



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISADORA CASTRO MACHADO

**O ATERRAMENTO RESSONANTE COMO PROPOSTA PARA MELHORAR A
CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

FORTALEZA

2019

ISADORA CASTRO MACHADO

O ATERRAMENTO RESSONANTE COMO PROPOSTA PARA MELHORAR A
CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado
Sampaio

Coorientador: Eng. Lucas Martins Belmino

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M131a Machado, Isadora Castro.

O aterramento ressonante como proposta para melhorar a continuidade do fornecimento de energia elétrica. / Isadora Castro Machado. – 2019.
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

Coorientação: Prof. Lucas Martins Belmino.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Topologias de aterramento. 3. Aterramento ressonante. 4. ATPDraw. 5. Bobina de Petersen. I. Título.

CDD 621.3

ISADORA CASTRO MACHADO

O ATERRAMENTO RESSONANTE COMO PROPOSTA PARA MELHORAR A
CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 07 de Novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Lucas Martins Belmino (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Ma. Janaína Almada Barbosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais Edna e Isaías, pelo incentivo pelo apoio constantes. Ao meu irmão, Isaac. À minha sobrinha, Mariah. Ao meu namorado, Jander. Aos amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo suporte proporcionando para realizar sonho de me tornar engenheira. Agradeço especialmente à minha mãe Edna, que é uma mulher incrível e extremamente inspiradora.

Ao meu irmão Isaac, que foi um segundo pai e um amigo, à minha pequena sobrinha, Mariah, que é uma das pessoas mais importantes da minha vida.

Ao meu namorado Jander, que há alguns anos vem caminhando junto a mim e sonhando meus sonhos como se fossem os dele. Obrigada por estar sempre presente e me apoiar durante essa minha caminhada.

Aos meus amigos da graduação que sempre estenderam a mão para me ajudar ao longo desses anos. Agradeço em especial Debora, Graça, Judá, Monilson, Natanael, Lucas, Rayssa, Rodrigo e Thiago que estiveram comigo desde o início dessa jornada.

Aos companheiros de trabalho na Companhia Siderúrgica do Pecém enquanto fui estagiária, em especial ao meu supervisor Hamilton Martins, que foi super atencioso e dedicado em repassar seus conhecimentos e aos coordenadores Alessandro Andrade e George Júnior. Todos os outros também tiveram um papel muito importante no meu engrandecimento pessoal e profissional. Muito obrigada!

Aos meus amigos Adolfo e Handerson que foram colegas de estágio e hoje se tornaram profissionais incríveis.

Aos meus colegas de trabalho na Território Solar por proporcionarem um ambiente de trabalho descontraído e rico em conhecimentos técnicos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial ao meu orientador Raimundo Furtado, que se empenham em formar profissionais qualificados.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e colaboração no trabalho.

Por fim, agradeço também todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar, mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

Na busca por melhorias na qualidade do fornecimento de energia, novas tecnologias no sistema elétrico são constantemente investigadas e adotadas. Os sistemas de aterramento durante a operação normal do sistema não possuem grande influência, no entanto a topologia escolhida define o comportamento da rede durante a ocorrência de faltas. Este trabalho tem como objetivo apresentar os comportamentos de diferentes topologias de aterramento durante uma ocorrência de falta e evidenciar os benefícios trazidos ao utilizar o aterramento ressonante. Para realizar a simulação foi feita a modelagem dos componentes de um sistema genérico no *software* ATPDraw. Os resultados mostram que o aterramento ressonante elimina as altas correntes de falta, se assemelhando com os sistemas com neutro flutuante. Algumas desvantagens são encontradas na aplicação dessa topologia, como o custo do reator, necessário para realizar a compensação das correntes, e a sobretensão existente no neutro durante a falta. Além disso, faz-se necessária a adequação do sistema de proteção. No entanto, esse tipo de aterramento traz segurança para as redes de distribuição ao realizar o controle da magnitude da corrente de falta.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de potência. Topologias de aterramento. Aterramento ressonante. Simulação. ATPDraw.

ABSTRACT

On the search of improvements in the quality of power supply, new technologies in the electrical system are constantly explored and adopted. The grounding systems during normal operation do not have much influence, however the chosen topology defines the power system behavior during faults. This paper aims to present the behaviors of different grounding topologies during a fault occurrence and to highlight the benefits of using resonant grounding. To perform the simulation was made the modeling of the components of a power system in textit software ATPDraw. Results show that resonant grounding eliminates high fault currents. Some disadvantages are found in the application of this topology, such as the cost of the reactor and the neutral overvoltage during the fault. However, this type of grounding brings safety to the distribution networks by controlling the magnitude of the fault current.

Keywords: Electric power systems. Topologies of grounding. Resonant grounding. Simulation. ATPDraw.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Símbolos esquemáticos de um transformador ideal	19
Figura 2 – Símbolos esquemáticos de um transformador real	21
Figura 3 – Circuito de um transformador real	22
Figura 4 – Tendência dos métodos de aterramento utilizados na Europa	23
Figura 5 – Sistema com neutro não aterrado	24
Figura 6 – Sistema solidamente aterrado	25
Figura 7 – Sistema aterrado através de resistência	26
Figura 8 – Aterramento ressonante	28
Figura 9 – Falta monofásica - Aterramento ressonante	30
Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema em estudo	33
Figura 11 – Modelo do transformador	40
Figura 12 – Parâmetros de entrada	41
Figura 13 – Pontos da curva de saturação	41
Figura 14 – Parâmetros de entrada para uma linha ZT	43
Figura 15 – Conexão em estrela	43
Figura 16 – Conexão em delta	44
Figura 17 – Carga RLC em Y	46
Figura 18 – Carga RLC em delta.	46
Figura 19 – Parâmetros de entrada para carga RLC em Y.	46
Figura 20 – Circuito simulado no ATPDraw - Operação normal.	47
Figura 21 – Tensões de fase no primário do transformador - Operação normal	48
Figura 22 – Tensão e corrente no neutro do transformador - Operação normal	48
Figura 23 – Tensão de entrada na carga 646 - Operação normal	49
Figura 24 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento sólido.	50
Figura 25 – Tensões no ponto de falta - Aterramento sólido.	50
Figura 26 – Corrente de falta - Aterramento sólido.	51
Figura 27 – Tensão e corrente no neutro - Aterramento sólido.	51
Figura 28 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento por resistência.	52
Figura 29 – Tensões no ponto de falta - Aterramento por resistência $R=10 \Omega$	53
Figura 30 – Correntes de falta - Aterramento por resistência $R=10 \Omega$	53
Figura 31 – Tensões e correntes no neutro - Aterramento por resistência.	54

Figura 32 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento flutuante.	55
Figura 33 – Tensões no ponto de falta - Aterramento flutuante.	55
Figura 34 – Correntes de falta - Aterramento flutuante.	56
Figura 35 – Tensão e corrente no neutro - Neutro isolado.	56
Figura 36 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento Ressonante.	57
Figura 37 – Tensões no ponto de falta - Aterramento Ressonante.	58
Figura 38 – Corrente de falta - Aterramento Ressonante.	58
Figura 39 – Tensão e corrente no neutro - Aterramento ressonante.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Entrada	34
Tabela 2 – Parâmetros calculados	35
Tabela 3 – Dados de entrada	39
Tabela 4 – Parâmetros calculados	39
Tabela 5 – Curva de magnetização do transformador	40
Tabela 6 – Parâmetros para modelagem dos condutores.	42
Tabela 7 – Parâmetros dos condutores utilizados.	42
Tabela 8 – Parâmetros das cargas	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ATP</i>	<i>Alternative Transients Program</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ABRACOPEL	Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNI	Confederação Nacional da Indústria
PRODIST	Procedimentos de Distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Relação de transformação do transformador
$S_{1\Phi}$	Potência monofásica aparente
$I_{np(linha)}$	Corrente de linha no primário
$I_{np(fase)}$	Corrente de fase no primário
$I_{ns(linha)}$	Corrente de linha no secundário
$I_{ns(fase)}$	Corrente de fase no secundário
V_{rp}	Tensão sobre o enrolamento primário
V_{rs}	Tensão sobre o enrolamento secundário
f	Frequência da rede
$Z\%$	Impedância percentual
$R\%$	Resistência percentual
I_0	Corrente à vazio
P_0	Potência à vazio
Z_p	Impedância do primário
Z_s	Impedância do secundário
R_p	Resistência do primário
R_s	Resistência do secundário
P_{cc}	Potência de curto-circuito
X_p	Reatância do primário
X_s	Reatância do secundário
L_p	Indutância do primário
L_s	Indutância do secundário
R_{mag}	Resistência de magnetização
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos gerais	16
1.3	Objetivos específicos	16
1.4	Metodologia aplicada	17
1.5	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Qualidade de Energia	18
2.2	Transformadores de potência	18
2.2.1	<i>O transformador ideal</i>	19
2.2.2	<i>O transformador real</i>	21
2.3	Sistemas de aterramento	22
2.3.1	<i>Neutro não aterrado</i>	23
2.3.2	<i>Aterramento sólido ou efetivo</i>	25
2.3.3	<i>Aterramento através de resistência</i>	26
2.3.3.1	<i>Aterramento através de baixa resistência</i>	27
2.3.3.2	<i>Aterramento através de resistência de alto valor</i>	27
2.3.4	<i>Aterramento ressonante ou através de Bobina de Petersen</i>	28
2.3.4.1	<i>Motivação para utilização de aterramento ressonante</i>	29
2.3.4.2	<i>Princípio de funcionamento</i>	29
2.3.4.3	<i>Aplicação do aterramento ressonante</i>	31
2.3.4.4	<i>Vantagens na utilização do aterramento ressonante</i>	31
2.3.4.5	<i>Dificuldades de aplicação do aterramento ressonante</i>	31
2.4	Considerações finais	32
3	MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ATP	33
3.1	Simulação	33
3.2	Sistema de distribuição IEEE 13 Barras	33
3.3	Modelagem dos componentes do sistema	34
3.3.1	<i>Modelagem do Transformador de Potência</i>	34
3.3.1.1	<i>Estimativa dos parâmetros básicos de um transformador</i>	34

3.3.1.1.1	<i>Relação de transformação</i>	35
3.3.1.1.2	<i>Corrente nominal no primário e secundário (I_p, I_s)</i>	36
3.3.1.1.3	<i>Corrente à vazio (I_0)</i>	36
3.3.1.1.4	<i>Potência à vazio (P_0)</i>	36
3.3.1.1.5	<i>Impedância do primário e secundário (Z_p, Z_s)</i>	36
3.3.1.1.6	<i>Resistência do primário e do secundário (R_p, R_s)</i>	37
3.3.1.1.7	<i>Potência de curto-circuito</i>	37
3.3.1.1.8	<i>Reatância do primário e secundário (X_p, X_s)</i>	37
3.3.1.1.9	<i>Indutância do primário e secundário (L_p, L_s)</i>	38
3.3.1.1.10	<i>Resistência de magnetização (R_{mag})</i>	38
3.3.1.1.11	<i>Fluxo de magnetização (λ_0)</i>	38
3.3.1.2	<i>Parâmetros considerados para o transformador do sistema</i>	38
3.3.1.3	<i>O transformador no ambiente de simulação</i>	40
3.3.2	<i>Modelagem de condutores</i>	42
3.3.2.1	<i>Estimativas dos parâmetros</i>	42
3.3.2.2	<i>Os condutores no ambiente de trabalho</i>	42
3.3.3	<i>Modelagem de cargas</i>	43
3.3.3.1	<i>Estimativa dos parâmetros básicos de uma carga trifásica em estrela</i>	43
3.3.3.2	<i>Estimativa dos parâmetros básicos de uma carga trifásica em delta</i>	44
3.3.3.3	<i>As cargas no ambiente de trabalho</i>	45
4	SIMULAÇÕES DOS MODELOS PROPOSTOS	47
4.1	Simulação da rede sob operação normal	47
4.2	Simulação da rede sob transitório	49
4.2.1	<i>Aterramento sólido</i>	49
4.2.2	<i>Aterramento através de resistência</i>	52
4.2.3	<i>Aterramento flutuante</i>	54
4.2.4	<i>Aterramento ressonante</i>	57
4.3	Considerações finais	59
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	60
5.1	Conclusão	60
5.2	Trabalhos futuros	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Estudos da Confederação Nacional da Indústria (CNI) apontam que 67% das empresas são impactadas por consequência das interrupções no serviço de fornecimento de energia. Destas, 16% são afetadas frequentemente e 34% são afetadas eventualmente, a outra metade das empresas entrevistadas responderam que não sofrem com quedas de energia ou somente em raras ocasiões (CNI, 2016). Em algumas dessas empresas, esses eventos podem impactar diretamente na linha de produção, causando significativos prejuízos.

Além dos prejuízos financeiros, a ocorrência de curtos-circuitos é perigosa do ponto de vista de segurança pessoal. A passagem de corrente elétrica pelo corpo humano pode causar danos irreversíveis. Estudos da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL) mostram que em 2018 ocorreram 1.424 acidentes de origem elétrica, em que 836 foram causados por choques elétricos, 537 incêndios por sobrecarga ou curtos-circuitos e 51 descargas atmosféricas (ABRACOPEL, 2019).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, quanto à duração e frequência de interrupção, o que caracteriza a preocupação dos órgãos regulamentadores quanto à qualidade de energia (ANEEL, 2019).

Apesar de ter pouca influência durante a operação normal do sistema, a topologia de aterramento tem grande importância em situações de falta à terra. Estatisticamente, a maior parte das falhas que ocorrem nas redes de distribuição envolvem faltas à terra (JUNIOR, 2009). Dessa forma, é essencial que ela seja adequada para que o sistema obtenha bom desempenho e durante a ocorrência do curto-circuito as sobretensões e correntes resultantes da falta sejam suportadas pelos equipamentos, além da atuação adequada do sistema de proteção.

Na Europa, a filosofia de aterramento segue um padrão diferente do brasileiro. No centro e leste europeu, o sistema de aterramento predominante é o aterramento ressonante, com tendências de migração para este sistema também no norte europeu. Países como França, Portugal e Espanha utilizam sistemas de aterramento com baixa impedância ou solidamente aterrado. O sistema italiano, no entanto, utilizava em todo sistema de média tensão o neutro isolado. Porém, após testes e resultados positivos, será estendido o uso do aterramento ressonante em todas as suas instalações (LOURO, 2008).

O aterramento ressonante é realizado através da inserção de uma reatância na conexão fase-terra capaz de compensar a capacitância total do sistema. Dessa forma, a corrente de falta

à terra é significativamente reduzida, fazendo com que haja uma auto-extinção do arco elétrico e recomposição do sistema elétrico em pouco tempo. Ao utilizar essa topologia a filosofia de proteção deve ser readequada para atuar de forma mais sensível.

1.1 Motivação

O estudo dos sistemas de aterramento é necessário para verificar como os transitórios influenciam no fornecimento de energia elétrica, certificando-se da possibilidade de continuidade operacional do sistema durante a ocorrência, além disso, a topologia de aterramento escolhida no projeto deve considerar formas de preservar integridade dos equipamentos e seus usuários através da análise dos níveis de tensão e corrente durante a falta.

Estudos relacionados à vantagens e desvantagens dos sistemas com aterramento ressonante ainda não têm forte disseminação no meio acadêmico e industrial brasileiro, por este motivo este trabalho tem como objetivo fornecer subsídios para que a técnica seja reconhecida e possivelmente aplicada.

1.2 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar o resultado da análise e comparação do desempenho do sistema de aterramento ressonante e as demais topologias de aterramento utilizadas nos sistemas de distribuição do Brasil e do mundo.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- (a) Modelar no ATPDraw da rede sob estudo;
- (b) Analisar a rede sob operação normal;
- (c) Analisar a rede sob condição de falta monofásica;
- (d) Verificar os aspectos de cada uma das topologias apresentadas.

1.4 Metodologia aplicada

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho abrange:

- (a) Apresentação da rede estudada;
- (b) Cálculo dos parâmetros de entrada para o ATPDraw;
- (c) Apresentação e análise das simulações realizadas.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentada a importância do aterramento nos sistemas de distribuição, também são apresentadas as motivações para a elaboração deste trabalho, assim como os objetivos e metodologia aplicada.

No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica em que são descritas as topologias de aterramento utilizadas atualmente. São apresentadas as vantagens e desvantagens da utilização de cada uma delas e o que deve ser considerado na realização e implementação do projeto.

No capítulo 3, é mostrado como os parâmetros da rede utilizada foram modelados. É apresentada a rede original, a adaptação feita para análise e o cálculo dos parâmetros de entrada do *software* ATPDraw.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões das simulações para os diferentes tipos de aterramento sob regime de operação normal e sob uma falta transitória em uma das fases.

No capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho com base nas simulações realizadas e os trabalhos a serem realizados futuramente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica abordando conceitos relativos aos sistemas de aterramento, qualidade no fornecimento de energia, transformadores de distribuição e segurança pessoal nas redes de média tensão.

2.1 Qualidade de Energia

A qualidade de energia no âmbito da continuidade do fornecimento corresponde à disponibilidade de energia e tem como característica dois parâmetros: duração e frequência das interrupções (PANIAGO, 2006).

Os parâmetros citados são consequências de um fornecimento de energia de baixa qualidade. Por esse motivo, para reduzir falhas são necessários estudos com o intuito de minimizar as perdas financeiras relativas, aumentar a satisfação do consumidor e atender aos indicadores de continuidade do serviço de distribuição estabelecidos e fiscalizados pela ANEEL.

A maior parte dos desligamentos não programados são provocados por curtos-circuitos e se verifica que cerca de 80% são monofásicos, provocados por descargas atmosféricas, contato com arborização, vendaval, dentre outros motivos. Apesar de serem originados por fenômenos de curta duração, devido às altas correntes de falta, a situação pode evoluir para um desligamento sustentado (ÁVILLA *et al.*, 2007).

Com intuito de melhorar a confiabilidade dos sistemas elétricos há uma busca por tecnologias que possibilitem reduzir a frequência e a duração de desligamentos da rede mantendo a segurança das instalações. Uma das estratégias é utilizar topologias de aterramento que permitam a continuidade operacional da rede mesmo durante a ocorrência de uma falta.

2.2 Transformadores de potência

Os transformadores de potência são definidos como equipamentos estáticos com dois ou mais enrolamentos que transformam um sistema de tensão e corrente alternada em um outro sistema através de indução eletromagnética com o objetivo de transmitir potência elétrica (ABNT, 2010).

Usualmente, os enrolamentos não são conectadas diretamente entre si. Ambos envolvem o núcleo de material ferromagnético e a única conexão entre eles é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo (CHAPMAN, 2013).

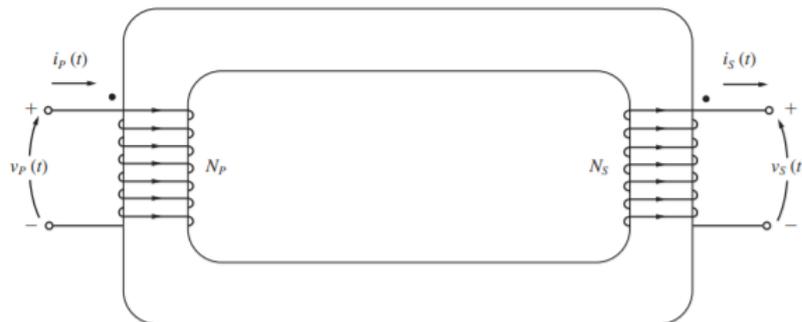
Os transformadores podem ser classificados quanto ao número de fases e à classe de tensão podendo ter finalidade de elevar ou abaixar o nível de tensão, dependendo do uso que é feito no sistema elétrico. Por exemplo, na conexão de uma unidade geradora com o sistema de transmissão são utilizados transformadores que elevam o nível de tensão da geração para o nível de transmissão e para atender os consumidores finais são utilizados transformadores que abaixam o nível de tensão de distribuição para o nível final.

2.2.1 O transformador ideal

Um transformador ideal é modelado sem perdas, portanto a relação entre as potências no enrolamento primário e no enrolamento secundário é unitária.

Na Figura 1 é representado o esquemático de um transformador ideal.

Figura 1 – Símbolos esquemáticos de um transformador ideal



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Considerando que o transformador da Figura 1 possui N_P espiras no enrolamento primário e N_S espiras no enrolamento secundário, a relação entre as tensões no primário e secundário é dada pela equação 2.1:

$$\frac{V_P(t)}{V_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = \alpha \quad (2.1)$$

Onde α é a relação de transformação do transformador.

$$\frac{N_P}{N_S} = \alpha \quad (2.2)$$

A relação entre a corrente no primário do transformador $i_p(t)$ e a corrente no secundário do transformador $i_s(t)$ é dada pela equação 2.3.

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{1}{\alpha} \quad (2.3)$$

A potência ativa de entrada $P_{entrada}$ é dada pela equação 2.4.

$$P_{entrada} = V_P \cdot I_P \cdot \cos\theta_P \quad (2.4)$$

Em que θ_P é o ângulo entre a tensão primária e a corrente primária.

A potência ativa de saída P_{saida} é dada pela equação 2.5.

$$P_{saida} = V_S \cdot I_S \cdot \cos\theta_S \quad (2.5)$$

Em que θ_S é o ângulo entre a tensão secundária e a corrente secundária.

Os ângulos entre tensão e corrente não são afetados, então $\theta_P = \theta_S = \theta$. Utilizando a relação de transformação na equação da potência de saída do transformador (2.5) é possível mostrar que a potência de saída de um transformador ideal é igual à sua potência de entrada, como mostrado nas equações 2.6 e 2.7.

$$P_{saida} = \frac{V_P}{\alpha} \cdot (\alpha \cdot I_P) \cdot \cos\theta \quad (2.6)$$

Com isso:

$$P_{saida} = V_P \cdot I_P \cdot \cos\theta = P_{entrada} \quad (2.7)$$

Da mesma forma que o transformador altera os níveis de tensão e corrente, também altera a impedância.

A impedância de uma carga conectada ao secundário do transformador pode ser escrita como:

$$Z_{carga} = \frac{V_S}{I_S} \quad (2.8)$$

E a impedância dessa carga refletida no primário é:

$$Z_{carga-P} = \frac{V_P}{I_P} \quad (2.9)$$

Reescrevendo a tensão no enrolamento primário com o auxílio da relação de transformação:

$$v_P = \alpha \cdot V_S \quad (2.10)$$

E a corrente no enrolamento primário:

$$I_P = \frac{I_S}{\alpha} \quad (2.11)$$

Então, a impedância do enrolamento primário é:

$$Z_{carga-P} = \frac{V_P}{I_P} = \frac{\alpha \cdot V_S}{\frac{I_S}{\alpha}} = \alpha^2 \cdot \frac{V_S}{I_S} \quad (2.12)$$

Portanto, a impedância da carga refletida no primário é dada pela equação 2.13.

$$Z_{carga-P} = \alpha^2 \cdot Z_{carga} \quad (2.13)$$

Os transformadores ideais não podem ser construídos na realidade, mas permitem compreender como a energia elétrica pode ser transferida de uma parte do circuito a outra.

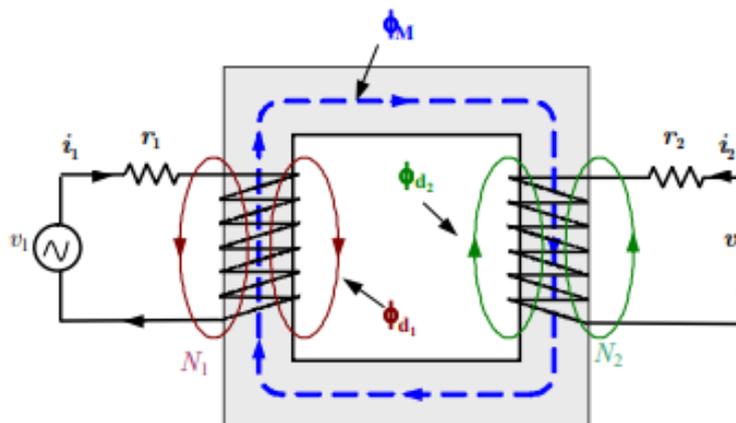
2.2.2 O transformador real

Quando comparados aos transformadores ideais, os transformadores reais possuem as seguintes características (EPUSP, 2014):

- (a) A força magnetomotriz para magnetizar o núcleo não é nula;
- (b) Os fluxos estabelecidos pelas correntes não são confinados inteiramente ao núcleo;
- (c) Os enrolamentos têm resistência, ou seja, há perdas por efeito Joule;
- (d) Como o núcleo é construído de material ferromagnético, está sujeito a perdas de origem magnética quando sujeito a um fluxo variável;
- (e) Quando operados em frequências muito altas os efeitos capacitivos não são desprezíveis.

Na Figura 2 é mostrado o esquemático de um transformador real com as resistências r_1 e r_2 nos enrolamentos primário e secundário, fluxos dispersos Φ_{d1} e Φ_{d2} e fluxo mútuo Φ_M .

Figura 2 – Símbolos esquemáticos de um transformador real



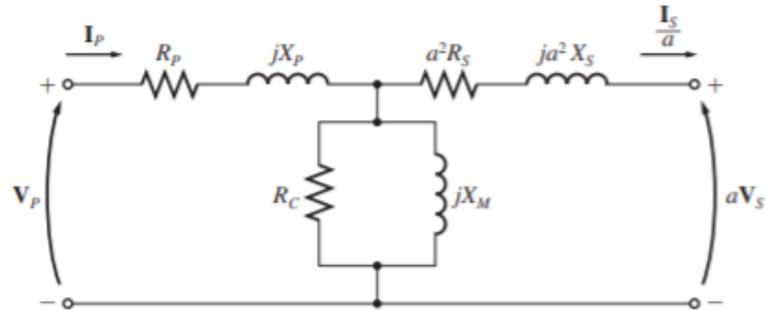
Fonte: (EPUSP, 2014)

Com a não idealidade se observa a absorção de uma corrente de excitação pelo transformador, que é a corrente à vazio i_0 . Parte dessa corrente magnetiza o núcleo e produz o

fluxo mútuo Φ_M através da corrente de magnetização e a outra parte dessa corrente é destinada às perdas magnéticas do núcleo i_p .

Na Figura 3 é apresentado o esquemático de um transformador ideal.

Figura 3 – Circuito de um transformador real



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Para determinar os parâmetros do circuito equivalente, é necessária a realização do ensaio à vazio e ensaio em curto-circuito no transformador.

No ensaio à vazio, são determinados os parâmetros relacionados aos efeitos do núcleo e no ensaio em curto-circuito, os parâmetros relacionados aos enrolamentos.

2.3 Sistemas de aterramento

A ausência ou utilização de uma impedância entre um dos condutores do sistema e o terra caracteriza as filosofias de aterramento conhecidas.

A escolha do método de aterramento a ser utilizado é de grande importância, apesar de no modo de operação normal ter pouca influência no sistema (COSTA, 1995). Para a escolha do método ideal, são considerados alguns pontos como a existência de cargas monofásicas e, também, é verificada a necessidade de continuidade operacional da planta, pois alguns destes métodos permitem a operação mesmo durante a ocorrência de uma falta.

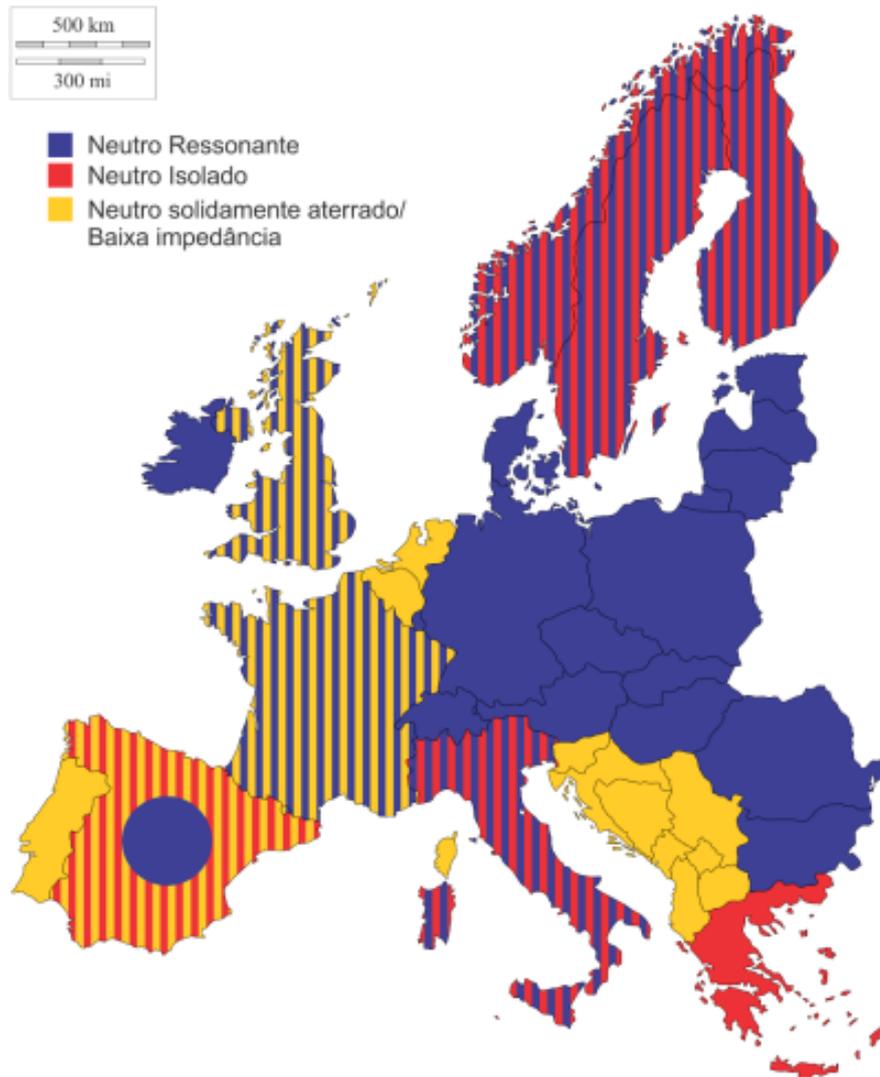
Os métodos de aterramento do neutro mais usuais são os seguintes: neutro isolado, solidamente aterrado, aterramento por meio de resistência e aterramento ressonante, também chamado neutro aterrado por meio de Bobina de Petersen.

No Brasil, o sistema de aterramento predominantemente usado no sistema de distribuição é o solidamente aterrado. Esse sistema tem como características a limitação das sobretensões e detecção seletiva das faltas através dos dispositivos de proteção. Na Europa, a tendência é que haja uma mudança nas filosofias de aterramento atuais e que o aterramento

ressonante seja a filosofia predominante (NUNES, 2017).

No mapa apresentado Figura 4, observa-se a tendência dos métodos de aterramento na Europa. A Europa Central, Leste Europeu, Irlanda e a área central da Espanha tendem a utilizar de forma predominante o aterramento ressonante. Enquanto os países nórdicos, Reino Unido, França, Espanha e Itália tendem a mesclar a topologia de aterramento predominante atualmente com o aterramento ressonante.

Figura 4 – Tendência dos métodos de aterramento utilizados na Europa



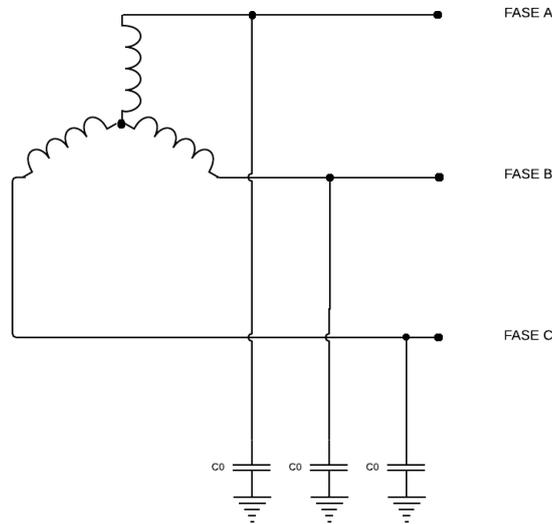
Fonte: (NUNES, 2017).

2.3.1 *Neutro não aterrado*

O sistema de aterramento é classificado como flutuante ou com o neutro não aterrado quando a conexão entre o sistema e a terra é inexistente. No entanto, na prática, há sempre uma capacitância de acoplamento ao longo do sistema.

Na Figura, 5 é apresentado um sistema trifásico com o neutro isolado.

Figura 5 – Sistema com neutro não aterrado



Fonte: A Autora.

Considerando um sistema trifásico e supondo que ocorra um curto-circuito sem qualquer impedância de falta em uma das três fases, ocorre um deslocamento das duas outras fases. Os valores das tensões entre fase e terra passam a assumir valores de tensões de linha, pois as capacitâncias próprias das fases são se carregam como se fossem um capacitor em cada fase (MARDEGAN, 2012).

Os níveis de corrente de falta são muito baixos por não haver uma conexão física entre o neutro do transformador e o terra, com isso os esforços sobre os equipamentos são reduzidos e não é necessário que a área em falta seja isolada de forma imediata. Além disso, há a vantagem econômica por não haver necessidade de condutores para aterramento do sistema. No entanto, deve-se considerar as sobretensões transitórias elevadas que podem ocorrer e que impactam na isolação dos equipamentos.

Além da possibilidade de sobretensões transitórias elevadas, é importante mencionar que os esquemas de proteção comumente utilizados para detecção de faltas à terra não são adequadas para essa topologia de aterramento devido a corrente de falta ser insignificante. Portanto, é necessária a adequação do sistema de proteção (COSTA, 2014).

2.3.2 Aterramento sólido ou efetivo

O sistema é dito solidamente aterrado quando atende à uma das seguintes relações (COSTA, 1995):

1. A reatância de sequência zero e a reatância de sequência positiva é inferior ou igual a três.

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad (2.14)$$

2. A resistência de sequência zero e a reatância de sequência positiva é inferior ou igual a um.

$$\frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad (2.15)$$

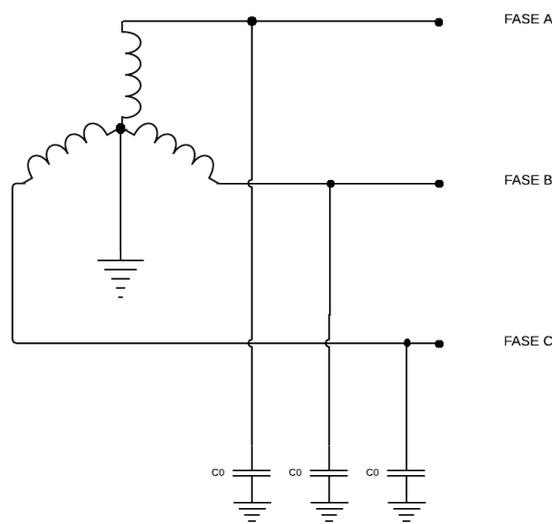
Em que:

- X_0 é a reatância de sequência zero;
- X_1 é a reatância de sequência positiva;
- R_0 é a resistência de sequência zero.

Na prática, os sistemas solidamente aterrados possuem os pontos de neutro do sistema conectados à terra sem qualquer impedância intencional entre eles.

Na Figura, 6 é apresentado um sistema trifásico com o neutro solidamente aterrado.

Figura 6 – Sistema solidamente aterrado



Fonte: A autora.

Em casos de falta à terra, esse sistema fornece correntes com valores consideráveis e não apresenta elevações de tensões nas fases sãs.

Visto que não apresenta significativas elevações de tensão, o sistema não requer níveis de isolamento elevados, bastando o nível de tensão fase-terra, reduzindo assim custos com isolamento. Além dessa vantagem, a detecção de faltas à terra acontecem em um curto período de tempo, já que devido aos altos valores de corrente de falta, a proteção atua de forma rápida.

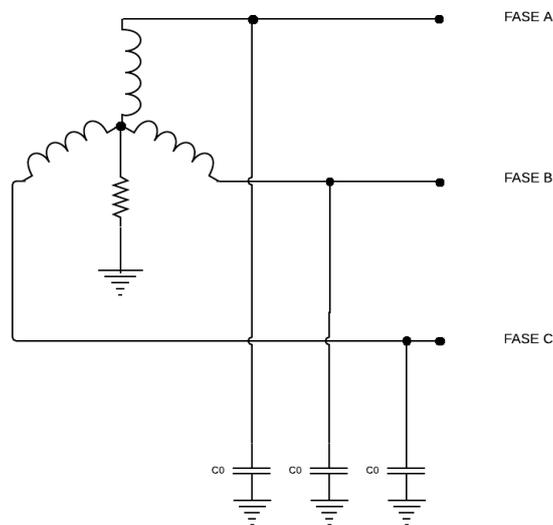
A eliminação das faltas deve ser feita com a interrupção da corrente e do fornecimento de energia, pois as correntes de curto-circuito entre a fase e a terra podem atingir valores superiores às correntes de curto-circuito trifásico (MARDEGAN, 2012).

2.3.3 *Aterramento através de resistência*

A principal motivação para a adição de uma resistência entre o neutro do sistema e o terra é a limitação da corrente em ocorrências de falta.

Na Figura 7, é apresentado um sistema trifásico com o neutro aterrado através de uma resistência.

Figura 7 – Sistema aterrado através de resistência



Fonte: A autora.

Um sistema aterrado através de resistência é capaz de reduzir esforços térmicos de equipamentos causados pela falta à terra, risco de choque causado pela fuga de corrente além de controlar sobretensões transitórias a níveis seguros.

Dependendo do valor da corrente que flui durante a falta, o sistema é classificado em aterramento por resistência de alto valor e aterramento por resistência de baixo valor.

2.3.3.1 *Aterramento através de baixa resistência*

Neste esquema de aterramento, o sistema é aterrado através de um resistor de baixo valor com a intenção de reduzir a magnitude da corrente de falta. Desta forma, os esforços térmicos nos equipamentos são reduzidos.

Na França, boa parte do sistema de distribuição é aterrado através de baixa resistência, limitando a corrente de falta em valores entre 150 e 300 Amperes nas redes de distribuição rural e no máximo em 1000 Amperes nas redes de distribuição urbana (JUNIOR, 2009).

Uma outra vantagem deste método de aterramento é a imediata e seletiva retirada da falta, visto que a corrente de defeito é grande o suficiente para que a proteção seja sensibilizada.

2.3.3.2 *Aterramento através de resistência de alto valor*

Neste esquema de aterramento, o sistema é aterrado através de um resistor de alto valor. O valor da resistência para este método é igual ou menor do que o valor da reatância capacitiva total do sistema. Este método apresenta comportamento semelhante ao método com neutro não aterrado, com a diferença de fluir uma corrente de falta através do resistor.

Para que não ocorram sobretensões elevadas ou arcos intermitentes, um dos seguintes critérios devem ser respeitados (IEEE, 2007):

1. A resistência deve ser igual ou menor que a capacitância total do sistema.

$$R_g \leq X_c \quad (2.16)$$

2. A corrente que flui através do resistor deve ser maior ou igual à magnitude da componente capacitiva da corrente de falta.

$$I_R \geq I_{xc} \quad (2.17)$$

Em que:

- R_g é a resistência de aterramento;
- X_c é a reatância para terra capacitiva total do sistema;
- I_R é a corrente de falta à terra através do resistor de aterramento;
- I_{xc} é a corrente da componente capacitiva da corrente de falta.

No aterramento por alta resistência, assim como nos sistemas com neutro isolado, a tensão nas fases são multiplicadas por um fator de $\sqrt{3}$ durante as faltas e a detecção é possível utilizando elementos direcionais de sequência zero sensíveis.

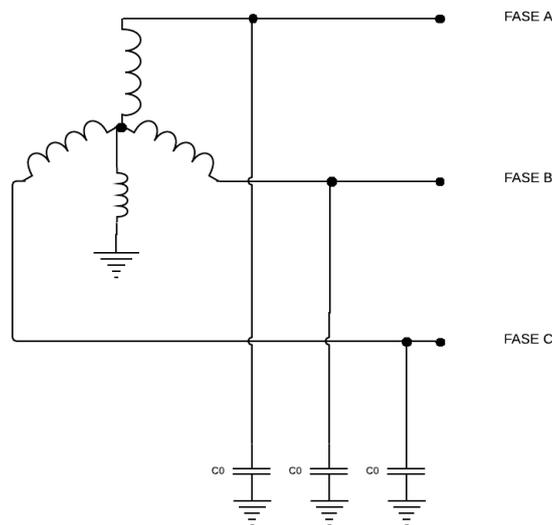
Possui como vantagens a continuidade operacional, possibilidade de localização das faltas com rapidez e principalmente, reduz os riscos às pessoas por possuir corrente de falta com baixa amplitude. No entanto, o custo é aumentado pela necessidade de aumento no nível de isolamento e até mesmo pelo custo do resistor.

2.3.4 Aterramento ressonante ou através de Bobina de Petersen

Neste esquema de aterramento, o sistema é aterrado através de um reator de alta impedância sintonizado com a capacitância fase-terra do sistema.

Na Figura 8, é apresentado um sistema trifásico com o neutro ressonante.

Figura 8 – Aterramento ressonante



Fonte: A autora.

Essa reatância é sintonizada com a reatância capacitiva das linhas de forma que a corrente resultante de falta à terra seja resistiva e de baixa amplitude.

Em casos de faltas a corrente de falta com característica capacitiva percorre a bobina de Petersen e as componentes indutivas e capacitivas, defasadas de 180° , se anulam, permanecendo apenas uma componente resistiva de baixo valor. A corrente de baixa amplitude que irá circular favorece a auto-extinção do arco elétrico e reestabelecimento do sistema (TEIXEIRA *et al.*, 2012).

2.3.4.1 *Motivação para utilização de aterramento ressonante*

As correntes de falta à terra que fluem pelo sistema de aterramento podem tornar as redes perigosas para a vida humana, pois existirão tensões significativas de passo, toque e transferência.

As definições de tensão de passo e de toque são dadas pela NBR 15751:2013 (ABNT, 2013).

Tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m. (p. 3)

Tensão de toque é a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente igual a 1,0 m. (p. 3)

Além disso, a interrupção no fornecimento de energia acarreta em prejuízo financeiro para a maioria das empresas, pois o retorno ao processo produtivo após uma parada requer tempo.

As sobretensões transitórias em um sistema de distribuição definem o isolamento mínimo desejado, desta forma, se o aterramento eliminar tensões de alta magnitude, ele opera de modo satisfatório nesse quesito.

Nesse contexto, a utilização do aterramento ressonante vem para solucionar os problemas relativos às altas correntes de falta à terra e sobretensões transitórias elevadas. Sejam eles causados devido à curtos-circuitos ou descargas atmosféricas, que são as principais causas dos defeitos.

2.3.4.2 *Princípio de funcionamento*

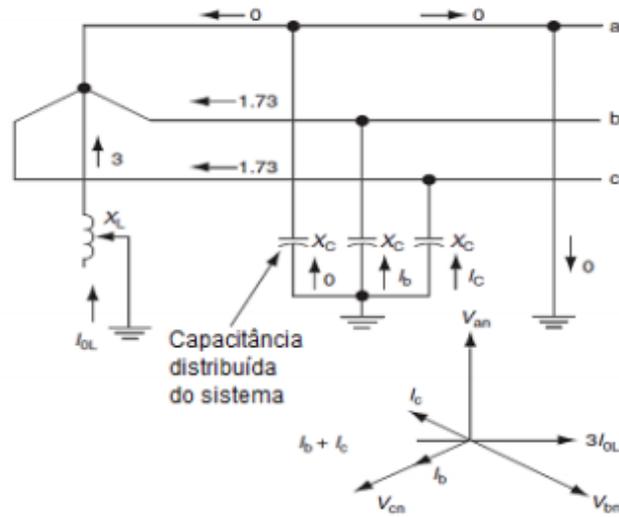
Neste método de aterramento, o sistema é aterrado através de um reator de alta impedância sintonizado com a capacitância fase-terra do sistema. A bobina de Petersen também é conhecida como bobina de supressão de arco ou bobina neutralizadora de faltas à terra.

A principal característica deste método é que devido o reator estar sincronizado com a capacitância fase-terra do sistema, a corrente que flui decorrente da falta, é apenas uma componente resistiva resultante das perdas de isolamento do sistema e da resistência do reator, praticamente nula. Desta forma, a corrente residual é extinta, eliminando o defeito.

A Figura 9 exemplifica uma falta monofásica fase-terra. A corrente que flui através do reator é a soma das correntes que fluem através das capacitâncias fase-terra do sistema. Desta

forma o sistema entra em ressonância e a corrente de falta é extinguida.

Figura 9 – Falta monofásica - Aterramento ressonante



Fonte: (JUNIOR, 2009).

Abaixo, será mostrado analiticamente como é possível fazer com que o sistema entre em ressonância.

A corrente que passa pelo neutro do sistema é dada por:

$$I_N = \frac{V_{FN}}{X_N} = \frac{V_{FN}}{\omega L_N} \quad (2.18)$$

A corrente total que passa pelas capacitâncias fase-terra do sistema é dada por:

$$I_{CT} = \frac{V_{FN}}{\Sigma X_{CT}} = V_{FN} \Sigma \omega C_T \quad (2.19)$$

Para que a corrente de falta seja nula:

$$I_F = I_{CT} \quad (2.20)$$

Para isso:

$$\omega L_N = \frac{1}{\Sigma \omega C_T} \quad (2.21)$$

O valor da indutância deve ser:

$$L_N = \frac{1}{\omega^2 \Sigma C_T} \quad (2.22)$$

Quando a reatância capacitiva do sistema for igual à reatância indutiva da bobina, o sistema está totalmente compensado. E caso seja necessário, é possível ajustar a relação entre a indutância e a capacitância utilizando taps no reator.

Ao analisar o comportamento dessa topologia de aterramento, nota-se que há semelhança com sistemas com neutro isolado. Durante uma falta, o triângulo das tensões não se altera e ocorre uma alteração nas tensões das fases sãs, que são multiplicadas por um fator de $\sqrt{3}$.

2.3.4.3 Aplicação do aterramento ressonante

As aplicações do aterramento ressonante são planejadas para eliminar faltas em fenômenos de curta duração ou para operar sem desligamento durante uma falta a terra sustentada. Para os casos de eliminação de faltas de curta duração, o aterramento ressonante pode ser utilizado somente para este momento, empregando mecanismos que retornem à topologia de aterramento original depois da ocorrência (NUNES, 2017).

A literatura apresenta diversos métodos para detecção e localização de faltas à terra nos sistemas compensados: detecção de tensão, wattímetro e de frequência fundamental.

No método de detecção de tensão são utilizadas as tensões de sequência zero e a tensão fase-terra como indicadores de falta e gatilhos para detecção de faltas visto que esses métodos não são seletivos, pois, identificam a falta, mas não o elemento defeituoso.

Por esse motivo, os métodos são combinados de forma a permitir a localização e detecção do ponto defeituoso.

2.3.4.4 Vantagens na utilização do aterramento ressonante

A bobina de Petersen atua apenas no neutro do transformador alimentador da rede, portanto, propõe uma solução localizada para o controle das correntes de curto fase-terra.

Além disso, cerca de 70% a 90% dos curtos-circuitos são fase-terra e os curtos entre duas ou três fases, em geral, são iniciados por um curto fase-terra (COSTA, 1995). Portanto, o controle desta corrente pode evitar discontinuidades no fornecimento de energia e acidentes relacionados.

Outro aspecto é a segurança pessoal obtida. Com sintonização do sistema as tensões de toque e de passo são praticamente eliminadas devido à limitação da corrente de falta.

2.3.4.5 Dificuldades de aplicação do aterramento ressonante

Apesar deste método de aterramento possuir inúmeras vantagens, possui algumas dificuldades na sua aplicação, dependendo da topologia da rede em que será utilizado.

Um dos primeiros aspectos é a falta de conhecimentos sobre a tecnologia que resulta na falta de confiança em abandonar métodos de aterramentos mais tradicionais e utilizar um método praticamente desconhecido, com falta de domínio completo.

Durante faltas a terra, a tensão nas fases sãs são elevadas em um fator $\sqrt{3}$. Para operação sustentada se deve atentar quanto ao nível isolamento e a capacidade dos equipamentos projetados.

2.4 Considerações finais

Com a apresentação dos sistemas de aterramento disponíveis, suas vantagens e desvantagens, é possível concluir que não há uma filosofia que atenda positivamente todas as exigências, portanto, deve-se escolher o método de aterramento que se adéqua a instalação levando em consideração suas particularidades.

Aterrar o neutro do sistema controla as sobretensões, no entanto, a magnitude das correntes de falta podem ser perigosas considerando as tensões de passo e toque, além da possibilidade de danos nos equipamentos.

A fim de reduzir estes efeitos é aconselhável introduzir uma impedância na conexão entre o neutro e a terra. Esta impedância pode ser de baixo ou alto valor, implicando em correntes de falta com valores significativos e controle nas sobretensões ou correntes de falta de baixos valores e sobretensões elevadas, respectivamente.

Como visto, não se pode conciliar os dois critérios. O projeto do sistema de aterramento deve considerar as circunstâncias da instalação e o que deve ser privilegiado.

3 MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ATP

Neste capítulo, é apresentada a planta utilizada para a realização deste trabalho, as ferramentas disponíveis no *software* e os parâmetros de simulação.

3.1 Simulação

O *software* utilizado para a simulação do circuito é chamado *Alternative Transients Program (ATP)*, nele é possível simular transitórios eletromagnéticos ou de natureza eletromecânica através da modelagem de sistemas elétricos, reproduzindo o comportamento do sistema de forma fiel à realidade.

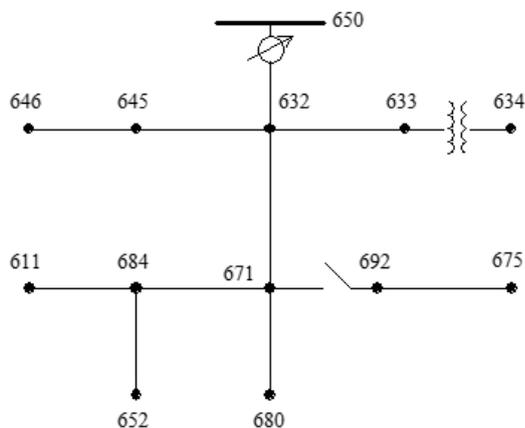
O programa dispõe de recursos para modelagem de sistemas de distribuição e de transmissão com redes polifásicas, implementada através de uma interface gráfica (ATPDraw) também sendo possível explorar alguns recursos adicionais através de linguagem de programação (MODELS).

Neste trabalho, o ATPDraw foi utilizado para a modelagem do sistema.

3.2 Sistema de distribuição IEEE 13 Barras

Figura, 10 é apresentado o sistema fornecido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* para estudo de testes em alimentadores.

Figura 10 – Diagrama unifilar do sistema em estudo



Fonte: (IEEE, 1992)

O sistema de teste original possui circuitos de 4,16 kV, linhas aéreas e subterrâneas, cargas desequilibradas distribuídas e concentradas (IEEE, 1992). De forma a simplificar a simulação o sistema original foi reduzido a três alimentadores conectados ao secundário de um transformador abaixador 115/4,16 kV de potência 5000 kVA, com conexão do primário em delta e do secundário, estrela solidamente aterrado.

3.3 Modelagem dos componentes do sistema

Os componentes do sistema a serem modelados para o estudo são: transformadores, condutores, motores e outras cargas.

3.3.1 Modelagem do Transformador de Potência

Transformadores consistem de dois ou mais enrolamentos acoplados através de um fluxo magnético comum. Se o primário do transformador for conectado a uma fonte de tensão alternada, será produzido um fluxo magnético, com amplitude dependente dos valores de tensão no primário, frequência e número de espiras. O acoplamento do enrolamento secundário com o primário acontece através do fluxo comum entre eles. A tensão de saída neste enrolamento é dependente do número de espiras do secundário, fluxo comum e frequência (REIS *et al.*, 2012).

3.3.1.1 Estimativa dos parâmetros básicos de um transformador

Na Tabela 1, são mostrados dados gerais, os quais serão necessários para simulação no ATPDraw.

Tabela 1 – Parâmetros de Entrada

Sigla	Definição	Unidade
$S_{1\phi}$	Potência aparente monofásica	[VA]
V_{rp}	Tensão sobre o enrolamento primário	[V]
V_{rs}	Tensão sobre o enrolamento secundário	[V]
f	Frequência da rede	[Hz]
$Z\%$	Impedância percentual	[%]
$R\%$	Resistência percentual	[%]

Fonte: A autora.

Na Tabela 2 apresenta quais serão os dados de saída, com suas respectivas unidades calculados através dos dados de entrada da tabela 1. Os cálculos destes parâmetros são feitos nas seções 3.3.1.1.1 à 3.3.1.1.11.

Tabela 2 – Parâmetros calculados

Sigla	Definição	Unidade
α	Relação de transformação	-
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	[A]
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	[A]
I_0	Corrente à vazio	[A]
P_0	Potência à vazio	[W]
Z_p	Impedância do primário	[Ω]
Z_s	Impedância do secundário	[Ω]
R_p	Resistência do primário	[Ω]
R_s	Resistência do secundário	[Ω]
P_{cc}	Potência de curto-circuito	[W]
X_p	Reatância do primário	[Ω]
X_s	Reatância do secundário	[Ω]
L_p	Indutância do primário	[mH]
L_s	Indutância do secundário	[mH]
R_{mag}	Resistência de magnetização	[Ω]
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	[Wb-espira]

Fonte: A autora.

3.3.1.1.1 Relação de transformação

Como a potência nos enrolamentos primário e secundário são iguais, logo:

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \quad (3.1)$$

Assim, a relação de transformação é dada por:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \alpha \quad (3.2)$$

Além disso, como:

$$V_p = Z_p \cdot I_p \quad (3.3)$$

$$V_s = Z_s \cdot I_s \quad (3.4)$$

Tem-se que:

$$(Z_p \cdot I_p) \cdot I_p = (Z_s \cdot I_s) \cdot I_s \quad (3.5)$$

$$Z_p \cdot I_p^2 = Z_s \cdot I_s^2 \quad (3.6)$$

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{I_s}{I_p}\right)^2 = \alpha^2 \quad (3.7)$$

3.3.1.1.2 Corrente nominal no primário e secundário (I_p, I_s)

A representação de transformadores trifásicos no *ATPDraw* é feita através de um banco de transformadores monofásicos.

Unidade monofásica: 1,67 MVA; 115/2,14 kV

A corrente nominal no primário e secundário de um transformador é obtida através da sua potência aparente e respectiva tensão nominal entre linhas.

Corrente nominal do primário:

$$I_{np} = \frac{S_{1\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{plinha}} [A] \quad (3.8)$$

Corrente nominal do secundário:

$$I_{ns} = \frac{S_{1\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{slinha}} [A] \quad (3.9)$$

3.3.1.1.3 Corrente à vazio (I_0)

A corrente à vazio de um transformador varia entre 0,2 a 2% da corrente nominal. Considerando que a energização do transformador seja realizada pelo primário (REIS *et al.*, 2012):

$$I_{0(pico)} = I_0(\%) \cdot I_{np(pico)} [A] \quad (3.10)$$

3.3.1.1.4 Potência à vazio (P_0)

A potência à vazio, que são as perdas no núcleo, podem ser estimadas segundo a equação 3.11:

$$P_0 = V_{np} \cdot I_{0(RMS)} \cdot \cos\phi_0 [W] \quad (3.11)$$

3.3.1.1.5 Impedância do primário e secundário (Z_p, Z_s)

Esta impedância é determinada através de ensaios. Com base na tensão e corrente de curto-circuito é possível determinar a impedância interna, do lado de alta tensão do transformador. Esse ensaio determina essencialmente as perdas no cobre.

Impedância do primário:

$$Z_p = \frac{V_{plinha}^2}{S_{3\phi}} \cdot \frac{Z_{cc}}{200} [\Omega] \quad (3.12)$$

Impedância do secundário:

$$Z_s = \frac{Z_p}{\alpha^2} [\Omega] \quad (3.13)$$

3.3.1.1.6 Resistência do primário e do secundário (R_p, R_s)

A resistência do primário e do secundário pode ser estimada a partir do valor de $R\%$.

Resistência do primário:

$$R_p = \frac{R\%}{200} \cdot Z_b = \frac{R\%}{200} \cdot \frac{V_{plinha}^2}{S_{3\phi}} [\Omega] \quad (3.14)$$

Resistência do secundário:

$$R_s = \frac{R\%}{200} \cdot Z_b = \frac{R\%}{200} \cdot \frac{V_{slinha}^2}{S_{3\phi}} [\Omega] \quad (3.15)$$

Ou simplesmente:

$$R_s = \frac{R_p}{\alpha^2} [\Omega] \quad (3.16)$$

3.3.1.1.7 Potência de curto-circuito

A potência de curto-circuito é estimada com base nas perdas no primário e secundário do transformador.

$$R_{cc} = R_p \cdot I_{np}^2 + R_s \cdot I_{ns}^2 [W] \quad (3.17)$$

3.3.1.1.8 Reatância do primário e secundário (X_p, X_s)

A reatância do primário e do secundário são obtidas considerando o triângulo das impedâncias, utilizando os valores de impedância e resistência, encontrados nos itens 3.3.1.1.5 e 3.3.1.1.6.

Reatância do primário:

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} [\Omega] \quad (3.18)$$

Reatância do secundário:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} [\Omega] \quad (3.19)$$

3.3.1.1.9 Indutância do primário e secundário (L_p, L_s)

A indutância no primário e secundário são calculadas com base nos valores encontrados no item 3.3.1.1.8 e frequência da rede, através da equação abaixo:

$$X = \omega \cdot L[H] \quad (3.20)$$

$$\omega = 2\pi f = 377 \quad (3.21)$$

Indutância do primário:

$$L_p = \frac{X_p}{377} \cdot 1000[mH] \quad (3.22)$$

Indutância do secundário:

$$L_s = \frac{X_s}{377} \cdot 1000[mH] \quad (3.23)$$

Os valores foram calculados em mH pois o parâmetro de entrada do ATPDraw para indutância é dado em mH.

3.3.1.1.10 Resistência de magnetização (R_{mag})

O ramo de magnetização representa as perdas no ferro e a resistência de magnetização é obtida com a tensão nominal do lado onde o transformador foi energizado no ensaio e a potência à vazio.

$$L_{mag} = \frac{V^2}{P_0}[\Omega] \quad (3.24)$$

3.3.1.1.11 Fluxo de magnetização (λ_0)

O fluxo concatenado no ramo de magnetização em regime permanente é dado por:

$$\lambda_s = \frac{V}{4,44 \cdot f}[Wb \cdot espira] \quad (3.25)$$

3.3.1.2 Parâmetros considerados para o transformador do sistema

Na Tabela 3, são mostrados os dados de entrada para realização da modelagem.

Tabela 3 – Dados de entrada

Sigla	Definição	Valor
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica	5000 kVA
V_{rp}	Tensão sobre o enrolamento primário	115 kV
V_{rs}	Tensão sobre o enrolamento secundário	4,16 kV
f	Frequência da rede	60 Hz
Z%	Impedância percentual	8%
R%	Resistência percentual	1%

Fonte: A autora.

Na Tabela 4, apresenta quais serão os dados de saída, calculados a partir dos dados de entrada da Tabela 3. Os cálculos destes parâmetros são feitos nas seções 3.3.1.1.1 à 3.3.1.1.11.

Tabela 4 – Parâmetros calculados

Sigla	Definição	Valor
α	Relação de transformação	27,67
$I_{np(Linha)}$	Corrente nominal do primário	25,10 A
$I_{ns(Linha)}$	Corrente nominal do secundário	693,93 A
I_0	Corrente à vazio (pico)	0,08 A
P_0	Potência à vazio	4000 W
Z_p	Impedância do primário	317,39 Ω
Z_s	Impedância do secundário	0,138 Ω
R_p	Resistência do primário	39,67 Ω
R_s	Resistência do secundário	0,0173 Ω
P_{cc}	Potência de curto-circuito	50009 W
X_p	Reatância do primário	314,9105 Ω
X_s	Reatância do secundário	0,1374 Ω
L_p	Indutância do primário	835,32 mH
L_s	Indutância do secundário	0,3644 mH
R_{mag}	Resistência de magnetização	3306250 Ω
λ_0	Fluxo no ramo magnetizante	431,68 Wb

Fonte: A autora.

A curva de magnetização do transformador utilizando chapa de aço silício de grãos orientados da Acesita é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Curva de magnetização do transformador

H [A/m]	B[T]	I_{pico} [A]	λ_{pico} [Wb]
6,684	0,20	0,012810	53,96
11,099	0,40	0,021271	107,920
17,729	0,80	0,033978	215,841
23,805	1,20	0,045623	323,761
31,495	1,40	0,060361	377,721
64,166	1,60	0,122975	431,682
136,311	1,70	0,261242	458,662
946,842	1,85	1,814637	499,132
7419,427	2,00	14,219442	539,602
30000	2,10	57,495446	566,582

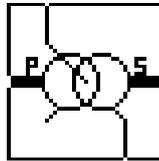
Fonte: A autora.

3.3.1.3 O transformador no ambiente de simulação

O modelo de transformador utilizado na simulação é denominado SATTRAFO, é um modelo de transformador não ideal.

Na Figura, 11 é apresentado o modelo do transformador.

Figura 11 – Modelo do transformador



Fonte: ATPDraw, 2003.

Os parâmetros calculados na subseção 3.3.1.1 são inseridos na tela mostrada na Figura 12. Também deve ser adicionada alguns pontos da curva de saturação do transformador, como mostrado na Figura 13.

Os parâmetros calculados são inseridos na janela mostrada na Figura 12 com as unidades de medida solicitadas pelo *software*.

Figura 12 – Parâmetros de entrada

	Prim.	Sec.
U [V]		
R [ohm]		
L [mH,ohm]		

NODE	PHASE	NAME
P	3	
S	3	
Sat	3	
P-N	1	
S-N	1	
T	3	
T-N	1	

Fonte: ATPDraw, 2003.

O transformador utilizado na simulação é um transformador saturável, portanto é necessário inserir também os dados da curva de saturação do transformador.

A janela onde são inseridos os pontos da curva de saturação é mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Pontos da curva de saturação

I [A]	Fluxlinked [wb-T]
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.
0.	0.

Fonte: ATPDraw, 2003.

Após inserir todas as informações requeridas, o transformador é modelado no ATP-Draw.

3.3.2 Modelagem de condutores

Os condutores utilizados na modelagem são do modelo ZT trifásico, que são modelos de linhas com parâmetros distribuídos.

3.3.2.1 Estimativas dos parâmetros

Para modelagem dos condutores utilizando o modelo ZT é necessário que os parâmetros de resistência, indutância e capacitância por fase sejam conhecidos, assim como esses valores considerando o efeito do acoplamento magnético entre as fases. Para o circuito simulado, o acoplamento entre fases foi desconsiderado por possuir pouca influência no circuito estudado.

Na Tabela 6 são mostrados os parâmetros necessários para modelagem dos condutores.

Tabela 6 – Parâmetros para modelagem dos condutores.

Parâmetro	Notação	Unidade
Resistência	R	Ω
Indutância	L	mH
Capacitância	C	nF

Fonte: A autora.

As impedâncias dos condutores que conectam o secundário do transformador aos nós são descritas na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros dos condutores utilizados.

Trecho	R_1 (ohm/km)	L_1 (mH/km)	C_1 (nF/km)	R_0 (ohm/km)	L_0 (mH/km)	C_0 (nF/km)
646	0,17	1,2	9,697	0,23	5,48	6,00
645	0,17	1,2	9,697	0,23	5,48	6,00
671	0,193	0,442	143,00	1,93	5,48	143,00

Fonte: A autora.

3.3.2.2 Os condutores no ambiente de trabalho

Para modelagem dos condutores no ATPDraw é necessário inserir os parâmetros calculados através dos dados da Tabela 6. A janela para inserção dos valores é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de entrada para uma linha ZT

Component: LINEZT_3.SUP

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R/I+	0	IN1	3	
R/I0	0	OUT1	3	
A+	0			
A0	0			
B+	0			
B0	0			
I	0			
ILINE	0			

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide
 Lock
 \$Vintage,1

LINE Z-T OK Cancel Help

Fonte: ATPDraw, 2003.

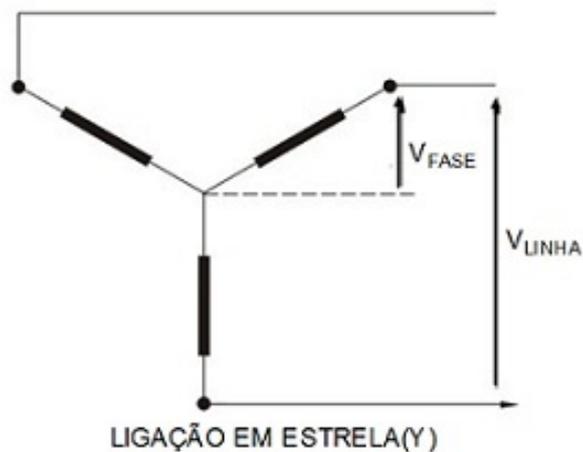
3.3.3 Modelagem de cargas

As cargas conectadas aos alimentadores do sistema em estudo são trifásicas e o tipo de ligação pode ser em delta ou estrela.

3.3.3.1 Estimativa dos parâmetros básicos de uma carga trifásica em estrela

Figura, 15 é representada uma carga trifásica conectada em estrela.

Figura 15 – Conexão em estrela



Fonte: (ALEXANDER; SADIKU, 2008)

Cálculo da corrente de linha:

$$I = \frac{S}{V_L \sqrt{3}} < \pm \theta \quad (3.26)$$

O ângulo de defasagem pode ser positivo ou negativo, dependendo da característica da carga.

Cálculo da impedância:

$$Z = \frac{V_F}{I_F} = \frac{V_L}{I_L \sqrt{3}} < \pm \theta \quad (3.27)$$

As partes real e imaginária são encontradas ao realizar a transformação do valor da impedância de coordenada polar para coordenada retangular. A parte real equivale a resistência e a imaginária, à reatância.

Impedância:

$$Z = R \pm jX_L \quad (3.28)$$

Cálculo da indutância:

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (3.29)$$

3.3.3.2 Estimativa dos parâmetros básicos de uma carga trifásica em delta

Figura, 16 é representada uma carga trifásica conectada em delta.

Figura 16 – Conexão em delta



Fonte: (ALEXANDER; SADIKU, 2008)

Cálculo da potência ativa:

$$P = S \cdot \cos \theta \quad (3.30)$$

Cálculo da potência ativa:

$$Q = S \cdot \text{sen}\theta \quad (3.31)$$

Cálculo da resistência por fase:

$$R = \frac{V_L^2}{P} \quad (3.32)$$

Cálculo da reatância indutiva por fase:

$$X_L = \frac{V_L^2}{Q} \quad (3.33)$$

Cálculo da indutância:

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (3.34)$$

Cálculo da corrente de linha:

$$I = \frac{S}{V_L \cdot \sqrt{3}} \quad (3.35)$$

Na Tabela 8 são mostrados os parâmetros das cargas utilizadas na simulação.

Tabela 8 – Parâmetros das cargas

Modelo da carga e	$R_A[\Omega]$	$L_A[mH]$	$R_B[\Omega]$	$L_B[mH]$	$R_C[\Omega]$	$L_C[mH]$
$\Delta - 646$	168	26,5	168	26,5	168	26,5
Y - 645	65,61	13,53	65,61	13,53	65,61	13,53
$\Delta - 671$	100,78	15,86	100,78	18,36	100,78	18,36

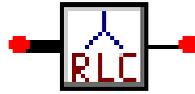
Fonte: A autora.

No sistema original, as cargas eram distribuídas de forma desequilibrada entre as fases. Na adaptação realizada, elas foram distribuídas de forma equilibrada de forma que não contribuíssem para a existência de um grande fluxo de corrente no neutro do transformador.

3.3.3.3 As cargas no ambiente de trabalho

Após determinar os parâmetros da carga trifásica através de cálculos, os mesmos são inseridos no ATPDraw para simulação. Os componentes que representarão as cargas trifásicas são indicados nas Figuras 17 e 18.

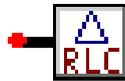
Figura 17 – Carga RLC em Y



Fonte: ATPDraw, 2003.

A carga com conexão em delta é representada pela Figura 18.

Figura 18 – Carga RLC em delta.



Fonte: ATPDraw, 2003.

E a janela para inserção dos parâmetros calculados é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Parâmetros de entrada para carga RLC em Y.

Component: RLCY3.SUP

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R_1	0	IN	3	
L_1	0	OUT	1	
C_1	0			
R_2	0			
L_2	0			
C_2	0			
R_3	0			
L_3	0			

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide
 Lock
 \$Vintage.1

OK Cancel Help

Fonte: ATPDraw, 2003.

Após inserção dos parâmetros calculados, a carga RLC é modelada no *software*.

4 SIMULAÇÕES DOS MODELOS PROPOSTOS

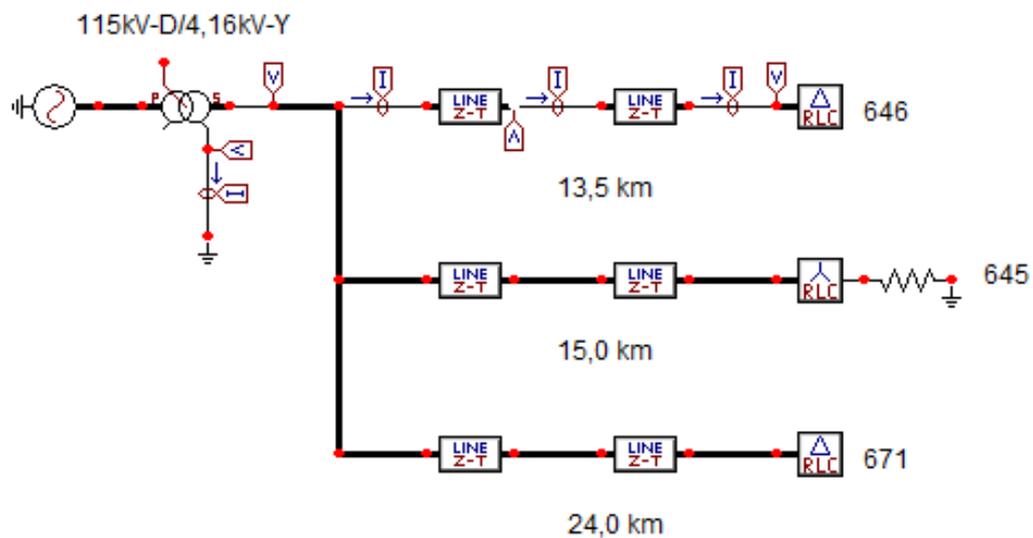
Neste capítulo são apresentadas as simulações da rede estudada em regime operação normal e sob condições de falta à terra em uma das fases. Serão apresentados os comportamentos das tensões e correntes no neutro do transformador de distribuição para algumas das topologias de aterramento apresentadas anteriormente.

4.1 Simulação da rede sob operação normal

Inicialmente foi simulado no *software* ATPDraw a rede em questão funcionando normalmente para que pudesse ser verificado o comportamento do sistema. Foram analisadas as formas de ondas de tensão e corrente no primário do transformador de distribuição, no neutro do secundário do transformador e também no ponto de ocorrência da falta monofásica.

O circuito simulado é apresentado na Figura 20.

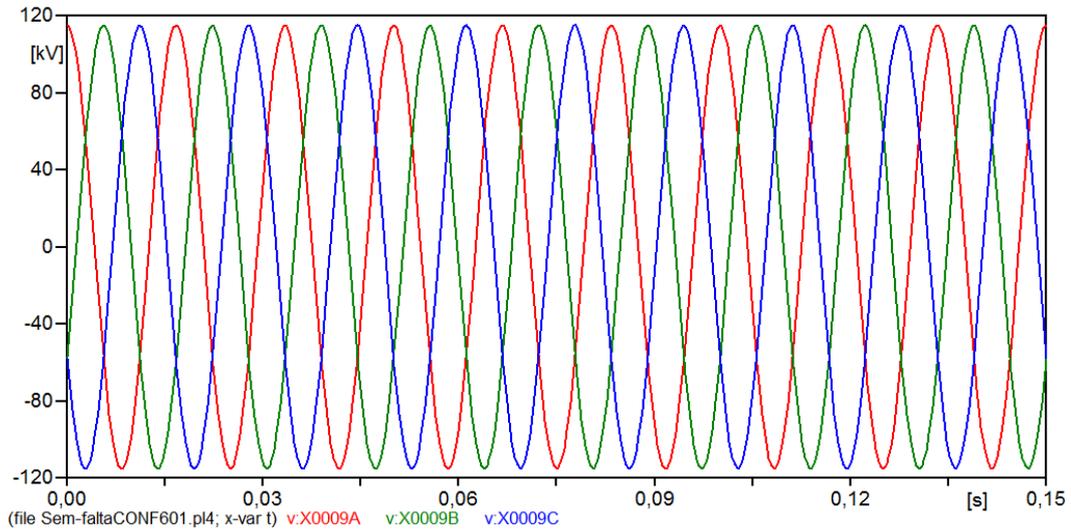
Figura 20 – Circuito simulado no ATPDraw - Operação normal.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 21, são apresentadas as tensões no primário do transformador. A fase A está em vermelho, a fase B em verde e a fase C em azul. Essa identidade de cores é seguida até o fim do trabalho.

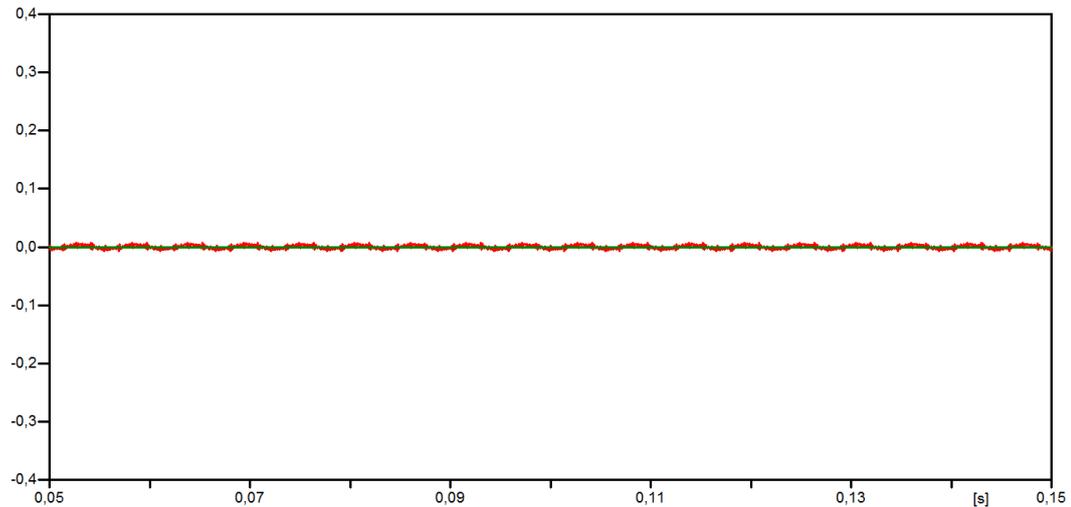
Figura 21 – Tensões de fase no primário do transformador - Operação normal



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 22, é mostrado o comportamento do aterramento do transformador de distribuição através do gráfico com corrente e tensão. A corrente é representada pela cor vermelha e a tensão, pela cor verde.

Figura 22 – Tensão e corrente no neutro do transformador - Operação normal

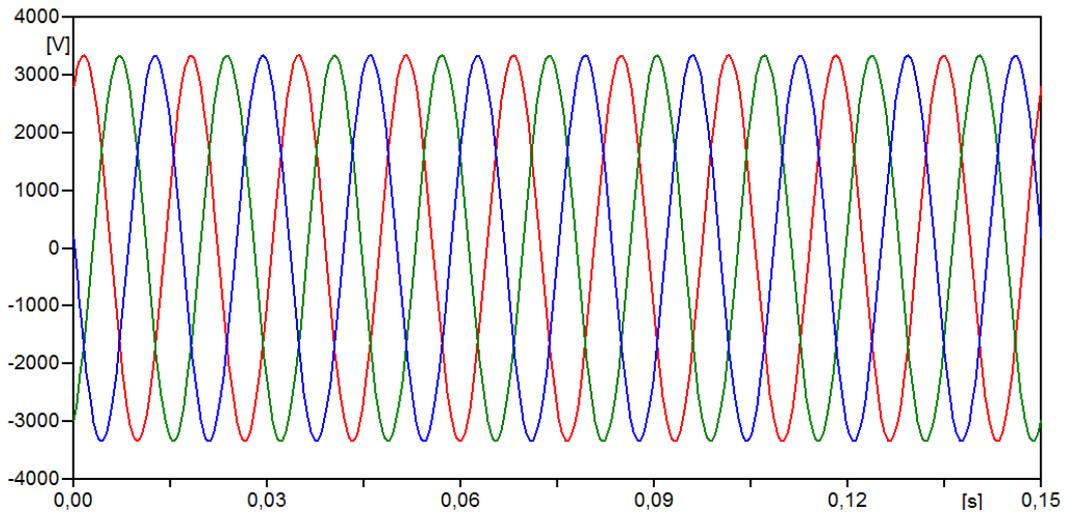


Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar uma corrente senoidal de pequena amplitude circulando no neutro do transformador.

Na figura 23, é mostrado o comportamento da tensão de entrada da carga 646.

Figura 23 – Tensão de entrada na carga 646 - Operação normal



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Simulação da rede sob transitório

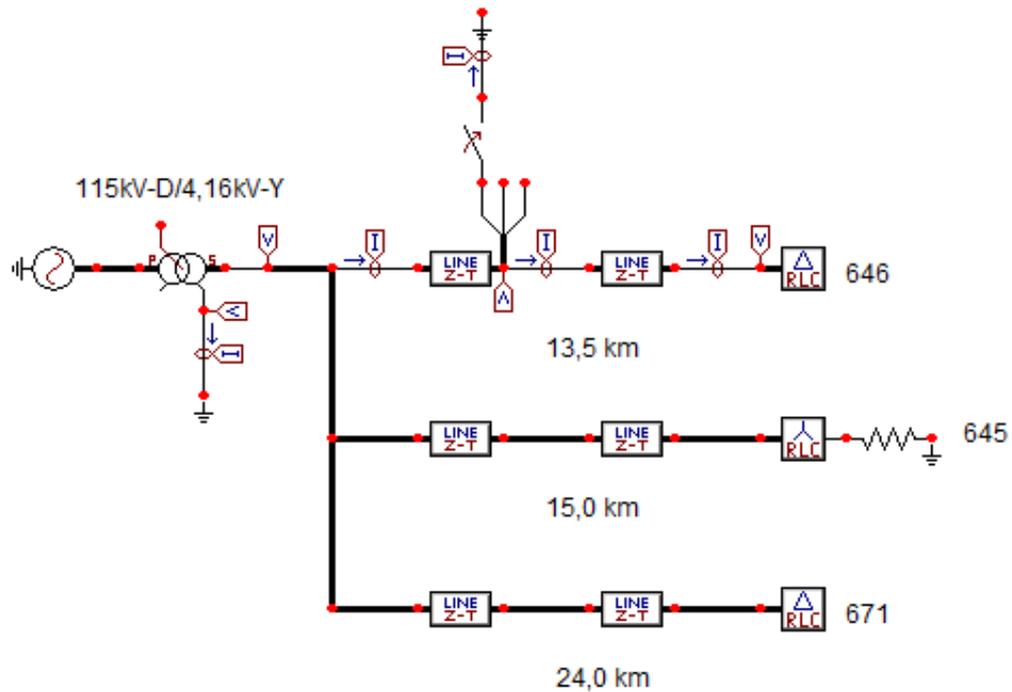
Para análise do comportamento do sistema durante uma falta fase-terra, foi adicionada uma chave que irá realizar o aterramento em uma das três fases durante um período de tempo estabelecido. O transitório inserido na rede tem duração de 40 ms e é localizado na fase C a uma distância de 8,5 km do secundário do transformador. Serão simuladas as redes com aterramento sólido, aterramento flutuante, aterramento por resistência e aterramento ressonante.

4.2.1 Aterramento sólido

Nessa subseção é apresentado o comportamento do sistema sob falta fase-terra em uma das fases. A falta é inserida na fase C e vai de 50 ms até 90 ms, tendo 40 ms de duração. Não é adicionada qualquer impedância na conexão do neutro do transformador com o terra. Esse sistema é chamado solidamente aterrado ou aterramento sólido.

O circuito simulado para o estudo da topologia é mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento sólido.

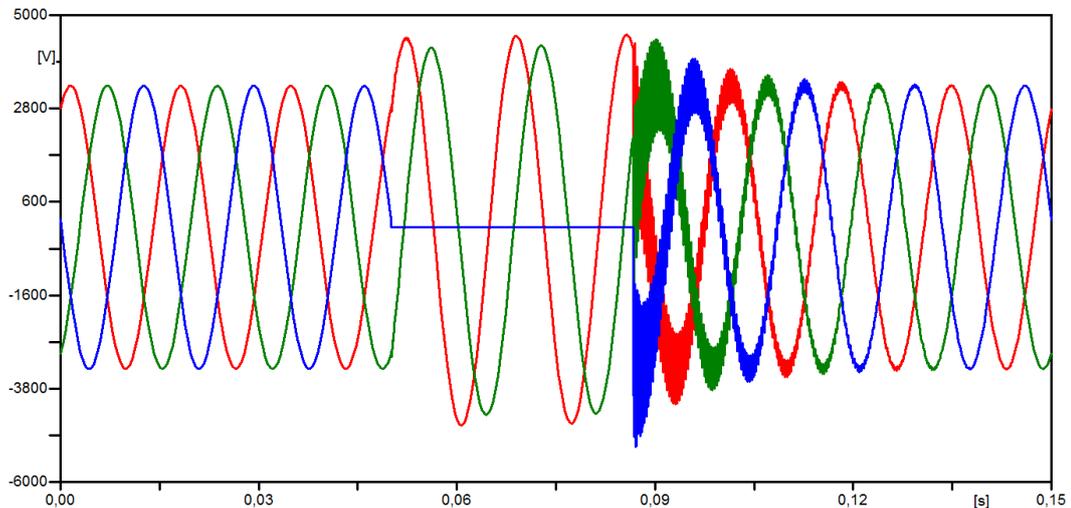


Fonte: Elaborado pela autora.

Um curto-circuito franco resulta em uma corrente de falta mais conservadora por possuir um valor significativamente mais alto, no entanto, o valor da impedância durante uma falta dificilmente é igual a zero (STEVENSON, 1986). Na simulação realizada, não é adicionada nenhuma impedância de falta portanto, apresenta a situação mais extrema.

Na Figura 25, é mostrado o gráfico que mostra o comportamento das tensões do sistema momentos antes, durante e depois da ocorrência do curto-circuito fase-terra.

Figura 25 – Tensões no ponto de falta - Aterramento sólido.

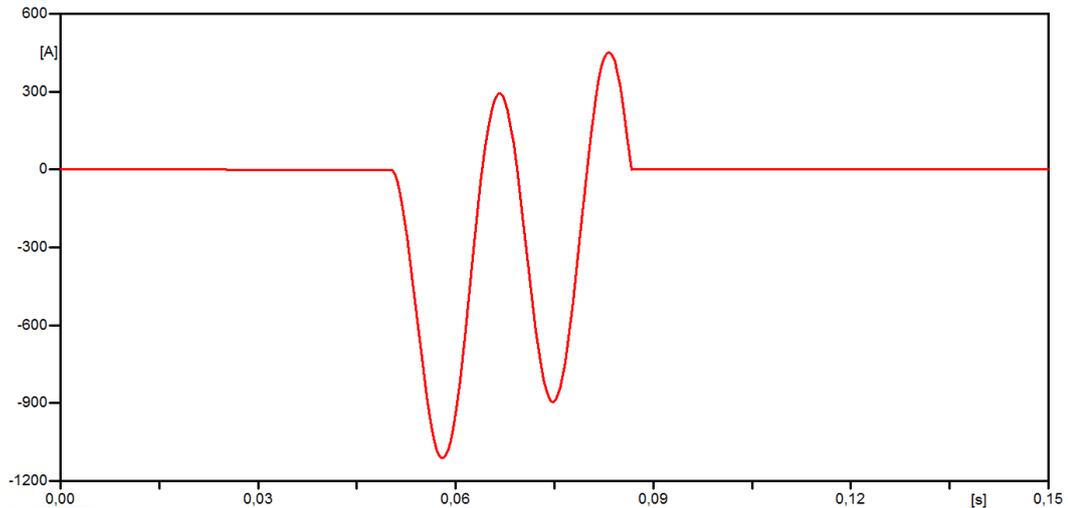


Fonte: Elaborado pela autora.

Realizando um comparativo entre os momentos em que o curto-circuito está ocorrendo e após esse momento, pode-se observar que as tensões sãs durante a falta não apresentam grandes elevações de tensão nas fases sãs.

Na Figura 26, é mostrado o comportamento da corrente de falta.

Figura 26 – Corrente de falta - Aterramento sólido.

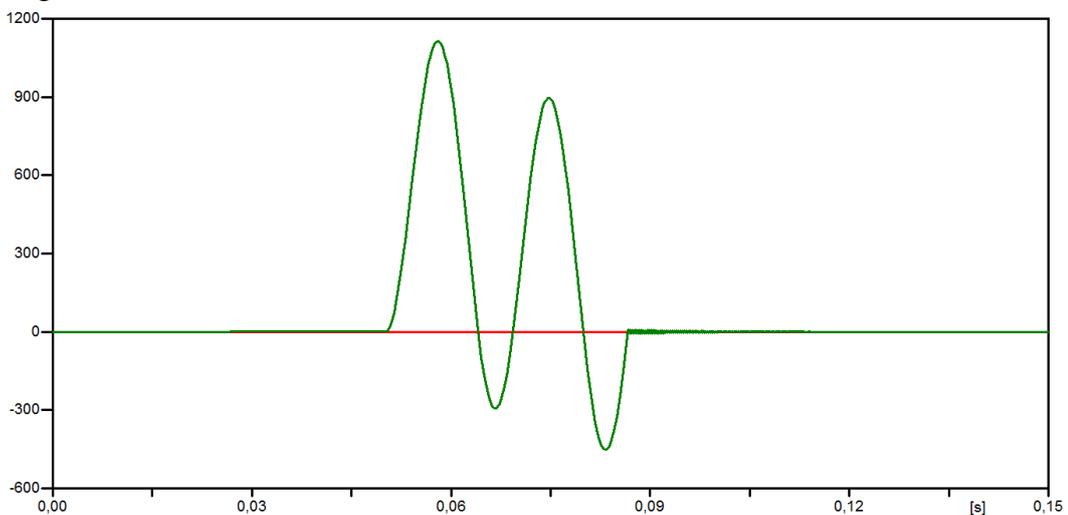


Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar uma elevada corrente de falta à terra. Essa corrente que flui através da fase defeituosa tem característica capacitiva.

Na Figura 27, é mostrado o comportamento da corrente que flui através do neutro do transformador de distribuição e da tensão neste ponto.

Figura 27 – Tensão e corrente no neutro - Aterramento sólido.



Fonte: Elaborado pela autora.

A corrente está representada pela cor verde e a tensão, pela cor vermelha.

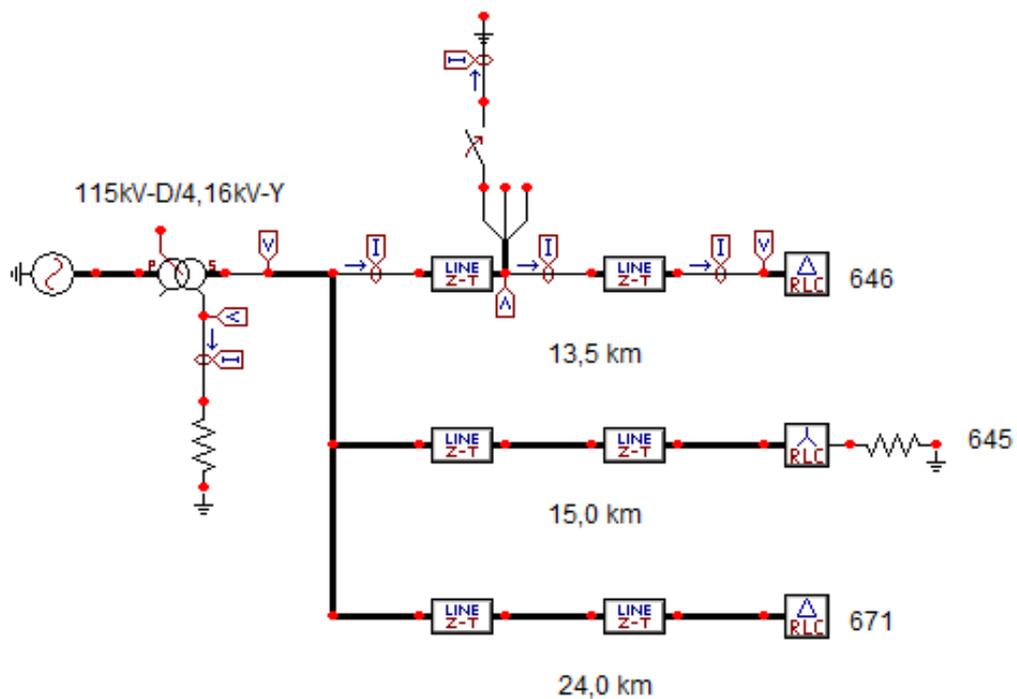
Como esperado, a corrente no neutro do transformador, representada pela cor vermelha, possui elevada magnitude durante a ocorrência da falta na fase C. Como não há nenhuma impedância entre o ponto de neutro e o terra do sistema, a tensão apresenta um valor nulo.

4.2.2 Aterramento através de resistência

Nesta subseção é apresentado o comportamento do sistema sob falta fase-terra em uma das fases. A falta é inserida na fase C e vai de 50 ms até 90 ms, tendo 40 ms de duração. O neutro do transformador de distribuição está aterrado através de uma resistência de 10Ω com o intuito de reduzir a corrente de falta..

Na Figura, 28 é mostrado o circuito que foi simulado para estudo.

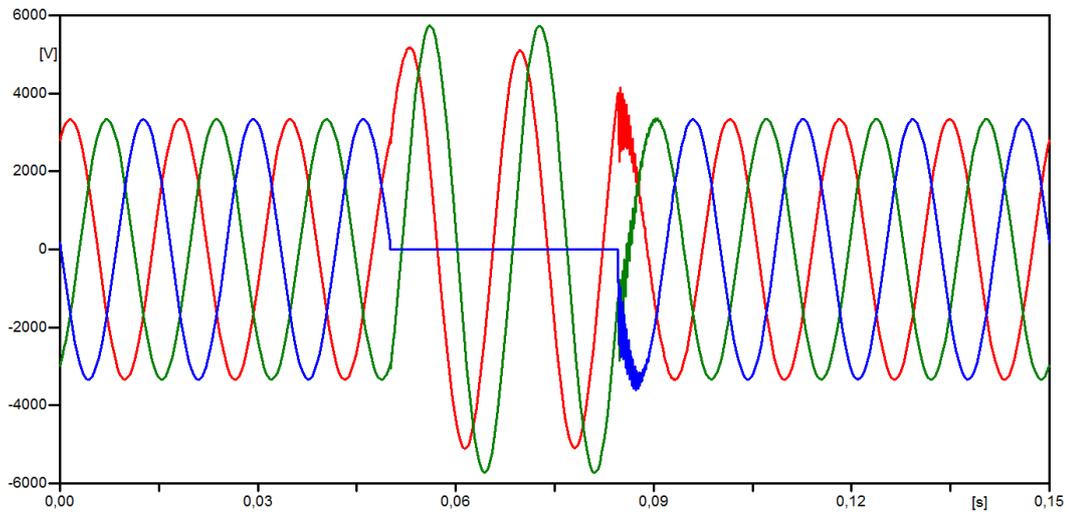
Figura 28 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento por resistência.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 29, é mostrado o comportamento das tensões no ponto de falta.

Figura 29 – Tensões no ponto de falta - Aterramento por resistência $R=10\ \Omega$.

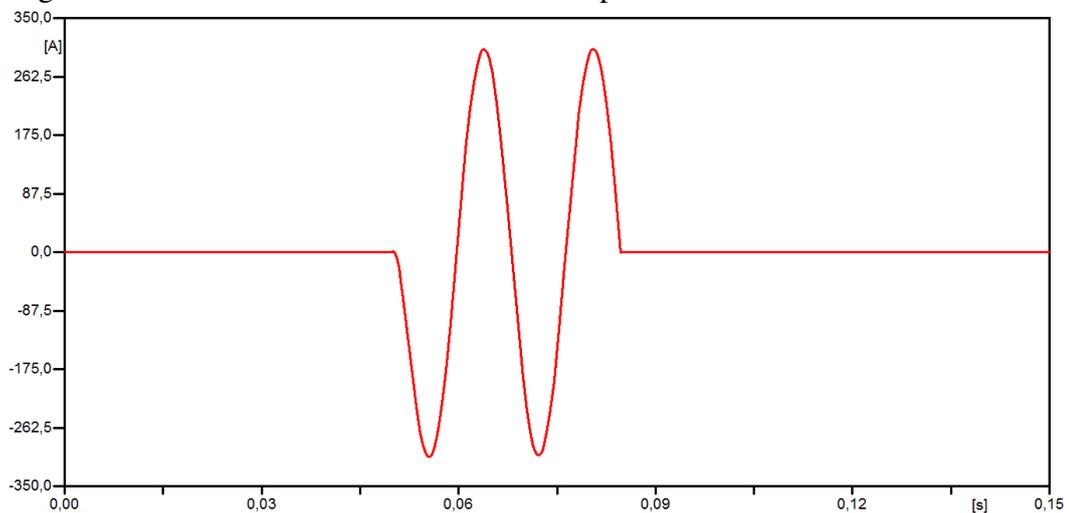


Fonte: Elaborado pela autora.

As tensões nas fases sãs durante o curto-circuito sofrem elevações de um fator aproximado de $\sqrt{3}$ devido ao deslocamento da tensão do neutro e, além disso, o sistema não é submetido a sobretensões transitórias muito elevadas.

Na Figura, 30 é mostrado o comportamento da corrente de falta.

Figura 30 – Correntes de falta - Aterramento por resistência $R=10\ \Omega$.

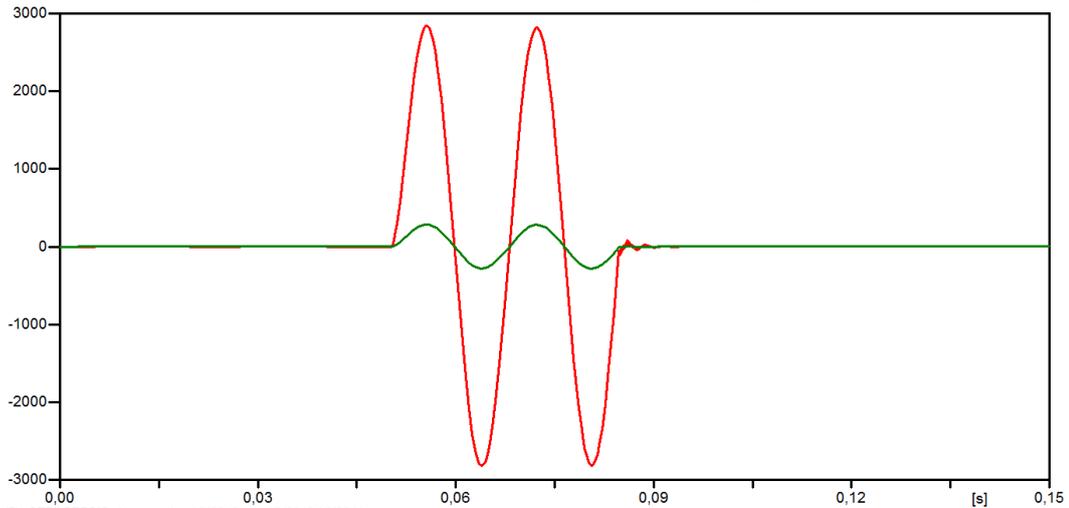


Fonte: Elaborado pela autora.

A corrente de falta é reduzida quando comparada ao aterramento sólido, o que é proposto pela topologia de aterramento através de resistência.

O comportamento do neutro do sistema é mostrado na Figura 31. A tensão no neutro do transformador de distribuição é representada pela forma de onda na cor vermelha e a corrente, na cor verde.

Figura 31 – Tensões e correntes no neutro - Aterramento por resistência.



Fonte: Elaborado pela autora.

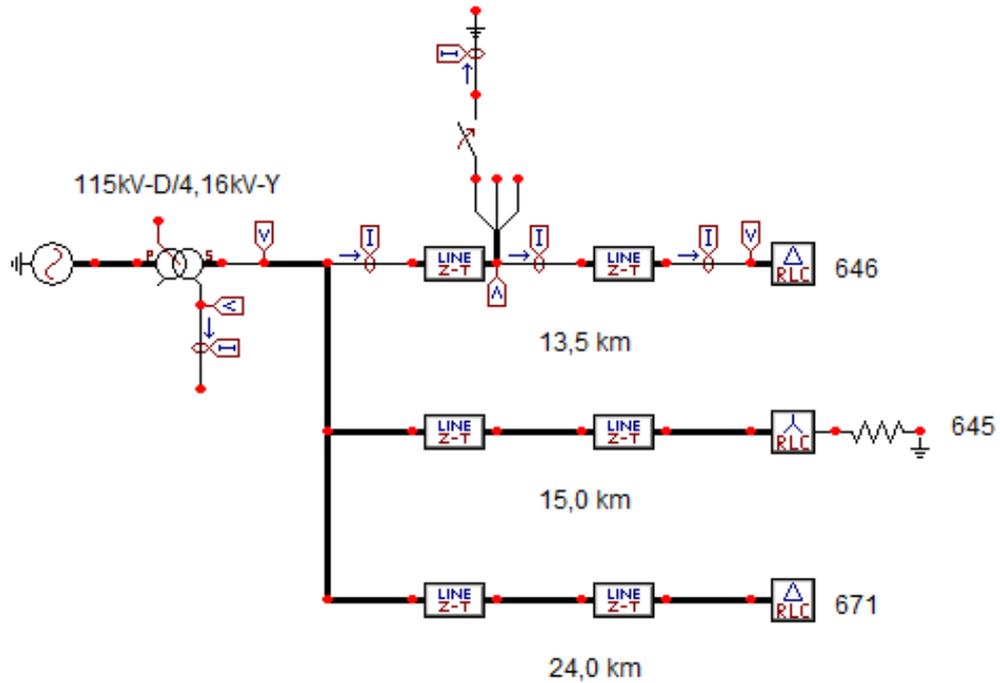
A corrente que percorre o neutro do transformador durante o curto-circuito é reduzida, no entanto, pode-se observar que a adição da resistência de 10Ω dá origem a uma sobretensão no neutro do transformador. No projeto do resistor de aterramento, além do valor de amplitude da corrente de falta, se deve atentar ao nível de sobretensão que o neutro será submetido para que não haja danos no sistema.

4.2.3 Aterramento flutuante

Nesta subseção é apresentado o comportamento do sistema sob uma condição de falta fase-terra em uma das fases. A falta é inserida na fase C e vai de 50 ms até 90 ms, tendo 40 ms de duração. Quando o neutro do transformador de distribuição não possui qualquer conexão possuindo impedância intencional com o aterramento do sistema, diz-se que o sistema é isolado ou possui aterramento flutuante. Na prática, existe uma capacitância de acoplamento ao longo do sistema e a corrente que flui através do neutro do transformador.

Na Figura, 32 é mostrado o circuito simulado para estudo.

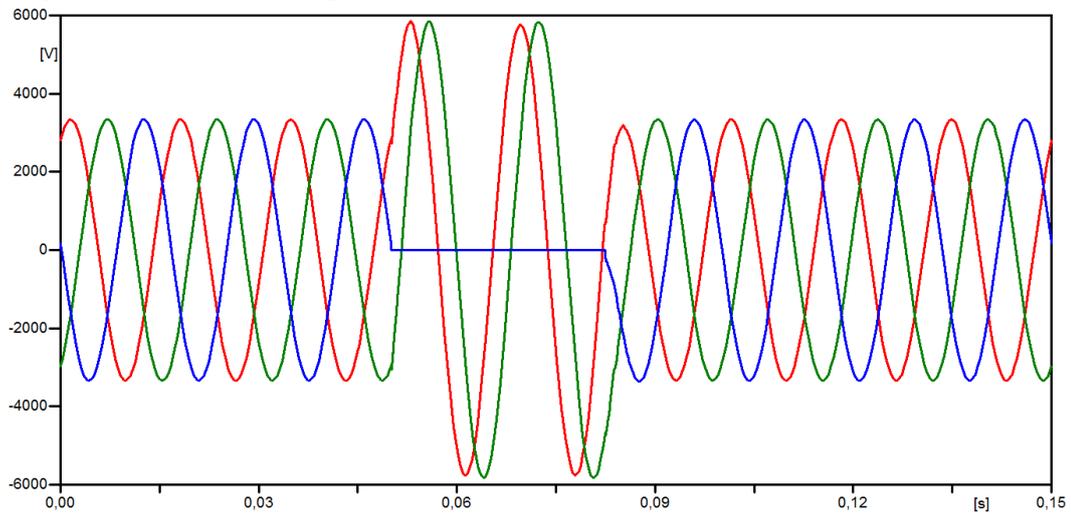
Figura 32 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento flutuante.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 33, é mostrado o comportamento das tensões no ponto de falta.

Figura 33 – Tensões no ponto de falta - Atterramento flutuante.



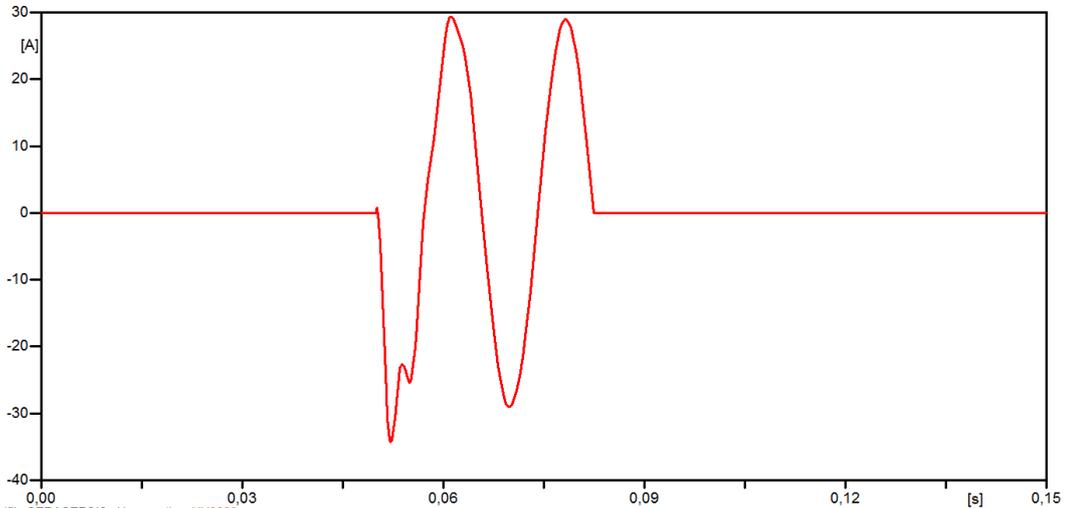
Fonte: Elaborado pela autora.

Em sistemas isolados podem ocorrer tensões transitórias elevadíssimas após o retorno da fase defeituosa, capazes de causar danos aos equipamentos e perigo de vida às pessoas do meio, explicadas pelo retorno da fase C e extinção do arco. Essa característica não se mostrou presente no sistema estudado devido ao baixo nível de curto-circuito. Durante a falta as tensões

sãs foram elevadas em um fator aproximado de $\sqrt{3}$.

Na Figura, 34 é mostrado o comportamento da corrente de falta.

Figura 34 – Correntes de falta - Aterramento flutuante.

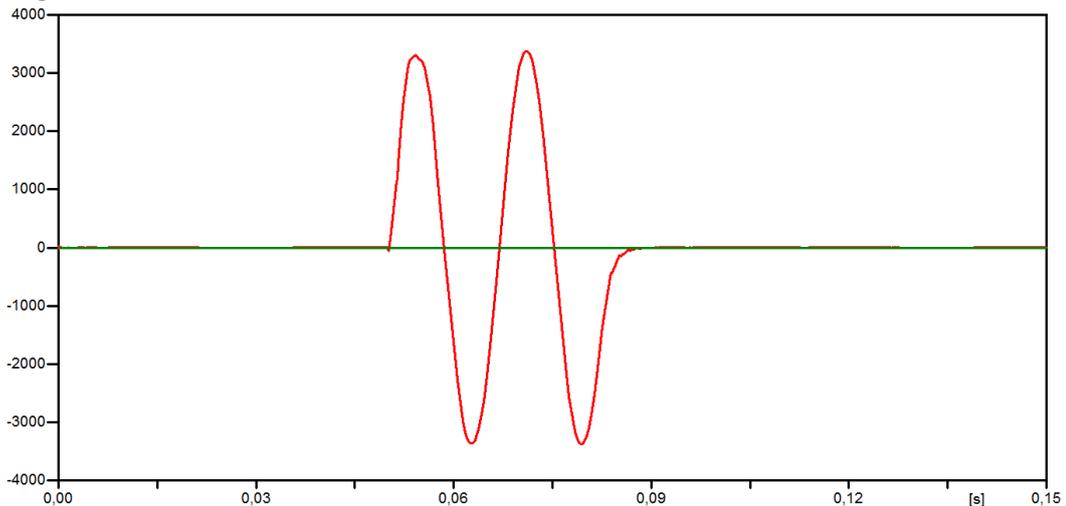


Fonte: Elaborado pela autora.

A corrente de falta não possui elevada magnitude por possuir apenas as capacitâncias de acoplamento para possibilitar a passagem de corrente.

O comportamento das correntes e das tensões no neutro do transformador é mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Tensão e corrente no neutro - Neutro isolado.



Fonte: Elaborado pela autora.

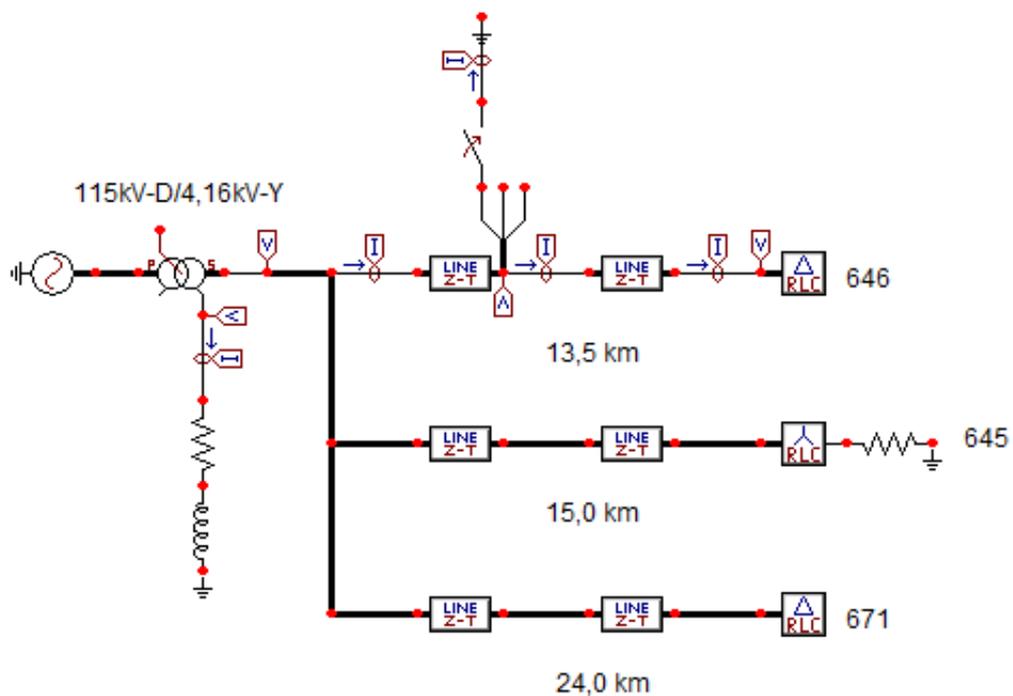
Por não possuir um condutor para que a corrente de falta flua através do neutro do transformador, seu valor é nulo. A tensão no neutro do transformador nessa topologia atinge valores elevados.

4.2.4 Aterramento ressonante

Nesta subseção, é apresentado o comportamento do sistema sob uma condição de falta fase-terra em uma das fases. A falta é inserida na fase C e vai de 50 ms até 90 ms, tendo 40 ms de duração. O neutro do transformador de distribuição possui um reator de 638 mH que realiza a compensação da corrente de falta capacitiva.

A Figura 36 mostra o circuito simulado e utilizado para estudo.

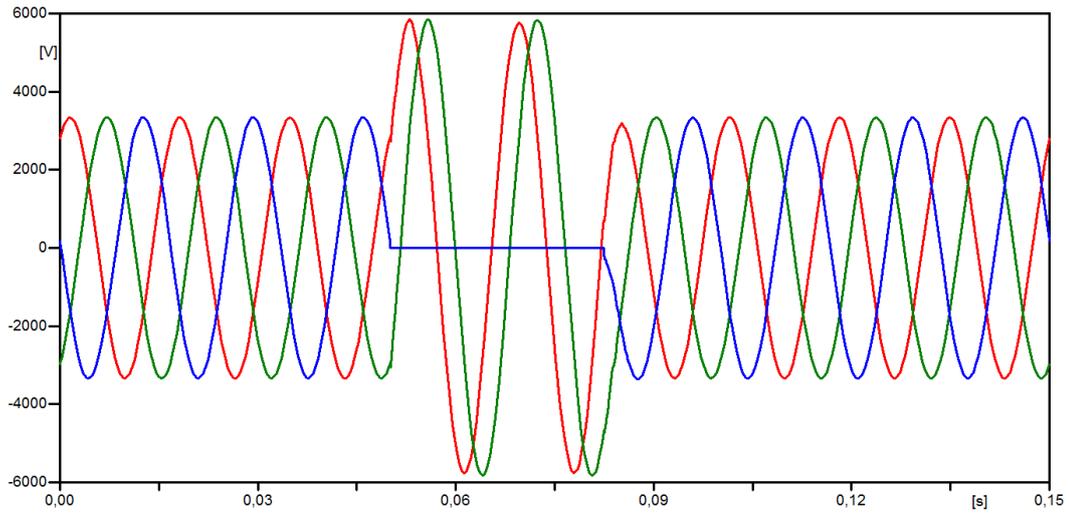
Figura 36 – Circuito simulado no ATPDraw - Aterramento Ressonante.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 37 mostra o comportamento das tensões no ponto de falta.

Figura 37 – Tensões no ponto de falta - Aterramento Ressonante.

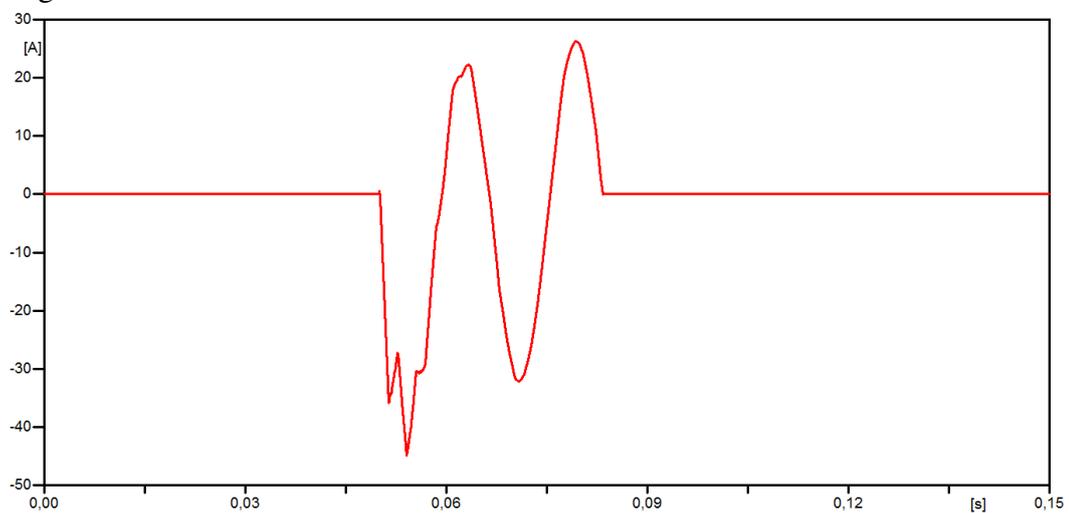


Fonte: Elaborado pela autora.

Durante a falta as tensões são elevadas em $\sqrt{3}$. Para sobretensões temporárias com curto tempo de duração, os equipamentos não sofreriam danos físicos caso possuíssem apenas isolamento fase-terra.

A Figura 38 mostra o comportamento da corrente de falta.

Figura 38 – Corrente de falta - Aterramento Ressonante.

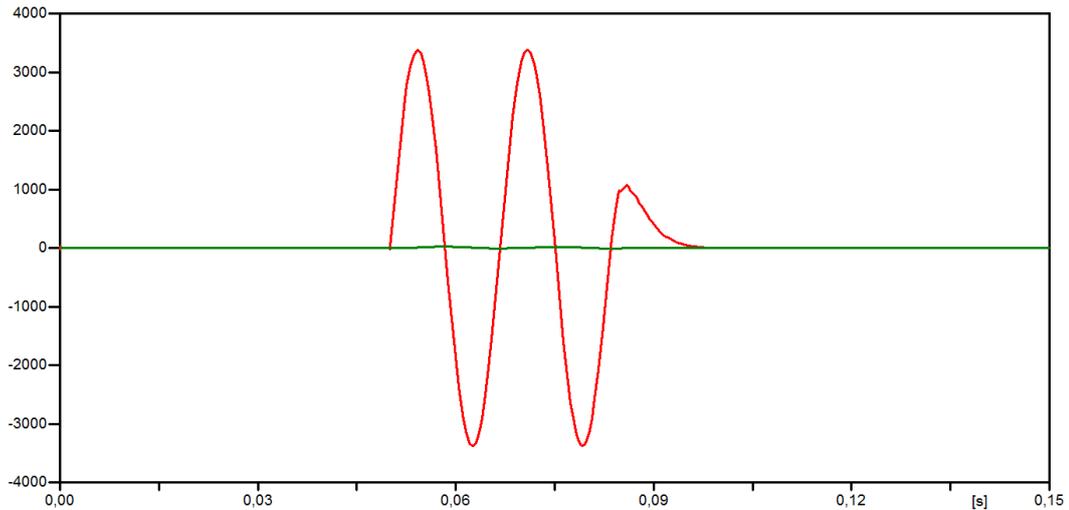


Fonte: Elaborado pela autora.

O aterramento ressonante é capaz de reduzir a corrente de curto-circuito fase-terra de forma similar aos sistemas com neutro isolado.

A Figura 39 mostra o comportamento da corrente e da tensão no neutro do transformador.

Figura 39 – Tensão e corrente no neutro - Aterramento ressonante.



Fonte: Elaborado pela autora.

A corrente que flui através do neutro do transformador é representada pela cor verde e a tensão, pela cor vermelha.

A corrente, conforme esperado, possui baixa magnitude e a tensão do neutro é elevada a um valor de tensão fase-terra durante a ocorrência do curto-circuito na fase C.

4.3 Considerações finais

A corrente de falta no sistema solidamente aterrados possui elevada magnitude e é a mesma que flui através do neutro do transformador. A tensão no neutro é nula por não possuir nenhuma impedância adicional na conexão com o terra.

Ao adicionar uma resistência na conexão e adotar a topologia de aterramento através de resistência a corrente de falta foi reduzida para aproximadamente 300 A de amplitude. Em contrapartida, a tensão no neutro do transformador já não é nula e deve ser considerada no projeto do resistor de aterramento.

No aterramento flutuante a corrente de falta é ainda menor quando comparado ao aterramento através de resistência, mas a tensão no neutro atinge valores fase-neutro e existe a possibilidade de sobretensões transitórias que poderiam danificar os equipamentos.

O aterramento ressonante surge nesse contexto reduzindo as correntes de falta à nível de um neutro flutuante, mas sem os riscos de elevadas sobretensões transitórias. Nessa topologia, assim como na anterior, a tensão no neutro atinge valores de fase-neutro e o nível de isolamento deve projetado para o nível de tensão fase-fase devido ao deslocamento do neutro durante a ocorrência do curto-circuito.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Esse trabalho apresentou a modelagem de transformador, carga e condutores de uma rede com o intuito de verificar a influência da topologia de aterramento durante a ocorrência de uma falta monofásica à terra e mostrar as vantagens obtidas ao utilizar o aterramento ressonante.

Nesse trabalho foram realizadas simulações para os sistemas com o neutro solidamente aterrado, neutro aterrado através de resistência de baixo valor, neutro flutuante e neutro aterrado através do aterramento ressonante. A modelagem dos componentes do sistema e realização das simulações foram feitas no ATPDraw.

As simulações permitiram constatar que a topologia de aterramento ideal depende de qual característica o sistema deve priorizar. Nos casos em que a segurança pessoal e o controle de sobretensões são valorizadas, o aterramento ressonante vem como solução. Através da inserção de um reator no neutro do transformador de distribuição sincronizado com a capacitância total fase-terra do sistema é possível obter resultados positivos nesses aspectos. A corrente de falta à terra é reduzida consideravelmente quando comparada ao aterramento sólido, por exemplo.

No sistema solidamente aterrado foi verificado que as tensões nas fases são durante a ocorrência do curto-circuito não sofrem deslocamento, no entanto as correntes de faltas são elevadas, podendo ser maior que a corrente de curto-circuito trifásica, o que implica na alta dissipação de energia durante as faltas, danos térmicos e dinâmicos nos equipamentos e é necessária interrupção no fornecimento de energia para isolamento da área defeituosa.

No sistema isolado, apesar de não ser necessária a interrupção no fornecimento de energia e não haver risco de dano nos equipamentos causados pelas correntes de falta, há uma grande dificuldade de localização da falta e possibilidade de ocorrência de sobretensões transitórias que podem chegar até 8 vezes o valor nominal de tensão. Também é importante salientar que por haver deslocamento das tensões, o custo com a isolação dos equipamentos é aumentado por ser necessária um isolamento no nível de tensão fase-fase.

Os sistemas aterrados por resistência vieram como uma alternativa aos sistemas solidamente aterrados, limitando as correntes de falta para que os equipamentos não sofressem danos térmicos e dinâmicos e utilizando as filosofias de proteção usuais para localização e atuação. No entanto os equipamentos ainda têm que possuir isolação no nível fase-fase devido à elevação das tensões durante a ocorrência da falta.

O aterramento ressonante combina correntes de falta reduzidas à níveis baixos e redução do risco de sobretensões transitórias. Como desvantagens pode-se observar que há uma sobretensão no neutro do transformador de distribuição devido à alta impedância do reator utilizado para compensação da corrente de falta capacitiva e também se faz necessária a adequação do sistema de proteção através da utilização de funções de neutro sensível e sobretensão no neutro. No quesito segurança pessoal, essa topologia traz avanços por reduzir a possibilidade de ocorrências de acidentes devido à baixa corrente de falta.

Portanto, o trabalho possibilitou constatar que o aterramento ressonante é uma tecnologia que traz segurança e aumenta a confiabilidade das redes de distribuição por sua capacidade de auto-extinguir as faltas.

5.2 Trabalhos futuros

Como propostas para desenvolvimento futuro, tem-se:

- (a) Modelagem de uma planta industrial;
- (b) Controle automático do reator para ajuste quando houver alterações na rede original.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. São Paulo - SP: McGraw Hill, 2008. v. 3.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: 28 out. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE. **Anuário Estatístico Brasileiro dos Acidentes de Origem Elétrica**.: Ano base: 2018. Salto, SP, 2019. 79 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-1:2013**: Transformadores de potência. parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro - RJ, 2010. 95 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751:2013**: Sistemas de aterramento de subestações - requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2013. 47 p.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**: 5ª edição. Porto Alegre - RS: AMGH Editora Ltda., 2013.
- CNI. **Dois terços das indústrias têm prejuízos com falha no fornecimento de energia elétrica**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2XBQxl5>>. Acesso em: 28 out. 2018.
- COSTA, P. F. **Aterramento do neutro dos sistemas de distribuição brasileiros: Uma proposta de mudança** 1995. 141 f. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.
- COSTA, P. F. Aterramento de sistemas elétricos industriais de média tensão com a presença de cogeração. **Revista O Setor Elétrico**, v. 105, n. 1, p. 60–65, 2014.
- EPUSP. **Introdução à eletromecânica e automação**: Transformadores - teoria. São Paulo - SP: Departamento de Engenharia de Energia e Automação, 2014.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 13 Node Test Feeder**: Test feeder cases. New York, NY - USA, 1992. 11 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 142:2013**: Ieee recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. New York, USA, 2007. 225 p.
- JUNIOR, I. G. C. **Aterramento do ponto neutro das redes de distribuição através de bobina ressonante**. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- LOURO, M. F. N. M. **O sistema de proteções na perspectiva da segurança de pessoas em redes de MT**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- MARDEGAN, C. **Proteção e Seletividade em sistemas elétricos industriais**. [São Paulo - SP]: Atitude Editorial, 2012.

NUNES, A. A. **Contribuição para a adaptação da coordenação de isolamento de sistemas solidamente aterrados para a utilização plena da bobina de Petersen.** 2017. 150 f. Tese (Doutorado) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Sistemas Elétricos de Potência, Universidade Federal de Itajubá, 2017.

PANIAGO, E. L. **Dispositivo para monitoramento, registro e análise dos indicadores de continuidade no fornecimento da energia elétrica** 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2006.

REIS, A.; ROSENTINO, A. J. P.; CAIXETA, D.; SANTILIO, F.; CUNHA, G. H. B.; GONDIN, I. N.; BARBOSA, J. A. F.; REZENDE, P. H. O.; SILVA, T. V. **Curso de ATPDraw.** [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2012. v. 1.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência.** São Paulo - SP: McGraw Hill, 1986. v. 2.

TEIXEIRA, F. B.; PAULINO, J. O. S.; ÁVILA, A. F. Estudo da migração para o aterramento ressonante nas redes de distribuição. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, IV, n. 1, p. 1–6, 2012.

ÁVILLA, A. F.; ARAÚJO, A. E. A.; CARDOSO, E. N.; PAULINO, J. O.; COSTA, P. F. Aterramento do neutro dos transformadores de subestações de distribuição de 138 kv - um estudo de engenharia. **SNPTEE: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, XIX SNPTEE, n. 1, p. 1–8, 2007.