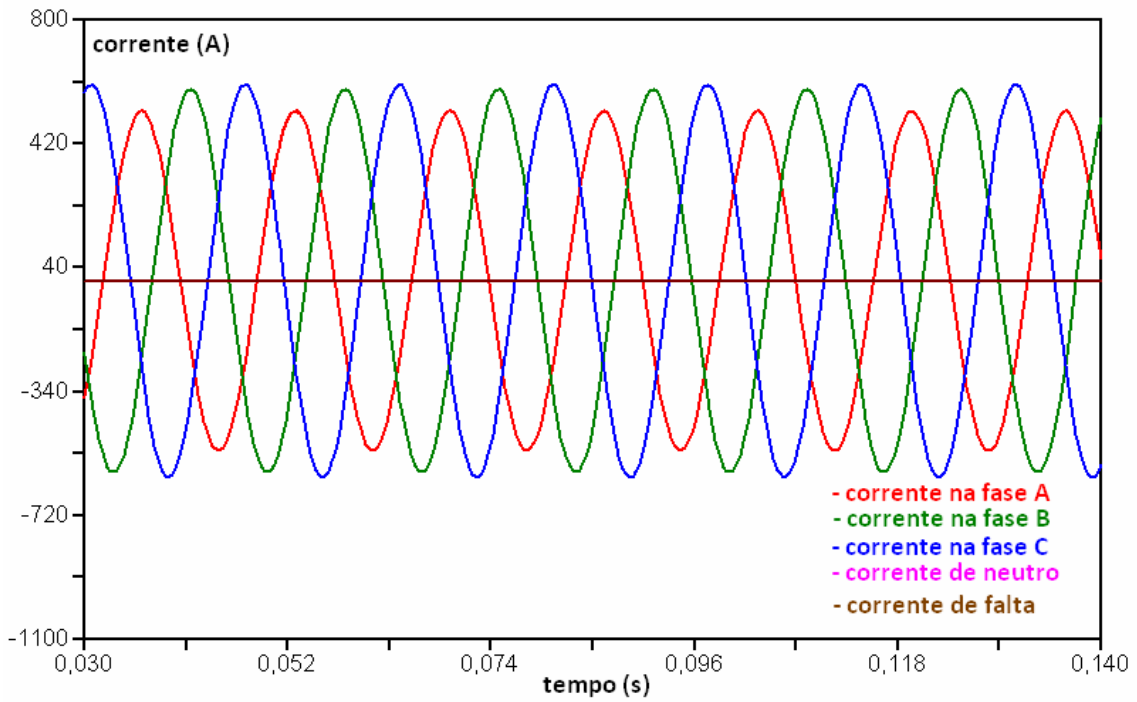


Figura B6 – Curvas das correntes - neutro isolado - resistência de falta $R_f=10\text{ k}\Omega$ - falta na fase A

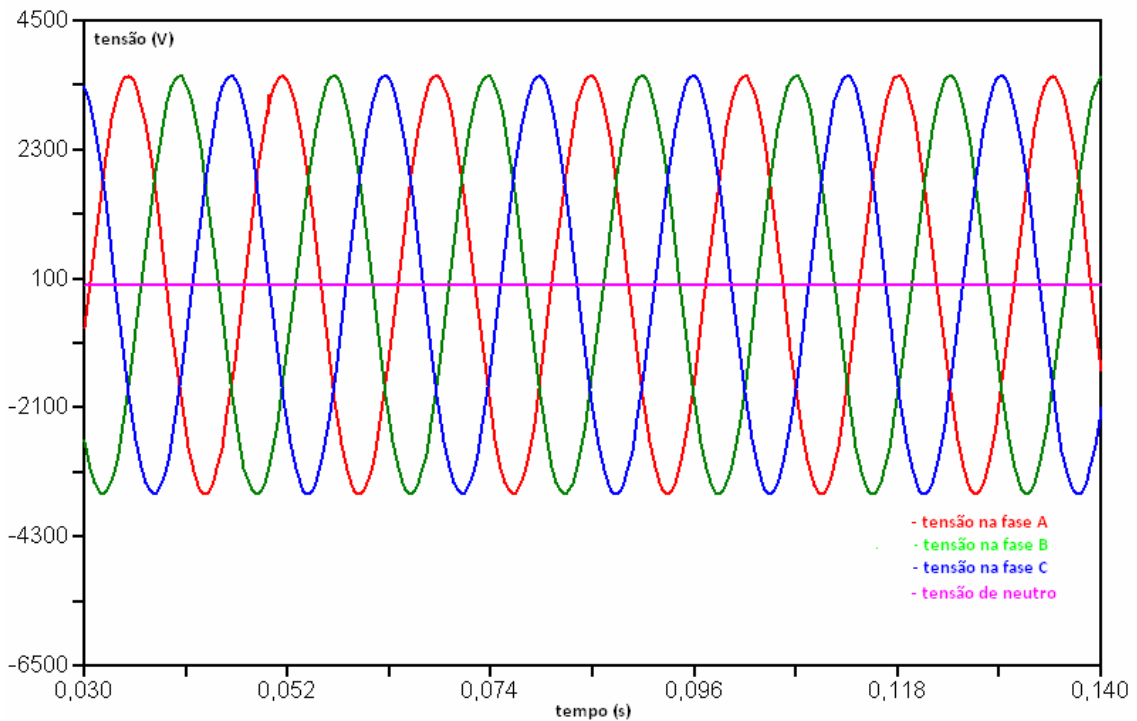


Figura B7 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f=100\ \Omega$ - falta na fase A

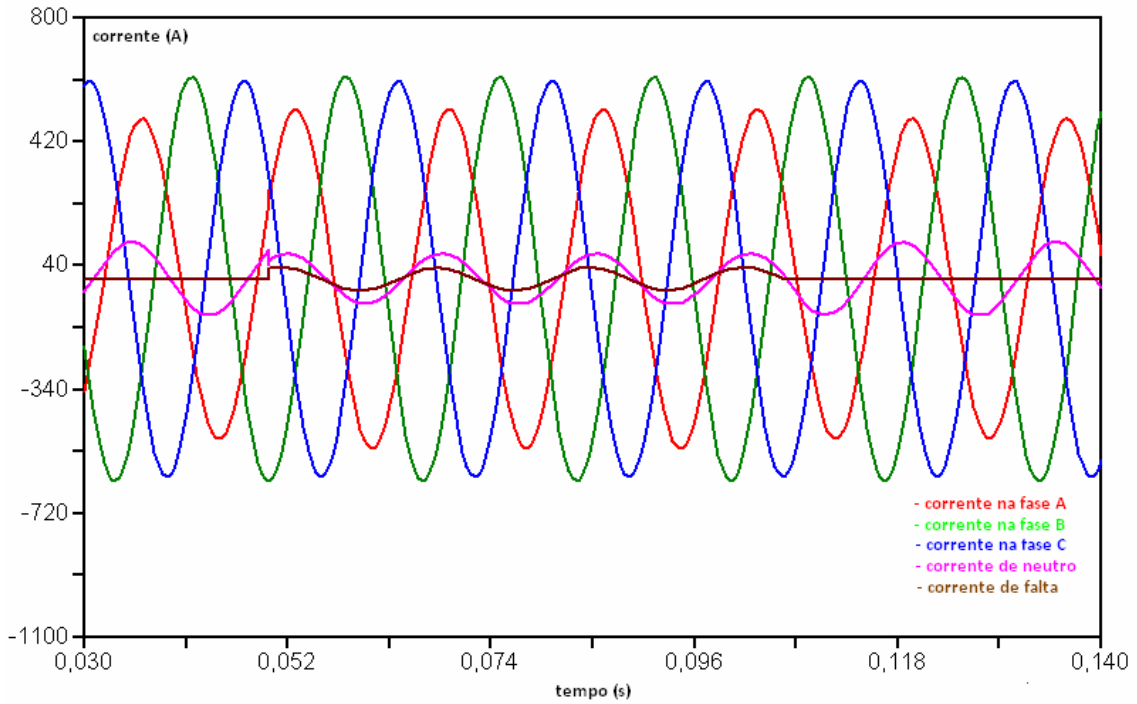


Figura B8 – Curvas das correntes – neutro solidamente aterrado – resistência de falta $R_f 100\Omega$ – falta na fase A

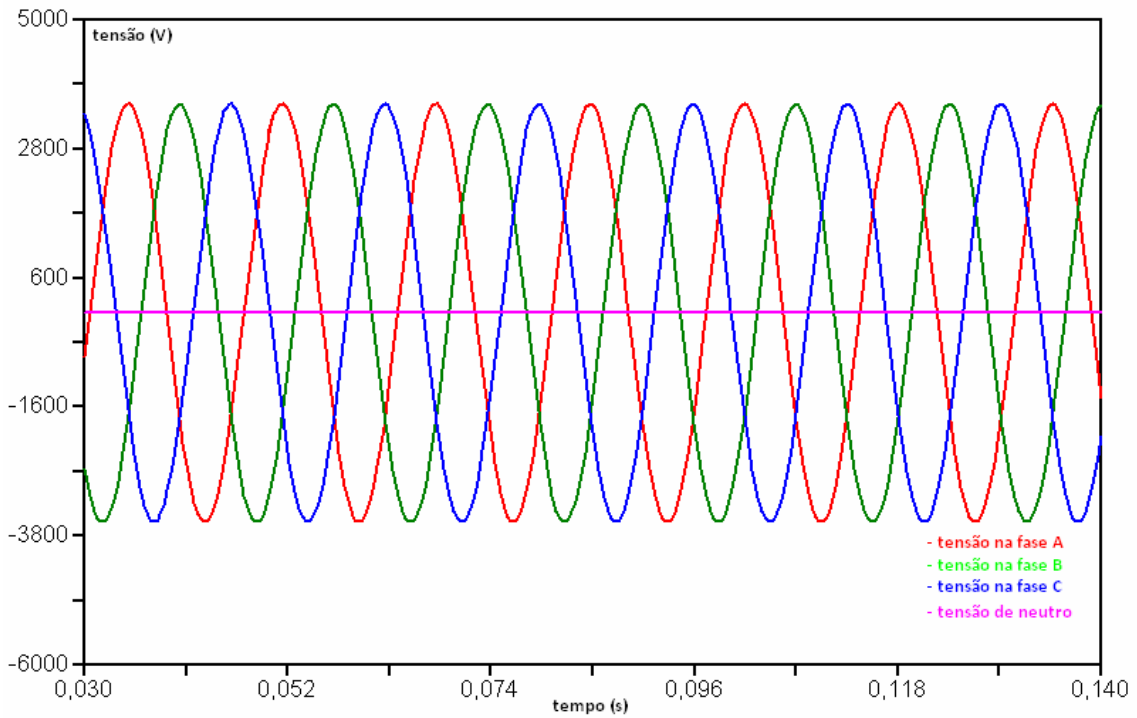


Figura B9 – Curvas das tensões – neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 500 \Omega$ - falta na fase A

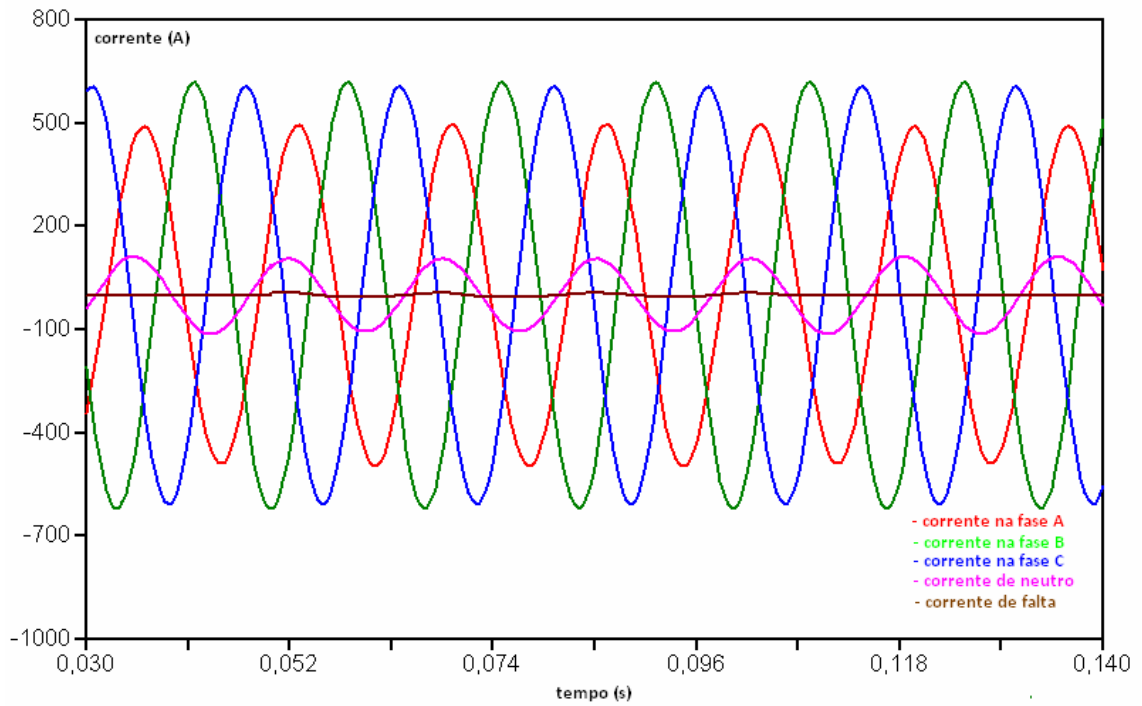


Figura B10 – Curvas das correntes - neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 500 \Omega$ - falta na fase A

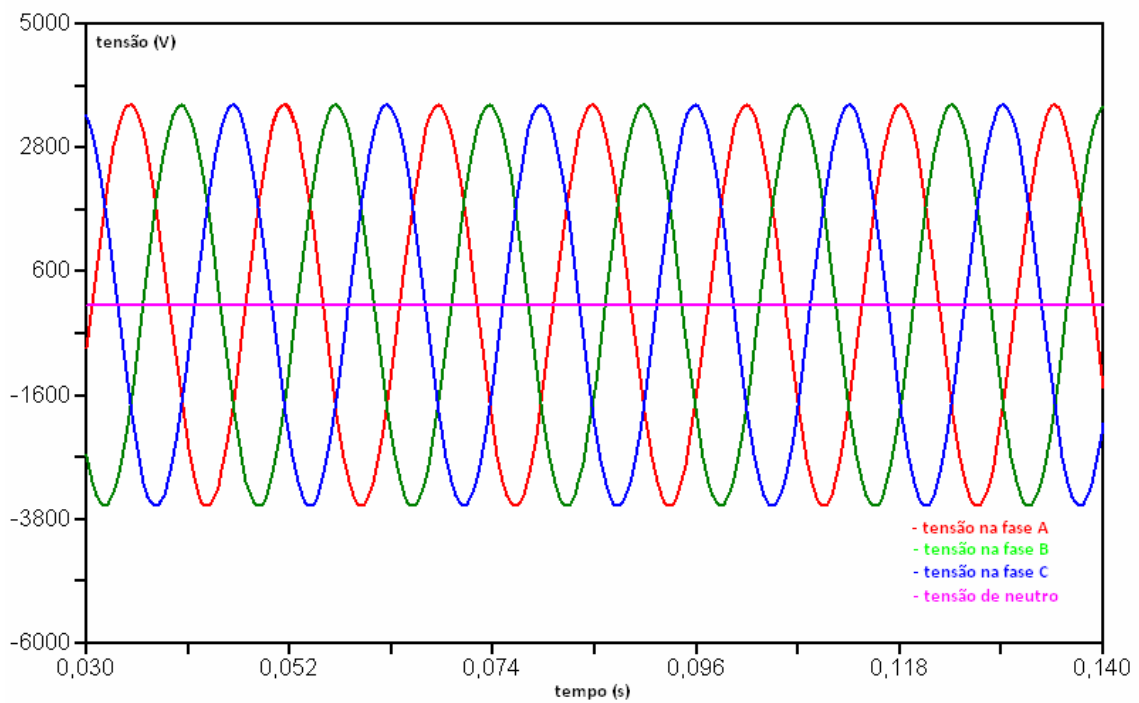


Figura B11 – Curvas das tensões - neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ - falta na fase A

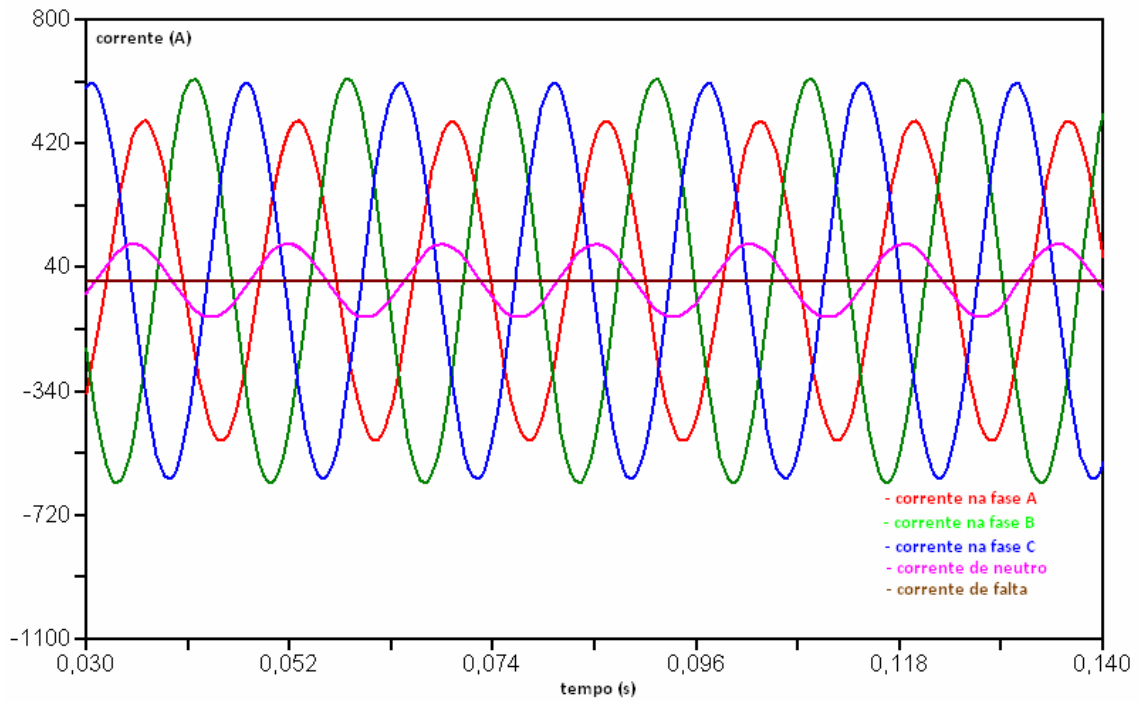


Figura B12 – Curvas das correntes - neutro solidamente aterrado - resistência de falta $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ - falta na fase A

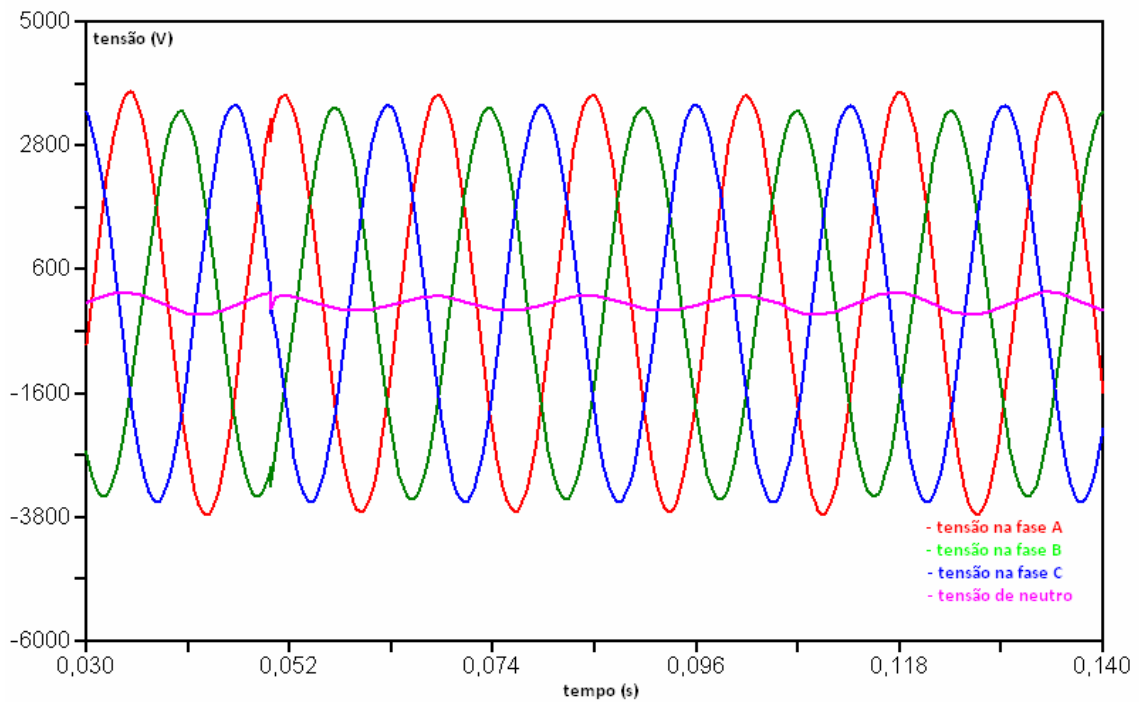


Figura B13 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n = 10 \Omega$ - resistência de falta $R_f = 100 \Omega$ - falta na fase A

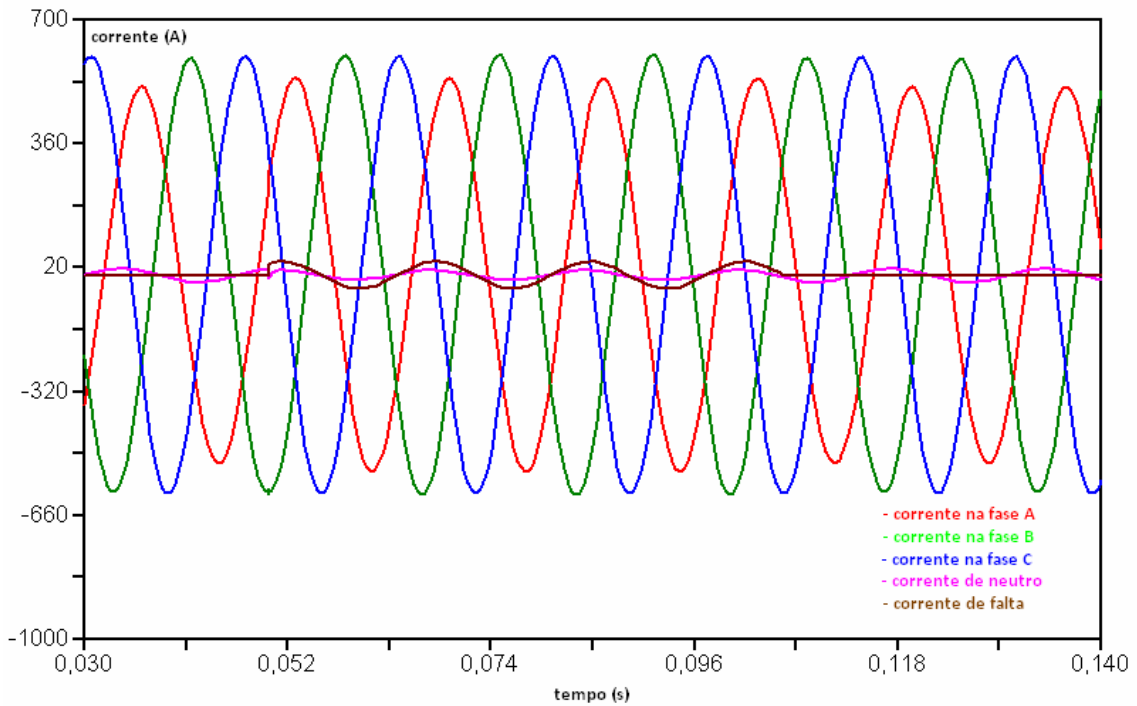


Figura B14 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 100\Omega$ - falta na fase A

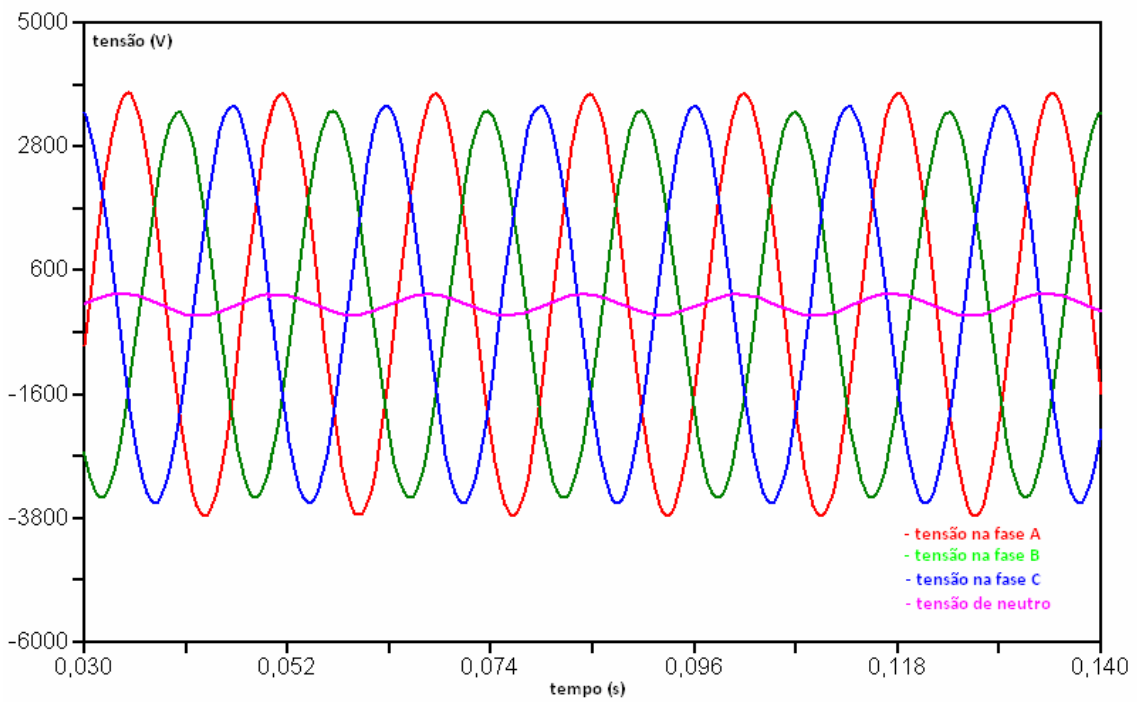


Figura B15 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 500\Omega$ - falta na fase A

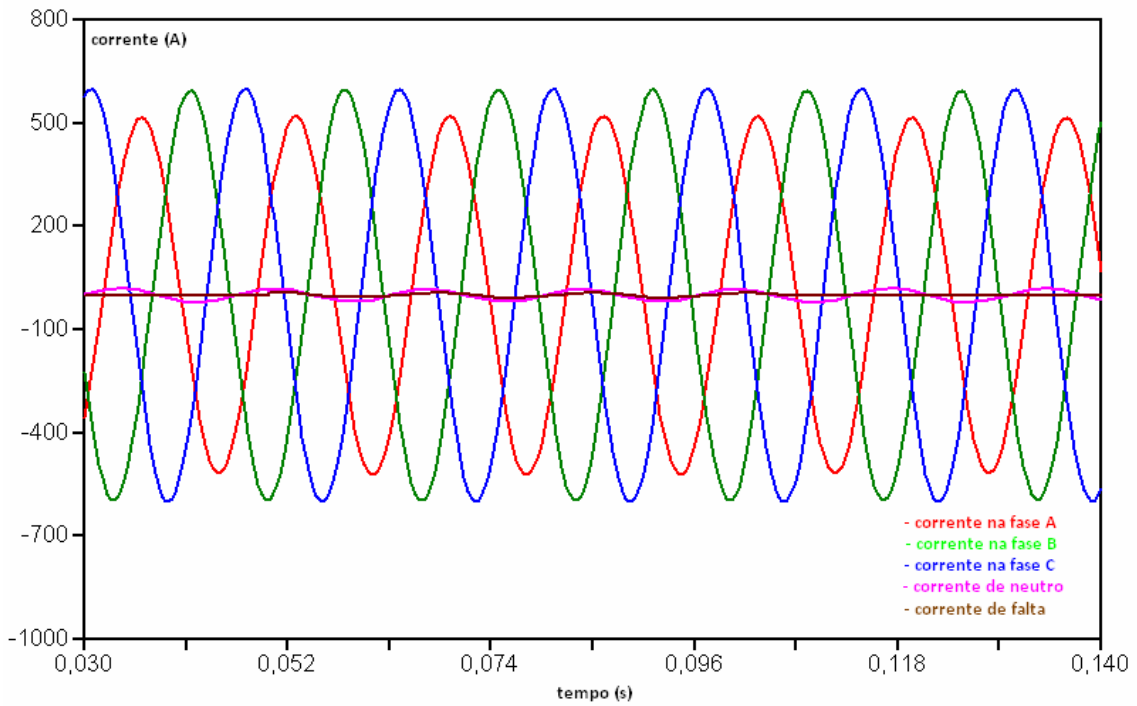


Figura B16 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 500\Omega$ - falta na fase A

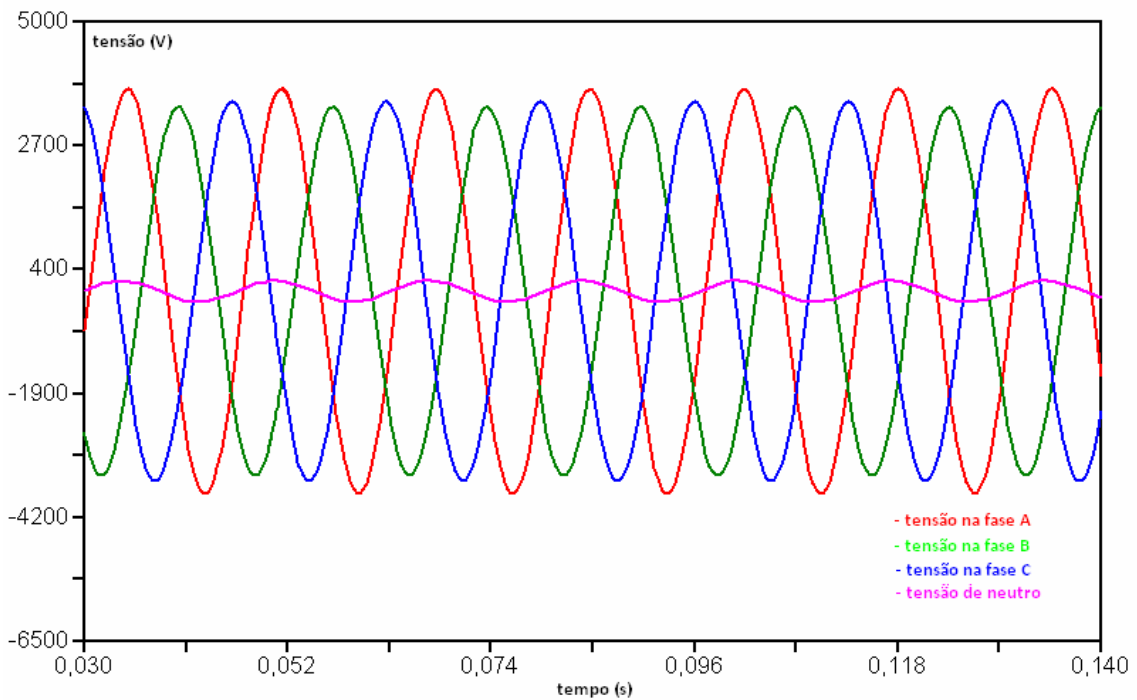


Figura B17 – Curvas das tensões – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ - falta na fase A

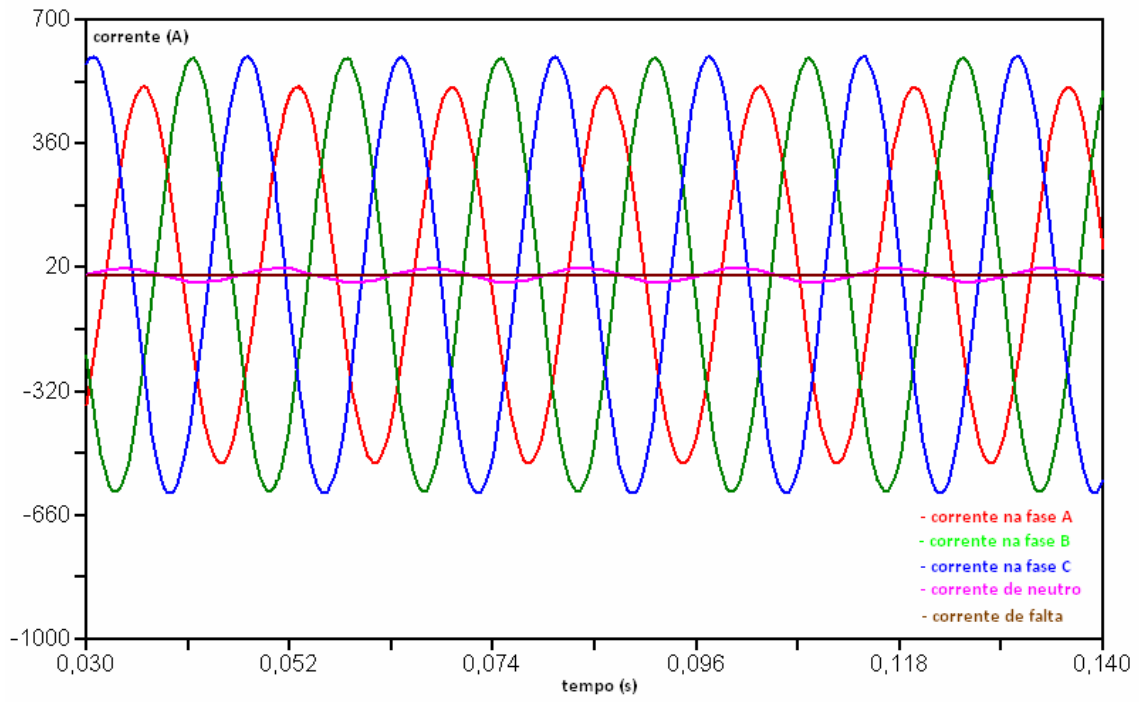


Figura B18 – Curvas das correntes – neutro aterrado $R_n = 10\Omega$ - resistência de falta $R_f = 10k\Omega$ - falta na fase A

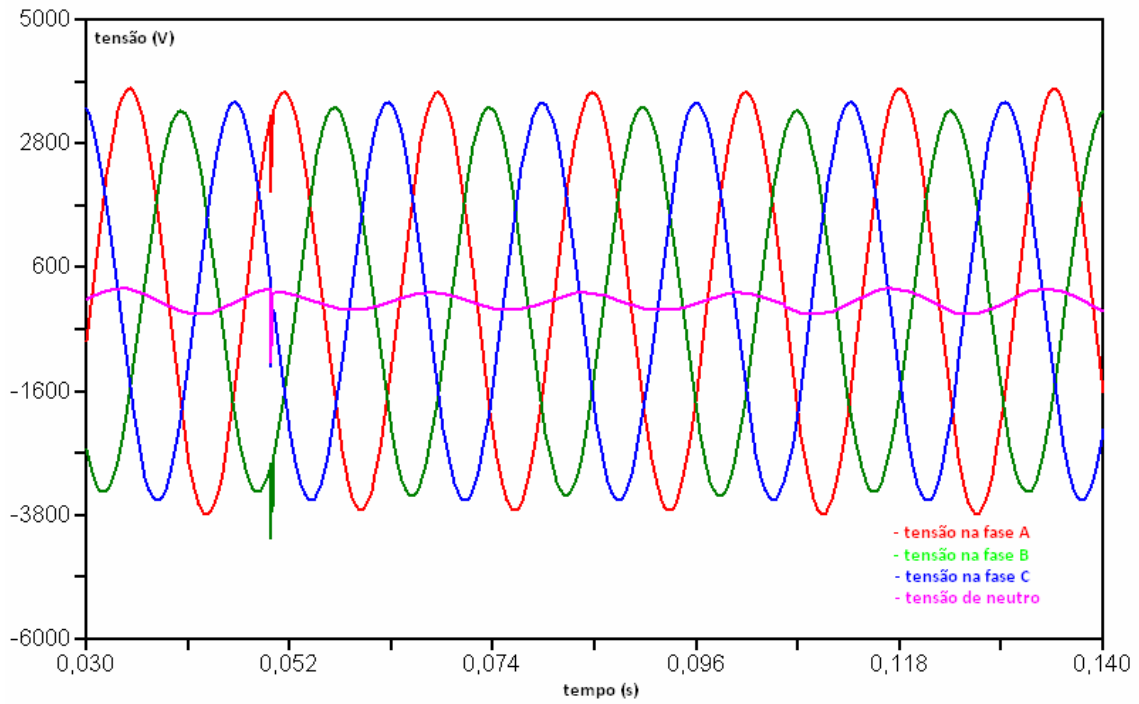


Figura B19 – Curvas das tensões - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=100\Omega$ - falta na fase A

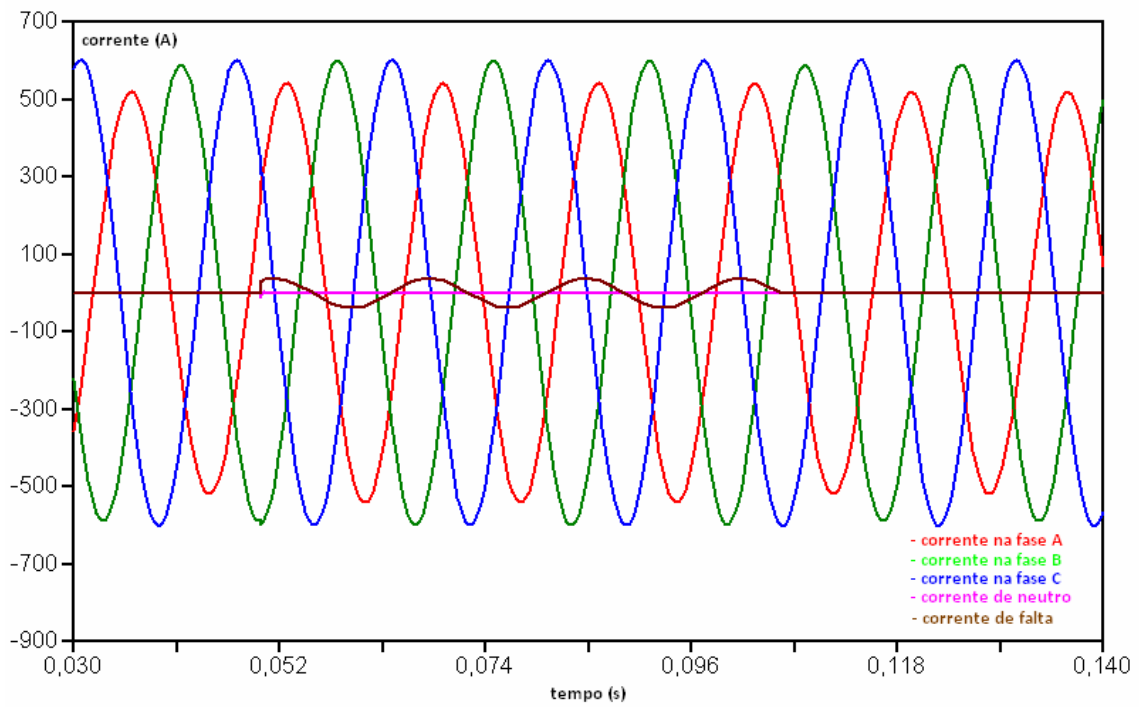


Figura B20 – Curvas das correntes - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=100\Omega$ - falta na fase A

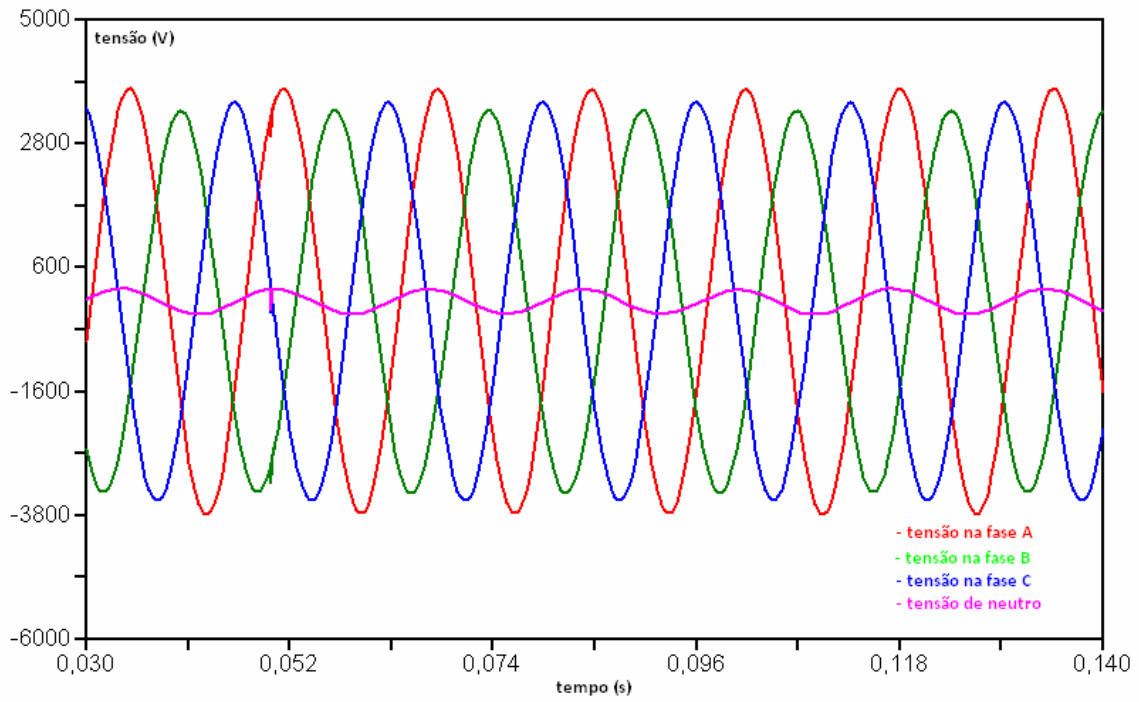


Figura B21 – Curvas das tensões - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=500\Omega$ - falta na fase A

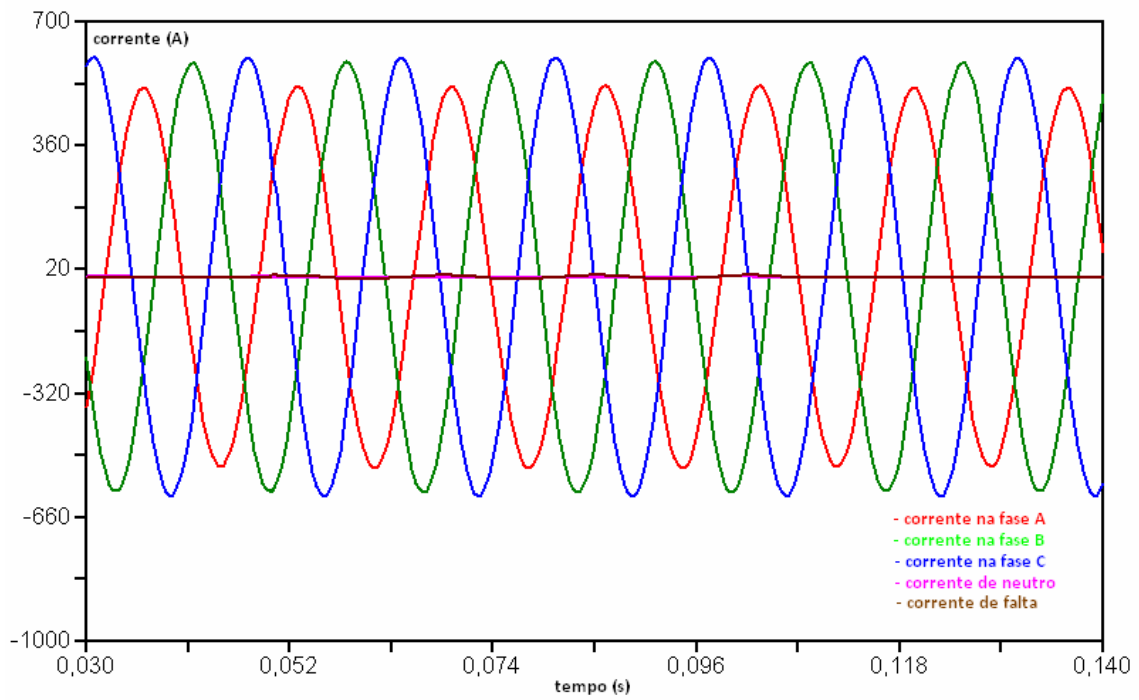


Figura B22 – Curvas das correntes - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=500\Omega$ - falta na fase A

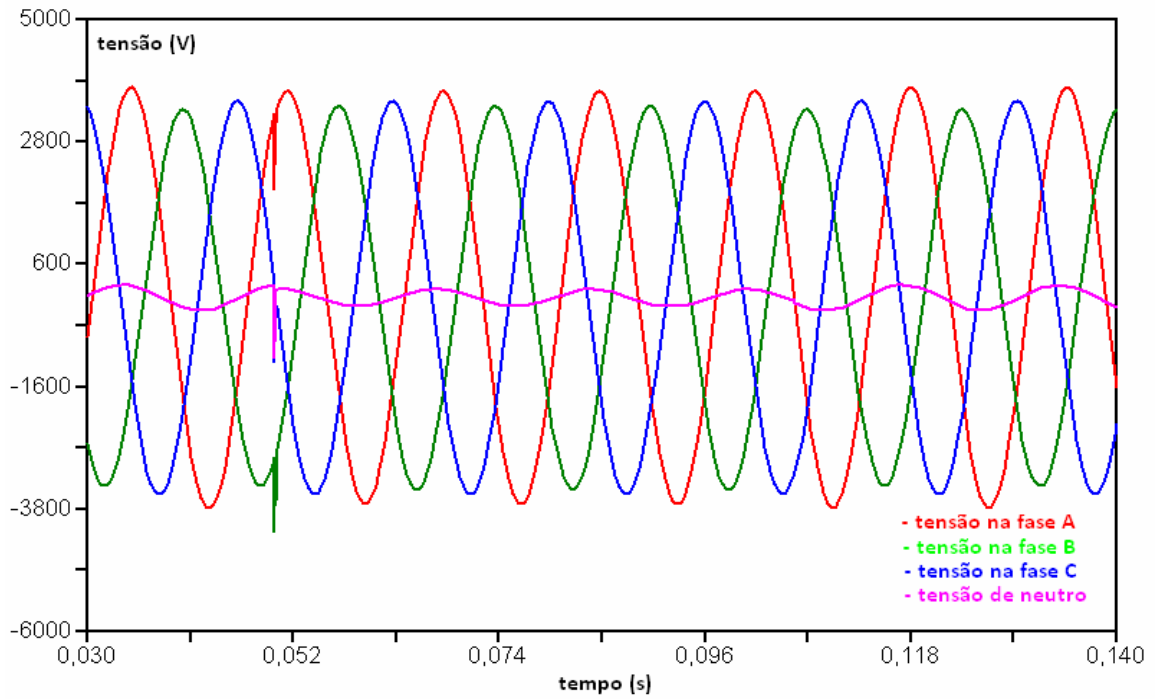


Figura B23 – Curvas das tensões - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=10k\Omega$ - falta na fase A

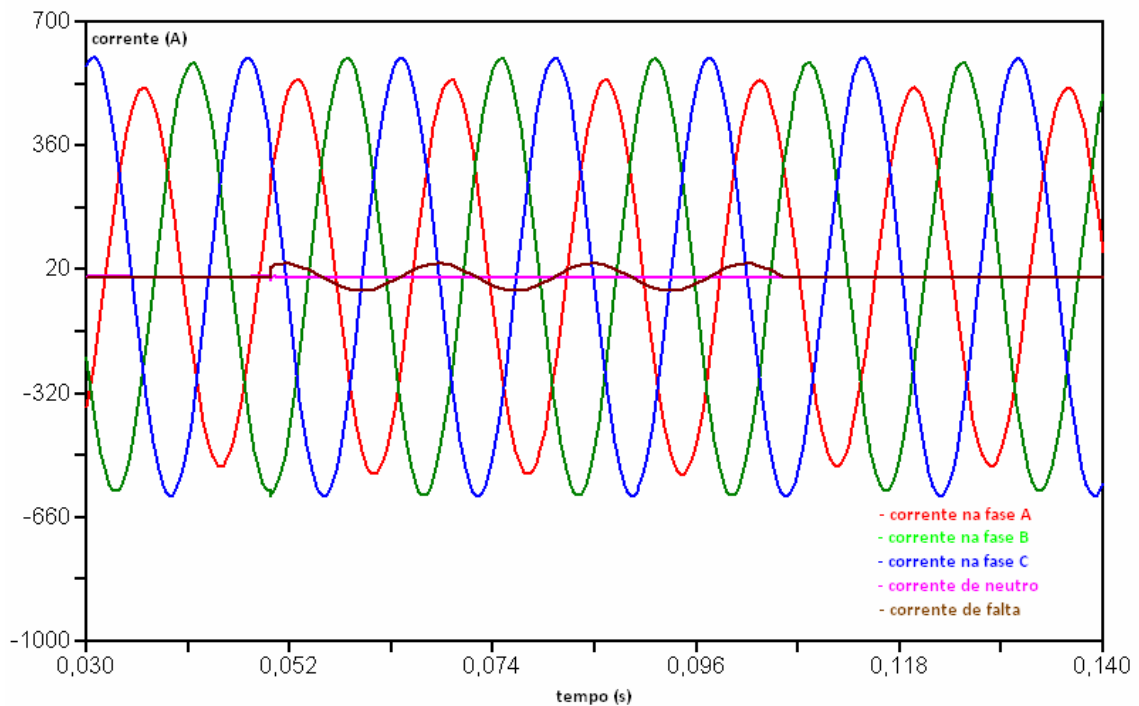


Figura B24 - Curvas das correntes - neutro aterrado $R_n=100 \Omega$ - resistência de falta $R_f=10k\Omega$ - falta na fase A