



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTONIO MARCOS FERNANDES FILHO

DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA O CÁLCULO DE  
FALTAS SIMULTÂNEAS NA MESMA LOCALIDADE COM MODELAGEM EM  
COMPONENTES SIMÉTRICAS

MOSSORÓ

2019

ANTONIO MARCOS FERNANDES FILHO

DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA O CÁLCULO DE  
FALTAS SIMULTÂNEAS NA MESMA LOCALIDADE COM MODELAGEM EM  
COMPONENTES SIMÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Potência.

Orientador: Adriano Aron Freitas de Moura,  
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Fd            Fernandes Filho, Antonio Marcos.

                  Desenvolvimento de circuitos equivalentes para o cálculo de faltas simultâneas na mesma localidade com modelagem em componentes simétricas / Antonio Marcos Fernandes Filho. - 2019.

                  82 f. : il.

                  Orientador: Adriano Aron Freitas de Moura.

                  1. Componentes Simétricas. 2. Curto-circuito.  
3. Faltas simultâneas. 4. Circuito equivalente. I. de Moura, Adriano Aron Freitas, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas

da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTONIO MARCOS FERNANDES FILHO

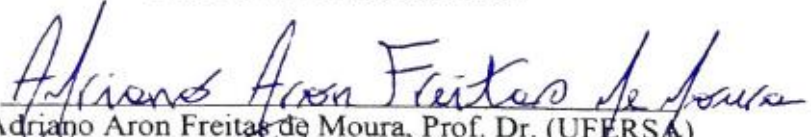
DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA O CÁLCULO DE  
FALTAS SIMULTÂNEAS NA MESMA LOCALIDADE COM MODELAGEM EM  
COMPONENTES SIMÉTRICAS

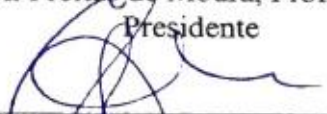
Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

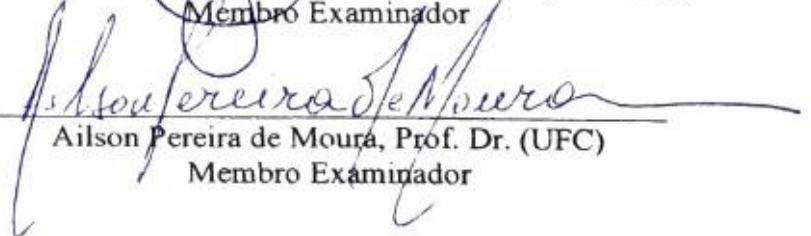
Linha de Pesquisa: Sistemas de Potência.

Defendida em: 25 / 02 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

  
Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)  
Presidente

  
Idalmir de Souza Queiroz Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

  
Ailson Pereira de Moura, Prof. Dr. (UFC)  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, o Senhor de tudo, que nos deu a vida e que sempre me ajuda a vencer todas as adversidades. Que o Senhor continue me abençoando, me dando força e sabedoria.

A minha esposa, Vitória Caroline Carvalho do Nascimento, o meu muito obrigado por estar na minha vida a 9 anos fazendo de momentos simples do cotidiano um sonho real. Obrigado pelo apoio sempre, eu a amo muito!

Deixo meu muito obrigado especial aos meus pais, Antonio Marcos Fernandes e Maria Açucena de Souza Fernandes, como também ao meu irmão Manoel Phellipe de Souza Fernandes que com todo seu amor incondicional estiveram todo tempo ao meu lado. Sei que sempre poderei contar com vocês, obrigado por muitas vezes fazerem os meus sonhos mais importantes que o de vocês. Obrigado por todo o apoio, carinho e dedicação. Eu amo vocês!

Ao meu orientador Adriano Aron Freitas de Moura, meu obrigado mais que especial por toda a atenção dedicada à elaboração deste trabalho.

Esse trabalho é de todos aqueles que de alguma forma estiveram presentes. Meu muito obrigado!

## RESUMO

Este trabalho apresenta as equações e novos circuitos equivalentes em componentes simétricas para o cálculo de faltas simultâneas, ou seja, diferentes combinações de duas faltas em uma mesma localidade. As componentes simétricas podem ser usadas para o cálculo de tensões e de correntes em sistemas elétricos equilibrados e desequilibrados a partir da decomposição em três sistemas equilibrados (formados por componentes de sequência zero, positiva e negativa), e, além disso, têm como uma das principais aplicações o cálculo de correntes de curtos-circuitos. Assim como na literatura clássica de análise de sistemas de potência há circuitos equivalentes para o cálculo das faltas trifásica, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, é possível, também, – a partir da teoria de componentes simétricas e da análise de circuitos – desenvolver circuitos equivalentes para curtos-circuitos simultâneos, como um duplo curto fase-terra (fase B e fase C), um duplo curto fase-fase (fases AB e AC), um curto fase-terra e fase-fase-terra (fase A e fases BC), etc. Após a obtenção de cada um dos novos circuitos equivalentes, realizou-se a demonstração da aplicabilidade analítica dos modelos desenvolvidos, por meio de uma exemplificação didática em um sistema com poucas barras. Os modelos desenvolvidos foram validados através da comparação entre os resultados obtidos a partir dos circuitos equivalentes e a saída do *software* comercial ANAFAS. Foram encontradas evidências que o circuito equivalente da falta fase-terra e fase-fase pode substituir os circuitos equivalentes de duas faltas tradicionais (falta fase-terra e falta bifásica). Por fim, é proposta a integração dos modelos desenvolvidos na teoria de curto-circuito.

**Palavras-chave:** Componentes simétricas. Curto-circuito. Faltas simultâneas. Circuito equivalente.

## ABSTRACT

This work presents new equations and new equivalent circuits in symmetrical components for the calculation of simultaneous faults, that involves two faults which occurs simultaneously. The symmetrical components can be used for the calculation of voltages and currents in balanced and unbalanced electrical systems, from the decomposition into three balanced systems (sequences zero, positive and negative), moreover one of the main applications is the calculation of fault currents and voltages. As in the classical power systems analysis literature there are equivalent circuits for the calculation of faults like three phase, single line to ground, line to line and line to line to ground, it's also possible to develop equivalent circuits for simultaneous fault, like double single line to ground (phase A), double line to line (phases AB and AC), single line to ground and line to line to ground (phases A and BC) and single line to ground and line to line (phases A and BC), etc. After obtaining each of the new equivalent circuits, the demonstration of the analytical applicability of the developed models was made through a didactic example in a small system. For the validation of the models developed, a comparison was made between the results obtained from the equivalent circuits and the output of commercial software ANAFAS. Finally, it is proposed the integration of the models developed in short-circuit theory.

**Keywords:** Symmetrical components. Short-circuit. Simultaneous fault. Equivalent circuits.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação gráfica das componentes simétricas.....	19
Figura 2: Representação de um gerador trifásico equilibrado aterrado através de $Z_n$ .....	22
Figura 3: Redes de sequência para um gerador trifásico equilibrado. (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa.....	23
Figura 4: Carga elétrica ligada em estrela com aterramento através de $Z_n$ . ....	23
Figura 5: Redes de sequência para uma carga equilibrada ligada em estrela com aterramento através de $Z_n$ . (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa. ....	24
Figura 6: Redes de sequência positiva e negativa para um transformador trifásico.....	25
Figura 7: Redes de sequência zero para um transformador trifásico ligado em diferentes configurações.....	25
Figura 8: Diagrama equivalente da falta FFF em componentes de fase.....	28
Figura 9: Circuito equivalente da falta FFF em componentes simétricas. ....	30
Figura 10: Diagrama equivalente da falta FT em componentes de fase.....	31
Figura 11: Circuito equivalente da falta FT em componentes simétricas. ....	32
Figura 12: Diagrama equivalente da falta FF em componentes de fase.....	33
Figura 13: Circuito equivalente da falta FF em componentes simétricas. ....	34
Figura 14: Diagrama equivalente da falta FFT em componentes de fase. ....	35
Figura 15: Circuito equivalente da falta FFT em componentes simétricas. ....	36
Figura 16: Diagrama equivalente da falta D-FT em componentes de fase. ....	39
Figura 17: Conexão de ramos de acordo com a Equação 4.4.....	41
Figura 18: Malha (a) obtida a partir da Equação 4.9, (b) a partir da Equação 4.13. ....	41
Figura 19: Circuito equivalente da falta D-FT em componentes simétricas. ....	41
Figura 20: Diagrama equivalente da falta D-FF em componentes de fase.....	42
Figura 21: Conexão que representa termo negativo das Equações 4.31 e 4.32.....	44
Figura 22: Circuito equivalente da falta D-FF em componentes simétricas. ....	44
Figura 23: Diagrama equivalente da falta FT-FFT em componentes de fase. ....	45
Figura 24: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = 0$ ) em componentes de fase.....	47
Figura 25: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em componentes de fase. ....	48
Figura 26: Circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em componentes simétricas.....	49
Figura 27: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = Z_f$ ) em componentes de fase. ....	50
Figura 28: Circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = Z_c$ ) em componentes simétricas. ....	50



Figura 29: Diagrama equivalente da falta FT-FF em componentes de fase.....	51
Figura 30: Conexão que satisfaz a Equação 4.65. ....	52
Figura 31: Malha referente a Equação 4.66.....	53
Figura 32: Malha referente a Equação 4.68.....	53
Figura 33: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \neq Z_c$ ) em componentes simétricas.....	54
Figura 34: Diagrama equivalente da falta FT-FF ( $Z_c = 0$ ) em componentes de fase. ....	55
Figura 35: Diagrama equivalente da falta FT-FF ( $Z_f$ ) em componentes de fase.....	55
Figura 36: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_c \rightarrow \infty$ ) em componentes simétricas.....	56
Figura 37: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \rightarrow \infty$ ) em componentes simétricas. ....	57
Figura 38: Interface do <i>software</i> ANAFAS.....	59
Figura 39: Sistema de potência teste 1. ....	61
Figura 40: Arquivo de dados do sistema teste 1.....	62
Figura 41: Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.....	63
Figura 42: Circuito de sequência positiva para o sistema teste 1. ....	66
Figura 43: Circuito de sequência zero para o sistema teste 1.....	67
Figura 44: Redes de sequência de Thévenin vistas da barra 5 do sistema teste 1. (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa.....	68
Figura 45: Aplicação do circuito equivalente da falta D-FT em estudo de caso.....	68
Figura 46: Aplicação do circuito equivalente da falta D-FF em estudo de caso. ....	69
Figura 47: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em estudo de caso. .	70
Figura 48: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = Z_c$ ) em estudo de caso. ....	70
Figura 49: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \neq Z_c$ ) em estudo de caso ..	71
Figura 50: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_c \rightarrow \infty$ ) em estudo de caso...	72
Figura 51: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \rightarrow \infty$ ) em estudo de caso..	72
Figura 52: Resultados obtidos a partir do ANAFAS.....	73
Figura 53: Comparativo entre faltas clássicas e faltas simultâneas.....	75
Figura 54: Relatório de impedância de barras obtido a partir do ANAFAS. ....	77
Figura 55: Arquivo de dados do ANAFAS para o sistema IEEE 14 barras.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais identidades envolvendo o operador $\alpha$ .....	19
Tabela 2: Motivos de ocorrência de curto-circuito em sistemas elétricos de potência. ....	26
Tabela 3: Dados do sistema de potência 1.....	61
Tabela 4: Dados e significados para interpretação do arquivo de dados.....	62
Tabela 5: Comparativo entre os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de sequência – Sistema teste 1 (barra 5).....	74
Tabela 6: Comparativo entre os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de fase – Sistema teste 1 (barra 5).....	74
Tabela 7: Faltas clássicas calculadas na barra 5 do sistema teste 1.....	75
Tabela 8: Comparativo entre resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos, aliado a rotação de componentes de sequência e o ANAFAS – Sistema teste 1 (barra 5). ....	76
Tabela 9: Comparativo entre resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de sequência – Sistema teste 2 (barra 5).....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
D-FF	Duplo(a) Fase-Fase
D-FT	Duplo(a) Fase-Terra
Dr	Doutor
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FF	Fase-Fase
FFF	Trifásico(a)
FFT	Fase-Fase-Terra
FLUPOT	Fluxo de Potência Ótimo
FT	Fase-Terra
FT-FF	Fase-Terra e Fase-Fase
FT-FFT	Fase-Terra e Fase-Fase-Terra
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PacDyn	Análise e Controle de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas de Potência
SAPRE	Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Problema.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Hipótese do trabalho .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Geral .....	15
1.3.2 Específicos.....	15
<b>1.4 Justificativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Estado da arte .....</b>	<b>16</b>
<b>2. Componentes simétricas.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Teorema de Fortescue .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Representação dos principais componentes do SEP .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Geradores trifásicos .....	21
2.2.2 Carga em estrela com aterramento por impedância.....	23
2.2.3 Transformadores trifásicos .....	24
<b>3. Curtos-circuitos em SEPS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Cálculo das correntes de curto-circuito.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Falta trifásica (FFF).....	28
3.1.2 Falta fase-terra (FT).....	30
3.1.3 Falta fase-fase (FF).....	32
3.1.4 Falta fase-fase-terra (FFT).....	34
<b>3.2 Rotação de componentes de sequência .....</b>	<b>36</b>
<b>4. MODELAGEM DE CURTOS CIRCUITOS SIMULTÂNEOS .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Dupla falta fase-terra (D-FT) .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Dupla falta fase-fase (D-FF).....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT) .....</b>	<b>45</b>

4.3.1 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_f = 0$ e $Z_c \neq 0$ .....	46
4.3.2 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_f \neq 0$ e $Z_c = 0$ .....	47
4.3.3 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_c = Z_f$ .....	49
<b>4.4 Falta monofásica-terra e bifásica (FT-FF) .....</b>	<b>51</b>
4.4.1 Falta simultânea FT através de impedância e FF franco ( $Z_c = 0$ ).....	54
4.4.2 Falta simultânea FT franco ( $Z_f = 0$ ) e FF através de impedância .....	55
4.4.3 Falta FT através de impedância ( $Z_c \rightarrow \infty$ ).....	56
4.4.4 Falta FF através de impedância ( $Z_f \rightarrow \infty$ ).....	57
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>59</b>
5.1 <i>Software</i> comercial ANAFAS.....	59
5.2 Estudo de caso.....	60
5.2.1 Sistema teste 1 .....	60
5.2.2 Sistema teste 2 .....	62
5.3 Metodologia de validação dos modelos.....	63
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
6.1 Sistema teste 1: procedimento de cálculo de faltas simultâneas.....	65
6.2 Sistema teste 1: Resultados comparativos .....	73
6.2.1 Comparativo com faltas clássicas.....	75
6.2.2 Rotação de fases .....	75
6.3 Sistema teste 2: Resultados comparativos .....	76
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE A – ARQUIVO DE DADOS: SISTEMA IEEE 14 BARRAS .....</b>	<b>83</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Problema**

De acordo com Anderson (1995), um dos problemas mais complexos na área de curto-circuito em SEP envolve duas ou mais faltas que ocorrem simultaneamente em uma mesma localidade, como um duplo curto-circuito monofásico. Em Moura, Lopes, De Moura (2015) é apresentada uma modelagem para o curto-circuito simultâneo monofásico (com impedância de falta) e bifásico (sem impedância de falta, franco) na mesma barra.

Dessa forma, o problema no qual deseja-se resolver trata-se do cálculo de diferentes combinações de faltas tradicionais a partir de metodologia análoga à utilizada nos curtos-circuitos monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico. Ou seja, a partir de um circuito equivalente que associa os circuitos de sequência positiva, negativa e zero, determinar os valores de tensões e de correntes de falta no domínio das componentes simétricas.

### **1.2 Hipótese do trabalho**

Pretende-se calcular os seguintes curtos-circuitos simultâneos: duplo curto-circuito fase-terra nas fases B e C, duplo curto-circuito fase-fase nas fases AB e AC, curto-circuito fase-terra na fase A e fase-fase-terra nas fases BC, e curto-circuito fase-terra na fase A e fase-fase nas fases BC. Para isto, será utilizada a teoria das componentes simétricas e da análise de circuitos elétricos. Ao fim do trabalho pretende-se obter e validar os novos modelos para o cálculo dos curtos-circuitos simultâneos citados, bem como, demonstrar a aplicação dos métodos desenvolvidos através de exemplificação didática.

### **1.3 Objetivos**

### 1.3.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a modelagem de curtos-circuitos simultâneos em componentes simétricas e, com isso, contribuir para a teoria de curto-circuito, a partir do desenvolvimento de circuitos equivalentes em componentes simétricas que descrevem o fenômeno de várias combinações de curtos-circuitos tradicionais.

### 1.3.2 Específicos

- Estudar a modelagem de faltas *shunt* abordada na literatura clássica de análise de sistemas de potência;
- Estudar as metodologias de cálculo de curtos-circuitos simultâneos contidas em livros e artigos;
- Especificar as condições de curto em componentes de fase para cada um dos casos de curto-circuito simultâneo analisado;
- Aplicar o Teorema de Fortescue e obter as condições de curto em componentes simétricas para diferentes curtos-circuitos simultâneos em uma mesma barra;
- Utilizar as funcionalidades do *software* comercial ANAFAS relacionadas ao cálculo de curtos-circuitos simultâneos para a realização de uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos modelos desenvolvidos e a saída do ANAFAS para um sistema de pequeno porte (5 barras) e, também, para um sistema mais robusto (IEEE 14 barras);
- Apresentar a metodologia de cálculo analítico de curtos-circuitos simultâneos, a partir dos modelos desenvolvidos em um sistema de potência didático.

## 1.4 Justificativa

Além de fundamental ao crescimento econômico, a importância da energia elétrica no setor residencial também é indiscutível. Sem esta, atividades comuns e de grande facilidade realizadas cotidianamente se tornariam de grande complexidade e em condições bastante limitadas. Em caso de problemas na rede elétrica que resultem, mesmo

que em um pequeno intervalo de tempo, em falta de energia elétrica, se torna evidente essa relação de dependência.

Diante deste cenário, os SEPs devem garantir um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Contudo, interrupções no fornecimento de energia elétrica são recorrentes e podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos, que podem resultar em grandes prejuízos (SILVA, 2003), como os curtos-circuitos.

Dessa forma, o estudo de curto-circuito é um dos tópicos mais importantes da grande área de sistemas elétricos de potência, juntamente com fluxo de carga, estabilidade, entre outros; sendo a determinação das correntes de falta, um parâmetro essencial de dimensionamento de equipamentos elétricos, principalmente, tratando-se da proteção de sistemas elétricos (DAS, 2002).

Além dos estudos sobre faltas clássicas do tipo *shunt*, há a possibilidade de duas ou mais faltas ocorrerem simultaneamente em uma mesma localidade, sendo este um problema bastante complexo na área de cálculo de curtos-circuitos em SEPs. Normalmente, apenas duas faltas são consideradas nestes estudos, uma vez que a probabilidade de ocorrência combinada de duas faltas já é bastante remota (ANDERSON, 1995).

Diante disso, a obtenção de um circuito elétrico equivalente com modelagem a partir de componentes simétricas, de modo que satisfaça as condições de falta do fenômeno estudado, permite a solução para o cálculo de correntes de curtos simultâneos que ocorrem em uma mesma barra de um SEP, a partir da teoria de análise de circuitos. Ou seja, serão desenvolvidos novos modelos que permitem calcular adequadamente, e analiticamente, variáveis de um problema complexo.

## 1.5 Estado da arte

Em 1918, Charles LeGeyt Fortescue publicou o artigo intitulado “*Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks*”, apresentando o método das componentes simétricas à comunidade científica. Este artigo foi selecionado



por profissionais de engenharia de sistemas de potência como o trabalho mais impactante na área de SEPs do século XX (FEHR, 2015).

A literatura clássica de análise de faltas em SEPs contém a modelagem, a partir de circuitos equivalentes, dos seguintes tipos de faltas: falta trifásica (FFF), falta monofásica-terra ou fase-terra (FT), falta bifásica ou fase-fase (FF) e falta bifásica-terra ou fase-fase-terra (FFT). Os circuitos equivalentes para o cálculo das faltas citadas são obtidos a partir da interligação das redes de sequência zero, positiva e negativa.

Em Roy e Rao (1982) foi desenvolvido um método computacional para o cálculo de faltas simultâneas acontecendo em diferentes localidades (barras) de um SEP. Neste artigo foram simulados estudos de casos em que, simultaneamente, ocorria uma falta *shunt* em um trecho e um rompimento ou abertura de um condutor (falta série) em outro trecho. Em Anderson (1995) é proposto o cálculo de curtos-circuitos simultâneos a partir de uma metodologia envolvendo quadripolos. Em Bualoti, *et al.* (1996) é proposto um método generalizado para o cálculo de faltas simultâneas, também envolvendo faltas *shunt* e faltas série; porém, com a possibilidade de simular um número ilimitado de faltas simultâneas.

Em Bermúdez, *et al.* (2009), é utilizada uma formulação convencional em componentes simétricas para o cálculo de múltiplas faltas simultâneas. Neste artigo, toda a metodologia de cálculo é desenvolvida no domínio das componentes de sequência, fazendo uso de manipulação de matrizes clássicas.

Em Moura, Lopes, De Moura (2015) é desenvolvido um novo modelo para o cálculo da ocorrência simultânea de uma falta fase-terra através de impedância na fase A e uma falta fase-fase franca nas fases B e C. O diferencial deste trabalho é a utilização de uma metodologia clássica, análoga à utilizada para a obtenção dos modelos equivalentes no cálculo de faltas constantes nos livros clássicos, permitindo o cálculo analítico da falta simultânea.

## 2. COMPONENTES SIMÉTRICAS

O método das componentes simétricas, desenvolvido por Charles LeGeyt Fortescue em 1918, trata-se de uma técnica poderosa para análise de sistemas elétricos de potência trifásicos e desequilibrados (GLOVER; SARMA, 2012). Esta técnica foi apresentada em um encontro do “*American Institute of Electrical Engineers*”, e, a partir de então, o método das componentes simétricas tornou-se objetivo de estudo de muitos artigos e pesquisas experimentais (STEVENSON, 1974).

A principal vantagem desta técnica consiste no fato de que, quando a mesma é aplicada a sistemas elétricos equilibrados, obtêm-se circuitos equivalentes no domínio das componentes simétricas, conhecidos como redes de sequência, separados em três circuitos desacoplados. Já para sistemas desequilibrados, as redes de sequência são conectadas apenas nos pontos de desequilíbrio, facilitando a análise de sistemas de potência (GLOVER; SARMA, 2012).

As principais aplicações do método das componentes simétricas são a resolução de redes trifásicas simétricas e equilibradas com um ponto de desequilíbrio, análise de curtos-circuitos típicos, do tipo *shunt*, e curtos-circuitos do tipo série (abertura homopolar e bipolar) (ROBBA, 1996).

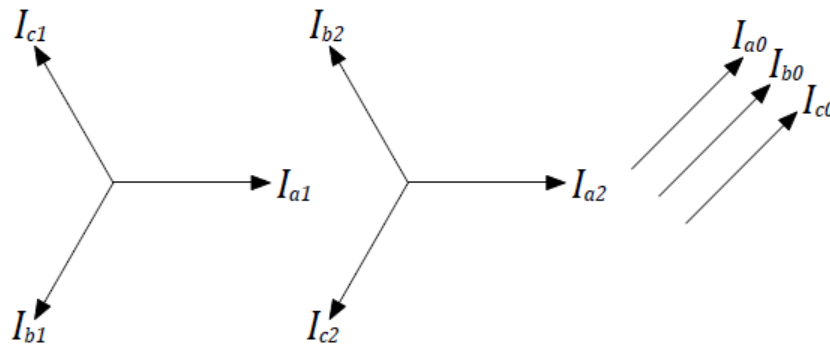
### 2.1 Teorema de Fortescue

De acordo com o teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados, ou equilibrados, de um sistema trifásico podem ser decompostos em três sistemas equilibrados de fasores (STEVENSON, 1974). São estes:

- Componentes de sequência positiva: Consistem em três fasores de mesmo módulo, defasados  $120^\circ$  entre si, mantendo a mesma sequência de fase dos fasores originais;
- Componentes de sequência negativa: Consistem em três fasores de mesmo módulo, defasados  $120^\circ$  entre si, com sequência de fase oposta à dos fasores originais.
- Componentes de sequência zero: Consistem em três fasores de mesmo módulo em fase, ou seja, com defasagem nula entre si.

A Figura 1 representa os três conjuntos de fasores equilibrados de sequência positiva, negativa e zero. Seguindo a literatura clássica, as equações em componentes simétricas serão desenvolvidas com referência às componentes da fase A. Além disso, é válido ressaltar que os índices “0”, “1” e “2” estão relacionados às componentes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Figura 1: Representação gráfica das componentes simétricas.



Fonte: Adaptado de SAADAT, 1999.

Ao trabalhar com sistemas trifásicos é conveniente a utilização de um operador que adicione  $120^\circ$  à fase e não promova alteração do módulo de um fasor. Este operador, definido por  $\alpha$ , trata-se de um número complexo de módulo unitário e ângulo de fase de  $120^\circ$  ( $\alpha = 1\angle 120^\circ$ ). Ao multiplicar um fasor por  $\alpha$ , este é rotacionado em  $120^\circ$  no sentido anti-horário; já quando multiplica-se um fasor por  $\alpha^2$ , este é rotacionado em  $240^\circ$  no sentido anti-horário, ou ainda em  $120^\circ$  no sentido horário (GLOVER; SARMA, 2012).

As demonstrações de curtos-circuitos a partir da teoria das componentes simétricas exigem manipulação de equações contendo o operador  $\alpha$ . Por conveniência, a Tabela 1 apresenta várias combinações lineares de  $\alpha$  que poderão vir a ser utilizadas.

Tabela 1: Principais identidades envolvendo o operador  $\alpha$ .

Combinações de $\alpha$	Forma polar	Forma retangular
$\alpha^2$	$1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ$	$-\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2}$
$\alpha^3$	$1\angle 0^\circ$	1
$\alpha^4 = \alpha$	$1\angle 120^\circ$	$-\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}$
$1 + \alpha = -\alpha^2$	$1\angle 60^\circ$	$\frac{1}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}$
$1 + \alpha^2 = -\alpha$	$1\angle -60^\circ$	$\frac{1}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2}$

Continuação da Tabela 1.

$\alpha^2 + \alpha$	$1 \angle 180^\circ$	$-1$
$\alpha^2 + \alpha + 1$	$0$	$0$
$1 - \alpha$	$\sqrt{3} \angle -30^\circ$	$\frac{3}{2} - \frac{j\sqrt{3}}{2}$
$1 - \alpha^2$	$\sqrt{3} \angle -30^\circ$	$\frac{3}{2} + \frac{j\sqrt{3}}{2}$
$\alpha^2 - \alpha$	$\sqrt{3} \angle -90^\circ$	$-j\sqrt{3}$
$\alpha^2 + \frac{1}{2} = -\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \angle 90^\circ$	$\frac{j\sqrt{3}}{2}$

Fonte: Adaptado de ANDERSON, 1995.

As Equações 2.1 a 2.3 relacionam as componentes de fase (a, b e c) com as componentes de sequência (0, 1 e 2).

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad 2.1$$

$$I_b = I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} \quad 2.2$$

$$I_c = I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} \quad 2.3$$

Ou ainda, na forma matricial, conforme a Equação 2.4:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad 2.4$$

A matriz explicitada na Equação 2.5 é conhecida como “matriz de transformação das componentes simétricas”, e representada pela letra “A”.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad 2.5$$

Se as componentes de sequência forem isoladas na Equação 2.4 a partir de simples cálculo matricial, determina-se a Equação 2.6.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 2.6$$

Sendo a matriz inversa de A dada pela Equação 2.7:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad 2.7$$

Isolando cada corrente de sequência (0, 1 e 2) na Equação 2.6 obtêm-se as Equações 2.8 a 2.10.

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad 2.8$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \quad 2.9$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad 2.10$$

As equações apresentadas na seção 2.1 relacionam as componentes de fase e as componentes de sequência com referência à grandeza corrente elétrica, porém, é válido ressaltar que as mesmas relações podem, também, ser escritas em termos de tensões ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ,  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$  e  $V_{a2}$ ).

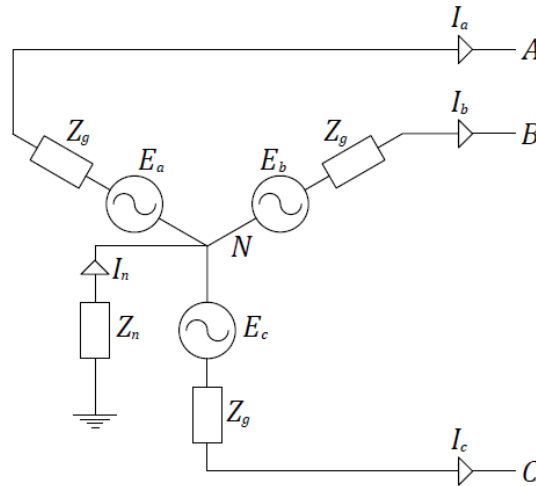
## 2.2 Representação dos principais componentes do SEP

Todos os elementos constituintes do SEP, como geradores trifásicos, cargas e transformadores (em todas as configurações), podem ser modelados a partir da teoria de componentes simétricas. As seções 2.2.1 a 2.2.3 apresentam estes modelos.

### 2.2.1 Geradores trifásicos

A Figura 2 representa um gerador trifásico equilibrado aterrado através de uma impedância  $Z_n$ . Em cada fase há uma fonte de tensão ideal conectada em série com uma impedância  $Z_g$ .

Figura 2: Representação de um gerador trifásico equilibrado aterrado através de  $Z_n$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Extraindo as equações, Equação 2.11, para cada uma das fases do modelo apresentado na Figura 2, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_g I_a \\ Z_g I_b \\ Z_g I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_n I_n \\ Z_n I_n \\ Z_n I_n \end{bmatrix} \quad 2.11$$

Dado que  $I_n = I_a + I_b + I_c$ , pode-se escrever a Equação 2.11 conforme indicado na Equação 2.12.

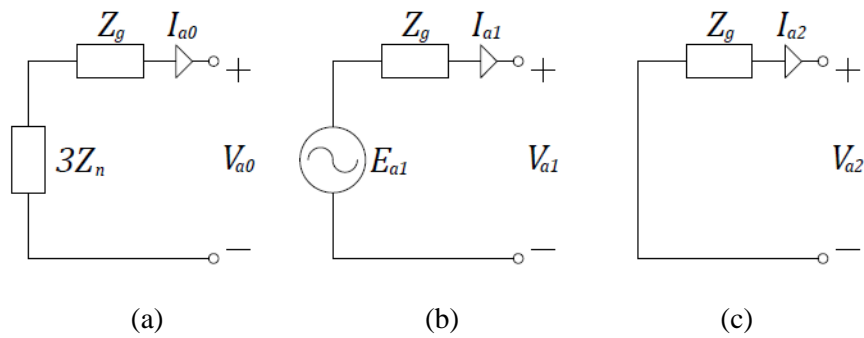
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_g + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_g + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_g + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 2.12$$

Aplicando a Equação 2.4 para converter a Equação 2.12 para o domínio das componentes simétricas e realizando algumas manipulações algébricas matriciais, obtém-se a Equação 2.13.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_g + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_g & 0 \\ 0 & 0 & Z_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad 2.13$$

As redes de sequência zero, positiva e negativa para um gerador trifásico equilibrado podem ser visualizadas, respectivamente, nas Figuras 3.a, 3.b e 3.c.

Figura 3: Redes de seqüência para um gerador trifásico equilibrado. (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa.

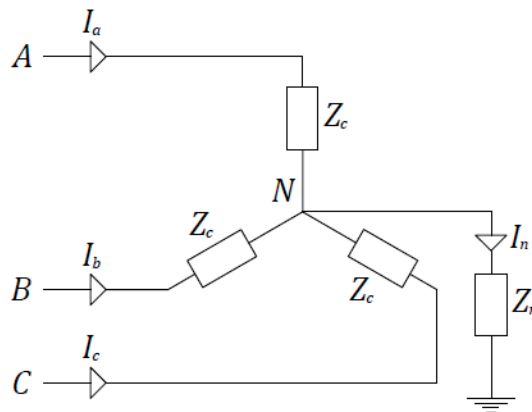


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.2 Carga em estrela com aterramento por impedância

A Figura 4 representa uma carga, conectada em estrela, com aterramento por uma impedância  $Z_n$ .

Figura 4: Carga elétrica ligada em estrela com aterramento através de  $Z_n$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do circuito indicado na Figura 4, pode-se extrair as relações apresentadas na Equação 2.14.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c I_a \\ Z_c I_b \\ Z_c I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_n I_n \\ Z_n I_n \\ Z_n I_n \end{bmatrix} \quad 2.14$$

Uma vez que  $I_n = I_a + I_b + I_c$ , através da Equação 2.14, é possível obter a Equação 2.15.

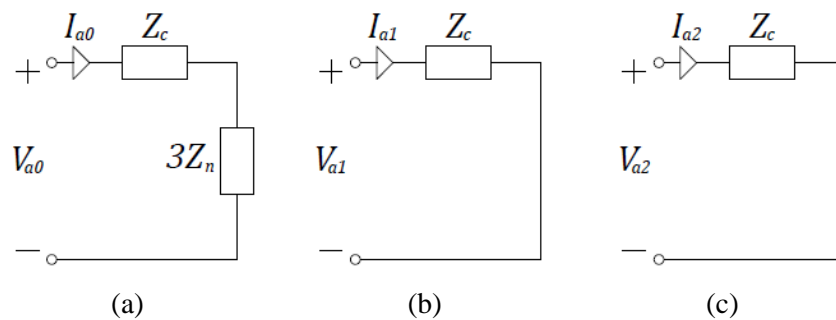
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_c + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 2.15$$

Aplicando a Equação 2.4 para converter a Equação 2.15 para o domínio das componentes simétricas e realizando algumas manipulações algébricas matriciais, obtém-se a Equação 2.16.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_c & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad 2.16$$

As redes de sequência zero, positiva e negativa para um carga equilibrada ligada em estrela e aterrada por uma impedância de neutro podem ser visualizadas, respectivamente, nas Figuras 5.a, 5.b e 5.c.

Figura 5: Redes de sequência para uma carga equilibrada ligada em estrela com aterramento através de  $Z_n$ . (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa.



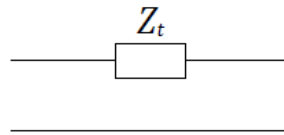
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.3 Transformadores trifásicos

A representação de transformadores trifásicos em componentes simétricas é bastante simples, no que diz respeito às sequências positiva e negativa. Em p.u., um transformador ideal pode ser representado por um curto-circuito. Porém, o modelo mais comum considera as perdas relativas ao ramo série do transformador e despreza as perdas relativas ao ramo *shunt* (RUBACK, 2016). A Figura 6 representa os circuitos de sequência positiva e negativa para um transformador trifásico com qualquer forma de ligação.



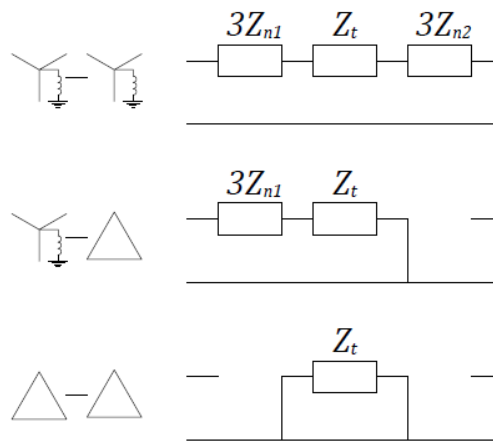
Figura 6: Redes de sequência positiva e negativa para um transformador trifásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já com relação a sequência zero, há necessidade de maior atenção na representação, uma vez que esta depende da forma com que os enrolamentos do transformador estão conectados no primário e no secundário. A Figura 7 apresenta as redes de sequência zero para um transformador considerando as três principais formas de conexão dos enrolamentos.

Figura 7: Redes de sequência zero para um transformador trifásico ligado em diferentes configurações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3. CURTOS-CIRCUITOS EM SEPS

A análise de curto-circuito deve ser realizada em sistemas de serviços públicos de energia elétrica, instalações elétricas industriais, sistemas comerciais de energia e sistemas auxiliares da central elétrica, visando garantir a segurança dos trabalhadores, bem como o público em geral, e dos equipamentos do sistema de energia, como disjuntores, barramentos, transformadores, etc. (TLEIS, 2007).

Além disso, cálculos de correntes de curto-circuito são utilizados no cálculo dos ajustes dos relés de proteção de forma a garantir uma operação precisa e coordenada. Em sistemas de transmissão, as correntes de curto-circuito devem ser rapidamente extintas para evitar a perda de sincronismo dos geradores síncronos e grandes apagões do sistema elétrico (TLEIS, 2007).

De acordo com Kindermann (1997), os principais objetivos na determinação das correntes de curto-circuito são:

- Determinação do limite suportável de elevação da temperatura em uma linha de transmissão;
- Dimensionar a seção dos contatos dos disjuntores e a capacidade disruptiva da sua câmara de extinção de arco elétrico;
- Dimensionar TCs quanto ao nível de saturação de sua curva de magnetização, uma vez que não devem saturar facilmente em caso de defeitos na rede elétrica;
- Efetuar estudo de coordenação e seletividade de equipamentos de proteção.

Ainda de acordo com Kindermann (1997), há várias possíveis causas de faltas no SEP. Visando condensar todos os motivos de ocorrência de falhas, de modo a facilitar a visualização, estes estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Motivos de ocorrência de curto-circuito em sistemas elétricos de potência.

<b>Natureza do problema</b>	<b>Motivos</b>
Isolação	Emprego de material inadequado ou de má qualidade Problemas de fabricação Envelhecimento do próprio material
Mecânico	Ventanias Poluição Galhos de árvores

Continuação da Tabela 2.

Elétrico	Descargas atmosféricas Surtos de chaveamento (manobra)
Térmico	Sobrecorrentes oriundas de sobrecarga no sistema Sobretensão dinâmica no sistema
Manutenção	Mão de obra não qualificada Peças de reposição não adequadas Mau planejamento da manutenção preventiva
Outros	Atos de vandalismo Queimadas Inundações Acidentes de qualquer natureza

Fonte: Adaptado de KINDERMANN, 1997.

### 3.1 Cálculo das correntes de curto-circuito

Para a obtenção das correntes de curto-circuito em um determinado ponto do sistema é necessária a determinação do circuito equivalente de Thévenin, obtendo redes de sequência idênticas às de um gerador operando vazio com o curto-circuito estabelecido em seus terminais (KINDERMANN, 1997).

Em Glover, Sarma (2012), são estabelecidas algumas considerações visando facilitar a determinação das correntes de curto-circuito, que, na maioria dos casos, podem ser feitas sem prejuízos significantes. São estas:

- O SEP está operando em regime permanente sob condições equilibradas no instante pré-falta;
- A corrente de carga de operação pré-falta é negligenciada, uma vez que é muito inferior quando comparada à corrente de curto-circuito;
- A resistência e a admitância *shunt* nos enrolamentos do transformador são negligenciadas;
- A admitância *shunt* de linhas de transmissão são negligenciadas;
- A resistência de saturação, saliência e saturação das máquinas síncronas são desprezadas.

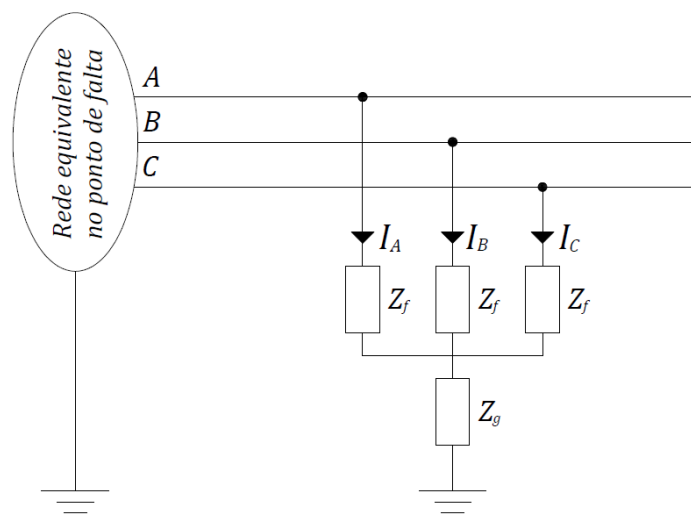
Serão estudados defeitos do tipo *shunt* nas seções 3.1.1 a 3.1.4, sendo um curto equilibrado (FFF) e três curtos desequilibrados (FT, FF e FFT). A metodologia de obtenção das equações para o cálculo do curto circuito seguirá as seguintes etapas:

- Visualização do defeito em componentes de fase a partir de um diagrama equivalente;
- Determinação das condições algébricas do curto-circuito em componentes de fase;
- Aplicação da teoria de componentes simétricas e obtenção de equações que relacionam as tensões e correntes de sequência a partir da impedância de Thévenin e da impedância de falta;
- Apresentação de circuito equivalente para o curto-circuito no domínio das componentes simétricas.

### 3.1.1 Falta trifásica (FFF)

A falta FFF é a única falta do tipo *shunt* que é equilibrada, na qual as três fases entram em contato a partir de uma impedância de falta ( $Z_f$ ) e se ligam à terra a partir da impedância de terra ( $Z_g$ ), conforme indicado na Figura 8. Normalmente é a falta mais severa e a mais simples de calcular, uma vez que depende apenas da rede de sequência positiva (ANDERSON, 1995).

Figura 8: Diagrama equivalente da falta FFF em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 8 é possível extrair as condições do curto-circuito trifásico em componentes de fase, conforme explicitado nas Equações 3.1 a 3.3.

$$V_a = Z_f I_a + Z_g (I_a + I_b + I_c) \quad 3.1$$

$$V_b = Z_f I_b + Z_g (I_a + I_b + I_c) \quad 3.2$$

$$V_c = Z_f I_c + Z_g (I_a + I_b + I_c) \quad 3.3$$

Aplicando a transformada para componentes simétricas na expressão  $I_a + I_b + I_c$ , obtém-se a equação 3.4.

$$I_a + I_b + I_c = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} \quad 3.4$$

Fatorando  $I_{a0}$ ,  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$ , tem-se a Equação 3.5:

$$I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} + (1 + \alpha + \alpha^2)I_{a1} + (1 + \alpha + \alpha^2)I_{a2} \quad 3.5$$

Sabendo que  $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$  (Tabela 1), é obtida a Equação 3.6:

$$I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \quad 3.6$$

Escrevendo as condições de curto em termos de componentes simétricas e de posse da Equação 3.6, obtêm-se as Equações 3.7 a 3.9.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + 3Z_g I_{a0} \quad 3.7$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = Z_f (I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2}) + 3Z_g I_{a0} \quad 3.8$$

$$V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} = Z_f (I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) + 3Z_g I_{a0} \quad 3.9$$

Subtraindo as Equações 3.8 e 3.9 determina-se a Equação 3.10:

$$(\alpha^2 - \alpha)V_{a1} - (\alpha^2 - \alpha)V_{a2} = Z_f (\alpha^2 - \alpha)I_{a1} - Z_f (\alpha^2 - \alpha)I_{a2} \quad 3.10$$

Dividindo ambos os membros da Equação 3.10 por  $(\alpha^2 - \alpha)$  e reorganizando-a, é obtida a Equação 3.11

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} - Z_f I_{a2} \rightarrow V_{a1} - Z_f I_{a1} = V_{a2} - Z_f I_{a2} \quad 3.11$$

Somando as Equações 3.7 e 3.8 determina-se a Equação 3.12:

$$2V_{a0} + (1 + \alpha^2)V_{a1} + (1 + \alpha)V_{a2} = Z_f (2I_{a0} + (1 + \alpha^2)I_{a1} + (1 + \alpha)I_{a2}) + 6Z_g I_{a0} \quad 3.12$$

Reorganizando a Equação 3.12 determina-se a Equação 3.13:

$$2(V_{a0} - Z_f I_{a0} - 3Z_g I_{a0}) = \alpha(V_{a1} - Z_f I_{a1}) + \alpha^2(V_{a2} - Z_f I_{a2}) \quad 3.13$$

Substituindo a Equação 3.11 em 3.13 é possível obter a Equação 3.14:

$$2(V_{a0} - Z_f I_{a0} - 3Z_g I_{a0}) = -(V_{a1} - Z_f I_{a1}) \quad 3.14$$

Por fim, soma-se as Equações 3.8 e 3.9 de forma a obter a Equação 3.15:

$$2V_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a2} = Z_f(2I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a2}) + 6Z_g I_{a0} \quad 3.15$$

Reorganizando a Equação 3.15 obtém-se a Equação 3.16:

$$2(V_{a0} - Z_f I_{a0} - 3Z_g I_{a0}) = 2(V_{a1} - Z_f I_{a1}) \quad 3.16$$

É possível constatar uma contradição entre as Equações 3.14 e 3.16 (ANDERSON, 1995), de modo que, a única forma de satisfazê-las simultaneamente é com  $I_{a0} = V_{a0} = 0$ . Logo, a partir da Equação 3.11, tem-se a Equação 3.17.

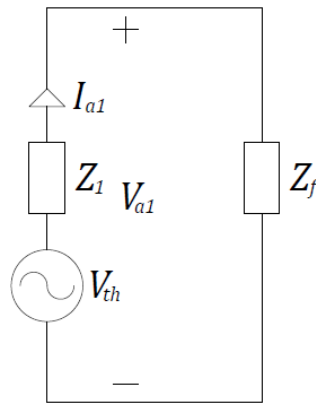
$$V_{a1} - Z_f I_{a1} = V_{a2} - Z_f I_{a2} = 0 \quad 3.17$$

Admitindo um sistema equilibrado, conclui-se que  $V_{a2} = I_{a2} = 0$ . Dessa forma, em um curto circuito trifásico há somente componente de sequência positiva. Com isso, o curto-circuito em estudo apresenta as seguintes condições de falta:

$$V_{a1} - Z_f I_{a1} = 0; I_{a0} = 0; I_{a2} = 0 \quad 3.18$$

Portanto, o circuito equivalente para o cálculo da falta trifásica equilibrada é mostrado na Figura 9.

Figura 9: Circuito equivalente da falta FFF em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

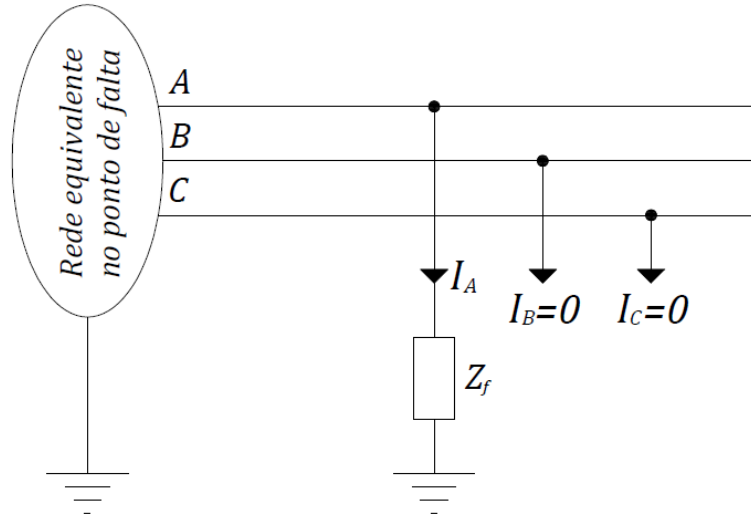
A partir do circuito indicado na Figura 9, pode-se extrair as relações apresentadas na Equação 3.19.

$$Z_1 I_{a1} + Z_f I_{a1} = V_{th} \rightarrow I_{a1} = \frac{V_{th}}{Z_1 + Z_f} \quad 3.19$$

### 3.1.2 Falta fase-terra (FT)

A falta FT, normalmente, é calculada na fase A e modelada a partir de uma impedância  $Z_F$  conectada entre a fase A e a terra, cujo diagrama é apresentado na Figura 10. No caso em que  $Z_F = 0$ , diz-se ocorrer um curto-circuito franco. Em estudos históricos apresentados em Kindermann (1997), esse tipo de curto é caracterizado por ter maior incidência no sistema elétrico, com predominância de característica temporária.

Figura 10: Diagrama equivalente da falta FT em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise apresentada na Figura 10, é possível extrair as seguintes condições de curto indicadas nas Equações 3.20 a 3.22.

$$V_A = Z_f I_A \quad 3.20$$

$$I_B = 0 \quad 3.21$$

$$I_C = 0 \quad 3.22$$

Escrevendo as condições de curto, Equações 3.20 a 3.22, em termos de componentes simétricas, obtêm-se as Equações 3.23 a 3.25.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 3.23$$

$$I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} = 0 \quad 3.24$$

$$I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} = 0 \quad 3.25$$

Ao subtrair as Equações 3.24 e 3.25, obtêm-se a Equação 3.26:

$$(\alpha^2 - \alpha)I_{a1} + (\alpha - \alpha^2)I_{a2} = 0 \rightarrow I_{a1} = I_{a2} \quad 3.26$$

Ao somar as Equações 3.24 e 3.25, tem-se a Equação 3.27:

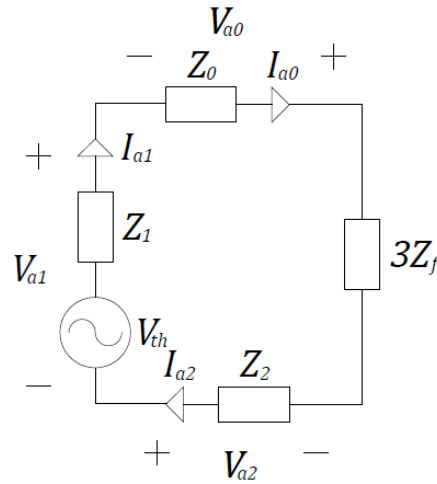
$$2I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} + (\alpha + \alpha^2)I_{a2} = 0 \rightarrow I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} \quad 3.27$$

Substituindo a Equação 3.27 na Equação 3.23 é obtida a Equação 3.28:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 3Z_f I_{a1} \quad 3.28$$

A partir das Equações 3.27 e 3.28 é possível construir o circuito elétrico equivalente para a solução do curto-circuito monofásico, Figura 11.

Figura 11: Circuito equivalente da falta FT em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as correntes de falta em componentes simétricas deve-se aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. A partir da Figura 11 é possível extrair as Equações 3.29 a 3.31.

$$Z_1 I_{a1} + Z_0 I_{a0} + Z_2 I_{a2} + 3Z_f I_{a1} = V_{th} \quad 3.29$$

$$I_{a1} = I_{a2} \rightarrow I_{a1} - I_{a2} = 0 \quad 3.30$$

$$I_{a1} = I_{a0} \rightarrow I_{a1} - I_{a0} = 0 \quad 3.31$$

Escrevendo o sistema na forma matricial, tem-se a Equação 3.32:

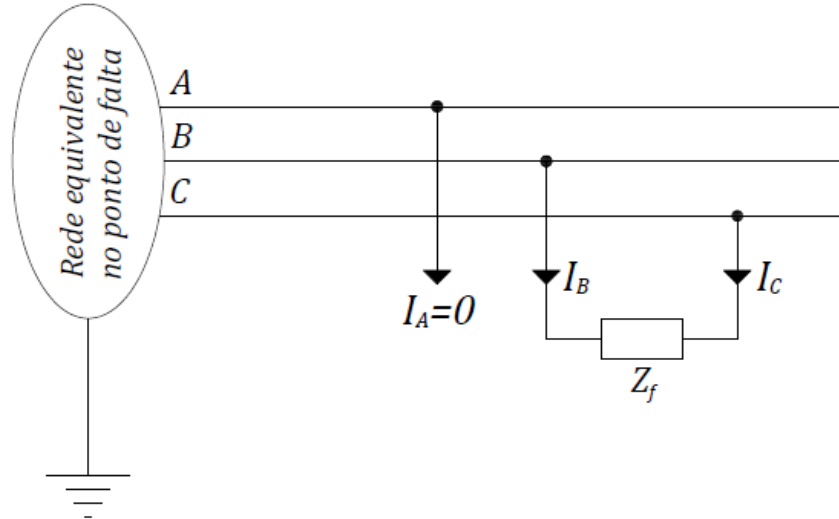
$$\begin{bmatrix} Z_0 & Z_1 + 3Z_f & Z_2 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.32$$

### 3.1.3 Falta fase-fase (FF)



A falta FF, cujo diagrama equivalente é indicado na Figura 12, é modelada envolvendo, geralmente, as fases B e C a partir de uma impedância  $Z_f$ .

Figura 12: Diagrama equivalente da falta FF em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Extraindo as condições de falta baseado no diagrama da Figura 12, obtêm-se as Equações 3.33 a 3.35.

$$I_A = 0 \quad 3.33$$

$$I_B = -I_C \quad 3.34$$

$$V_B - V_C = Z_f I_B \quad 3.35$$

Escrevendo as condições de curto em termos de componentes simétricas, são obtidas as Equações 3.36 a 3.38.

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad 3.36$$

$$I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} = -(I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \quad 3.37$$

$$(V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2}) - (V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2}) = Z_f (I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2}) \quad 3.38$$

Intuitivamente é possível afirmar que a componente de sequência zero será nula, uma vez que o curto não envolve a terra, ou seja:  $I_{a0} = V_{a0} = 0$ , o que implica em  $I_{a1} = -I_{a2}$ . Tal afirmação poderia ser obtida matematicamente ao relacionar as Equações 3.36 e 3.37. Escrevendo as duas condições de falta em componentes simétricas, Equações 3.39 e 3.40, obtidas até então têm-se:

$$I_{a0} = 0 \quad 3.39$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad 3.40$$

Substituindo as Equações 3.39 e 3.40 na Equação 3.28 é obtida a Equação 3.41:

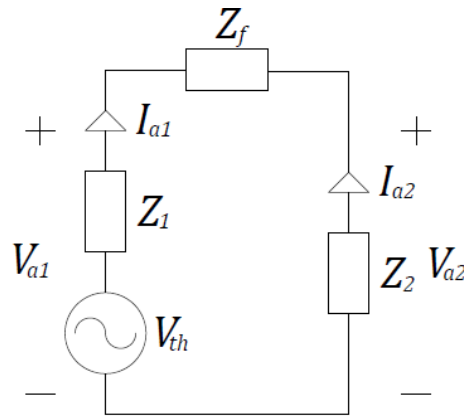
$$(\alpha^2 - \alpha)V_{a1} - (\alpha^2 - \alpha)V_{a2} = Z_f(\alpha^2 - \alpha)I_{a1} \quad 3.41$$

Dividindo ambos os termos da Equação 3.41 por  $(\alpha^2 - \alpha)$ , obtém-se a Equação 3.42:

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} \quad 3.42$$

A partir das Equações 3.39, 3.40 e 3.42 é possível construir o circuito elétrico equivalente para a solução do curto-circuito bifásico, ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Circuito equivalente da falta FF em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das Equações 3.39 e 3.40, a partir da análise da Figura 13, pode-se extrair a Equação 3.43.

$$Z_1 I_{a1} + Z_f I_{a1} - Z_2 I_{a2} = V_{th} \quad 3.43$$

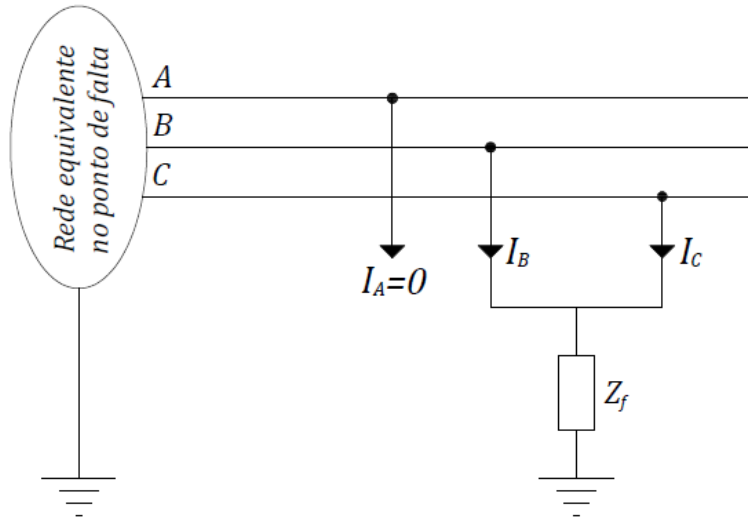
Escrevendo o sistema na forma matricial é possível definir a Equação 3.44:

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 + Z_f & -Z_2 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.44$$

### 3.1.4 Falta fase-fase-terra (FFT)

A falta FFT é modelada, geralmente, envolvendo as fases B e C. Nesta falta há uma conexão entre as duas fases (B e C) e estas são ligadas à terra a partir da impedância de falta  $Z_f$ , conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14: Diagrama equivalente da falta FFT em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Extraindo as condições de curto-circuito do circuito da Figura 14, são obtidas as Equações 3.45 a 3.47.

$$I_A = 0 \quad 3.45$$

$$V_B = V_C \quad 3.46$$

$$V_B = Z_f(I_B + I_C) \quad 3.47$$

Escrevendo as condições de curto, Equações 3.45 a 3.47, em termos de componentes simétricas, têm-se as Equações 3.48 a 3.51.

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \rightarrow I_{a1} + I_{a2} = -I_{a0} \quad 3.48$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} \rightarrow V_{a1} = V_{a2} \quad 3.49$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = Z_f(I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \quad 3.50$$

Substituindo a Equação 3.49 na Equação 3.50, tem-se a Equação 3.51:

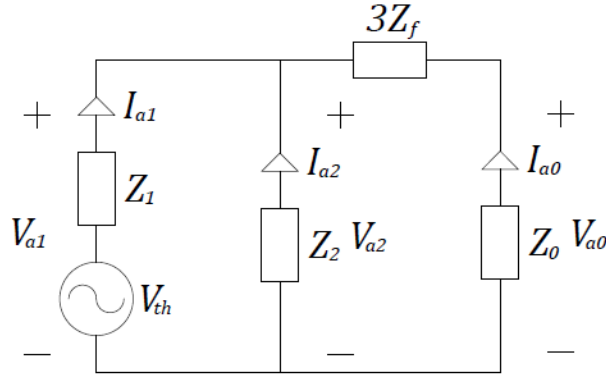
$$V_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a1} = Z_f(2I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)(I_{a1} + I_{a2})) \quad 3.51$$

Substituindo a Equação 3.48 na Equação 3.51, obtém-se a Equação 3.52:

$$V_{a0} - V_{a1} = Z_f(2I_{a0} - (-I_{a0})) \rightarrow V_{a0} - V_{a1} = 3Z_f I_{a0} \quad 3.52$$

A partir das Equações 3.48, 3.49 e 3.52 é possível construir o circuito elétrico equivalente para solução do curto-circuito bifásico-terra, mostrado na Figura 15.

Figura 15: Circuito equivalente da falta FFT em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da Equação 3.48, a partir da análise da Figura 15, pode-se extrair as Equações 3.53 e 3.54.

$$Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} = V_{th} \quad 3.53$$

$$Z_2 I_{a2} - 3Z_f I_{a0} - Z_0 I_{a0} = 0 \quad 3.54$$

Escrevendo o sistema na forma matricial pode-se obter a Equação 3.55:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & Z_1 & -Z_2 \\ Z_0 + 3Z_f & 0 & -Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.55$$

### 3.2 Rotação de componentes de sequência

Na seção 3.1 foi apresentado os modelos de faltas tradicionais. Por questão de conveniência, nas demonstrações foram adotadas fases específicas para desenvolver cada um dos circuitos equivalentes, por exemplo: a falta FT é sempre calculada na fase A e as faltas FF e FFT são sempre calculadas nas fases B e C.

Porém, sabe-se que, a partir da rotação das componentes de sequência, é possível calcular uma falta FT na fase B, ou uma falta FF nas fases A e C. O curto-circuito FT franco será usado para realizar as demonstrações de como realizar as rotações.

Considere um sistema elétrico com tensões equilibradas, ou seja:  $V_a = |V|\angle 0^\circ$ ,  $V_b = |V|\angle -120^\circ$  e  $V_c = |V|\angle 120^\circ$ . A Equação 2.6 trata-se da equação matricial para transformar tensões ou correntes em componentes de fase para componentes simétricas.

Para um curto FT franco na fase A, tem-se a Equação 3.56:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_b + V_c \\ \alpha V_b + \alpha^2 V_c \\ \alpha^2 V_b + \alpha V_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} |V|\angle -180^\circ \\ 2|V|\angle 0^\circ \\ |V|\angle -180^\circ \end{bmatrix} \quad 3.56$$

Para um curto-circuito FT na fase B, tem-se a Equação 3.57:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + V_c \\ V_a + \alpha^2 V_c \\ V_a + \alpha V_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} |V|\angle 60^\circ \\ 2|V|\angle 0^\circ \\ |V|\angle -60^\circ \end{bmatrix} \quad 3.57$$

Para um curto-circuito FT na fase C, tem-se a Equação 3.58:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a + V_b \\ V_a + \alpha V_b \\ V_a + \alpha^2 V_b \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} |V|\angle -60^\circ \\ 2|V|\angle 0^\circ \\ |V|\angle 60^\circ \end{bmatrix} \quad 3.58$$

Para estes casos específicos, nota-se que, apesar da fase envolvida na falta ter sido alterada, a sequência positiva permaneceu igual em todos os casos (módulo e ângulo). Com relação às sequências zero e negativa, percebe-se que o módulo permanece constante, porém, há variações de  $\alpha$  ( $120^\circ$ ) ou de  $\alpha^2$  ( $240^\circ$ ) no ângulo de fase destas. Após a realização de testes com exemplos numéricos em diferentes tipos de curtos-circuitos também constatou-se as mesmas relações.

Se o objetivo é calcular uma falta FT na fase B, deve-se aplicar a equação matricial (Equação 3.32) normalmente e, em seguida, realizar uma rotação nas componentes de sequência, de modo a referenciá-las à fase B (calculando:  $I_{b0}^F$ ,  $I_{b1}^F$  e  $I_{b2}^F$ ), conforme indicado nas Equações 3.59 a 3.61.

$$I_{b1}^F = I_{a1} \quad 3.59$$

$$I_{b0}^F = \alpha^2 I_{a0} \quad 3.60$$

$$I_{b2}^F = \alpha I_{a2} \quad 3.61$$

Analogamente, se o objetivo é calcular uma falta FT na fase C, deve-se aplicar a equação matricial (Equação 3.32) normalmente e, posteriormente, realizar uma rotação nas componentes de sequência de modo a referenciá-las à fase C (calculando  $I_{c0}^F$ ,  $I_{c1}^F$  e  $I_{c2}^F$ ), como mostra as Equações 3.62 a 3.64.

$$I_{c1}^F = I_{a1} \quad 3.62$$

$$I_{c0}^F = \alpha I_{a0} \quad 3.63$$

$$I_{c2}^F = \alpha^2 I_{a2} \quad 3.64$$

Ou ainda, de acordo com as Equações 3.65 a 3.67:

$$I_{a1} = I_{b1}^F = I_{c1}^F \quad 3.65$$

$$I_{a0} = \alpha I_{b0}^F = \alpha^2 I_{c0}^F \quad 3.66$$

$$I_{a2} = \alpha^2 I_{b2}^F = \alpha I_{c2}^F \quad 3.67$$

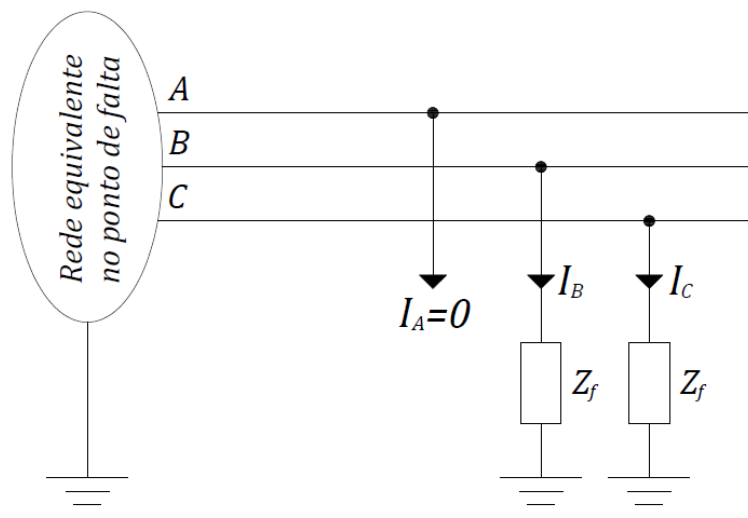
## 4. MODELAGEM DE CURTOS CIRCUITOS SIMULTÂNEOS

O capítulo 4 é o capítulo principal capítulo desta dissertação. Nas seções a seguir serão desenvolvidas novas equações e novos circuitos equivalentes para o cálculo de diferentes situações de faltas simultâneas.

### 4.1 Dupla falta fase-terra (D-FT)

Nesta seção será modelado o circuito para a falta D-FT, cujo diagrama é mostrado na Figura 16. O curto-circuito simultâneo é modelado por uma impedância de falta ( $Z_f$ ) conectada da fase B para a terra, assim como uma impedância de falta ( $Z_f$ ) conectada da fase C para a terra.

Figura 16: Diagrama equivalente da falta D-FT em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 16 é possível definir as condições de falta em componentes de fase, de acordo com as Equações 4.1 a 4.3.

$$I_A = 0 \quad 4.1$$

$$V_B = Z_f I_B \quad 4.2$$

$$V_C = Z_f I_C \quad 4.3$$

Escrevendo as condições de falta, Equações 4.1 a 4.3, em termos de componentes simétricas, têm-se as Equações 4.4 a 4.6.

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad 4.4$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = Z_f(I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2}) \quad 4.5$$

$$V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} = Z_f(I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \quad 4.6$$

Subtraindo as Equações 4.5 e 4.6 é obtida a Equação 4.7:

$$(\alpha^2 - \alpha)V_{a1} - (\alpha^2 - \alpha)V_{a2} = Z_f(\alpha^2 - \alpha)I_{a1} - Z_f(\alpha^2 - \alpha)I_{a2} \quad 4.7$$

Simplificando a Equação 4.7 pelo fator  $(\alpha^2 - \alpha)$ , obtém-se a Equação 4.8:

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} - Z_f I_{a2} \quad 4.8$$

Pode-se rearranjar os termos da Equação 4.8 de modo que o 1° membro da equação seja apenas dependente das variáveis referentes ao circuito de sequência positiva, e o 2° membro seja apenas dependente das variáveis do circuito de sequência negativa, indicado na Equação 4.9. Este padrão de escrita será útil na etapa final da modelagem do D-FT.

$$V_{a1} - Z_f I_{a1} = V_{a2} - Z_f I_{a2} \quad 4.9$$

Somando a Equação 4.5 e a Equação 4.6 é obtida a Equação 4.10:

$$\begin{aligned} 2V_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a2} \\ = 2Z_f I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)Z_f I_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)Z_f I_{a2} \end{aligned} \quad 4.10$$

Como  $\alpha^2 + \alpha + 1 = 0$ , logo,  $\alpha^2 + \alpha = -1$ . Substituindo esta relação na Equação 4.10, obtém-se a Equação 4.12.

$$2V_{a0} - V_{a1} - V_{a2} = 2Z_f I_{a0} - Z_f I_{a1} - Z_f I_{a2} \quad 4.11$$

$$2(V_{a0} - Z_f I_{a0}) = (V_{a1} - Z_f I_{a1}) + (V_{a2} - Z_f I_{a2}) \quad 4.12$$

Substituindo a Equação 4.9 na Equação 4.12, determina-se a Equação 4.13:

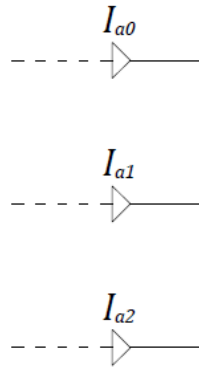
$$V_{a1} - Z_f I_{a1} = V_{a0} - Z_f I_{a0} \quad 4.13$$

As Equações 4.4, 4.9 e 4.13 serão utilizadas para a construção do circuito elétrico para o curto-circuito D-FT. De acordo com a Equação 4.4, é necessário que haja três ramos de circuito convergindo para um nó, onde cada ramo possui a uma corrente de sequência ( $I_{a0}$ ,  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$ ), Figura 17.

Para satisfazer a Equação 4.9, é necessário a existência de uma malha (Figura 18.a) em que o circuito de sequência positiva esteja conectado em série com uma impedância  $Z_f$ . Analogamente para o circuito de sequência negativa. O mesmo acontece com a Equação 4.13 para os circuitos de sequência positiva e zero (Figura 18.b)

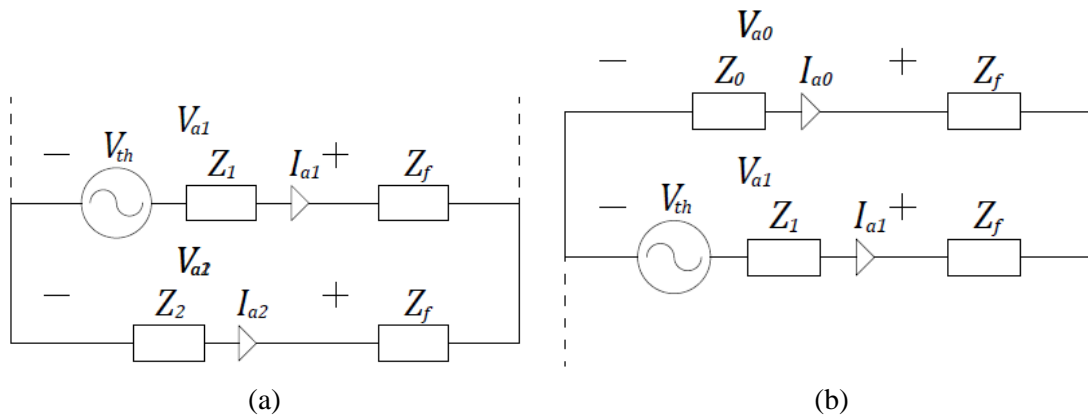


Figura 17: Conexão de ramos de acordo com a Equação 4.4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

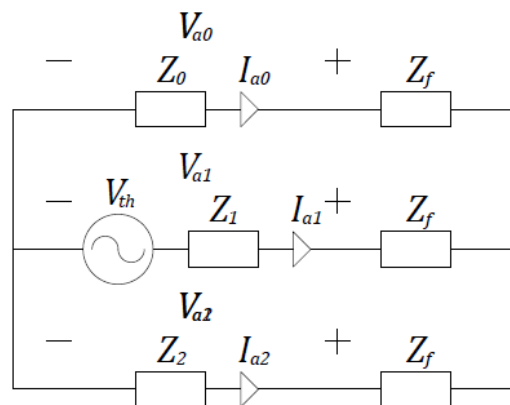
Figura 18: Malha (a) obtida a partir da Equação 4.9, (b) a partir da Equação 4.13.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para satisfazer as Equações 4.4, 4.9 e 4.13, ligamos os circuitos de sequência positiva, negativa e zero conforme a Figura 19.

Figura 19: Circuito equivalente da falta D-FT em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as correntes de falta em componentes simétricas deve-se aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Extraíndo as relações da Figura 19, podem ser obtidas as Equações 4.14 a 4.16.

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad 4.14$$

$$\begin{aligned} -Z_0 I_{a0} - Z_f I_{a0} + Z_f I_{a1} - V_{th} + Z_1 I_{a1} = 0 \rightarrow (Z_1 + Z_f) I_{a1} - (Z_0 + Z_f) I_{a0} \\ = V_{th} \end{aligned} \quad 4.15$$

$$\begin{aligned} -Z_1 I_{a1} + V_{th} - Z_f I_{a1} + Z_f I_{a2} + Z_2 I_{a2} = 0 \rightarrow (Z_1 + Z_f) I_{a1} - (Z_2 + Z_f) I_{a2} \\ = V_{th} \end{aligned} \quad 4.16$$

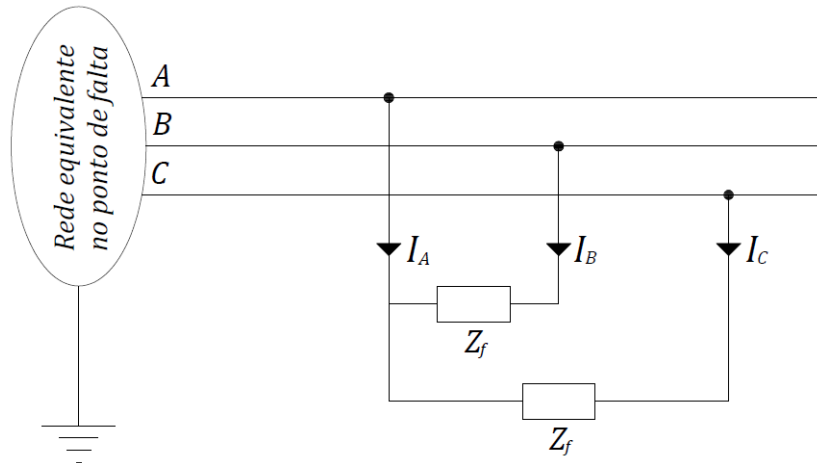
É possível obter o sistema na forma matricial, conforme a Equação 4.17:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -Z_0 - Z_f & Z_1 + Z_f & 0 \\ 0 & Z_1 + Z_f & -Z_2 - Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{th} \\ V_{th} \end{bmatrix} \quad 4.17$$

## 4.2 Dupla falta fase-fase (D-FF)

Nesta seção será modelado o circuito para a falta D-FF, indicado na Figura 20. O curto-circuito simultâneo é modelado por uma impedância de falta ( $Z_f$ ) conectada entre às fases A e B, e por uma impedância de falta ( $Z_f$ ) conectada entre as fases A e C.

Figura 20: Diagrama equivalente da falta D-FF em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da Figura 20 pode-se determinar as condições de falta em componentes de fase, definidas pelas Equações 4.18 a 4.20.

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad 4.18$$

$$V_B - V_A = Z_f I_B \quad 4.19$$

$$V_C - V_A = Z_f I_C \quad 4.20$$

Em componentes simétricas as condições de falta são definidas pelas Equações 4.21 a 4.23:

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 + I_{a2} = 0 \quad 4.21$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} - V_{a0} - V_{a1} - V_{a2} = Z_f (I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2}) \quad 4.22$$

$$V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} - V_{a0} - V_{a1} - V_{a2} = Z_f (I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \quad 4.23$$

Simplificando as Equações 4.21 a 4.23, são obtidas as Equações 4.24 a 4.26.

$$3I_{a0} = 0 \rightarrow I_{a0} = 0 \quad 4.24$$

$$(\alpha^2 - 1)V_{a1} + (\alpha - 1)V_{a2} = Z_f \alpha^2 I_{a1} + Z_f \alpha I_{a2} \quad 4.25$$

$$(\alpha - 1)V_{a1} + (\alpha^2 - 1)V_{a2} = Z_f \alpha I_{a1} + Z_f \alpha^2 I_{a2} \quad 4.26$$

Subtraindo as Equações 4.25 e 4.26 é obtida a Equação 4.27:

$$(\alpha^2 - \alpha)V_{a1} - (\alpha^2 - \alpha)V_{a2} = Z_f (\alpha^2 - \alpha)I_{a1} - Z_f (\alpha^2 - \alpha)I_{a2} \quad 4.27$$

Simplificando a Equação 4.27 pelo fator comum  $(\alpha^2 - \alpha)$ , obtém-se a Equação 4.28:

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} - Z_f I_{a2} \rightarrow V_{a1} - Z_f I_{a1} = V_{a2} - Z_f I_{a2} \quad 4.28$$

Somando as Equações 4.25 e 4.26 tem-se a Equação 4.29:

$$(\alpha^2 + \alpha - 2)V_{a1} + (\alpha^2 + \alpha - 2)V_{a2} = Z_f (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} - Z_f (\alpha^2 + \alpha)I_{a2} \quad 4.29$$

Sabendo que  $\alpha^2 + \alpha = -1$ , da Equação 4.29 é possível obter a Equação 4.30:

$$-3(V_{a1} + V_{a2}) = -Z_f I_{a1} - Z_f I_{a2} \rightarrow V_{a1} + V_{a2} = \frac{Z_f}{3} I_{a1} + \frac{Z_f}{3} I_{a2} \quad 4.30$$

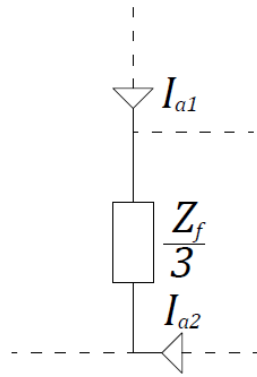
Solucionando o sistema formado pelas Equações 4.28 e 4.30, isola-se  $V_{a1}$  e  $V_{a2}$  em função das correntes  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$ , de forma a obter as Equações 4.31 e 4.32.

$$V_{a1} = \frac{2}{3} Z_f I_{a1} - \frac{1}{3} Z_f I_{a2} \quad 4.31$$

$$V_{a2} = -\frac{1}{3} Z_f I_{a1} + \frac{2}{3} Z_f I_{a2} \quad 4.32$$

As Equações 4.24, 4.31 e 4.32 serão utilizadas para a construção do circuito elétrico para a falta D-FF. Conforme Equação 4.34, a sequência zero não está envolvida na falta. Em relação as Equações 4.31 e 4.32, nota-se que as tensões de sequência positiva e negativa possuem uma parcela positiva de mesmo índice da sequência ( $\frac{2}{3} Z_f I_{a1}$  para o caso de  $V_{a1}$ ) e uma parcela negativa de índice diferente ( $-\frac{1}{3} Z_f I_{a2}$  para o caso de  $V_{a1}$ ). É trivial a obtenção do termo positivo, porém com obter a parcela negativa “ $-\frac{1}{3} Z_f$ ” existente na duas equações? A Figura 21 apresenta a resposta.

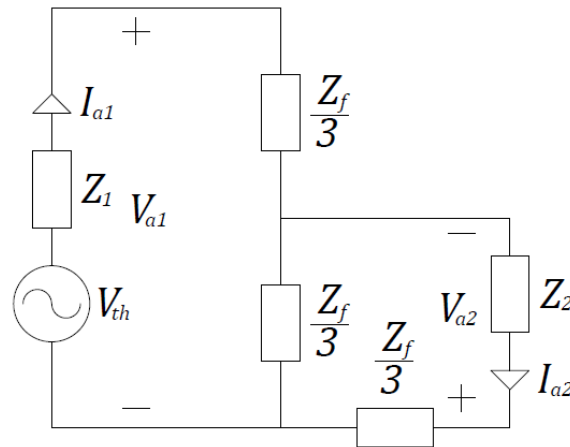
Figura 21: Conexão que representa termo negativo das Equações 4.31 e 4.32.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para satisfazer as Equações 4.24, 4.31 e 4.32, os circuitos de sequência são conectados conforme Figura 22.

Figura 22: Circuito equivalente da falta D-FF em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as correntes de falta em componentes simétricas é necessário aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Extraindo as relações da Figura 22, obtêm-se as Equações 4.33 a 4.35.

$$I_{a0} = 0 \quad 4.33$$

$$Z_1 I_{a1} + \frac{2}{3} Z_f I_{a1} - \frac{1}{3} Z_f I_{a2} = V_{th} \rightarrow \left( Z_1 + \frac{2}{3} Z_f \right) I_{a1} - \frac{1}{3} Z_f I_{a2} = V_{th} \quad 4.34$$

$$Z_2 I_{a2} + \frac{2}{3} Z_f I_{a2} - \frac{1}{3} Z_f I_{a1} = 0 \rightarrow -\frac{1}{3} Z_f I_{a1} + \left( Z_2 + \frac{2}{3} Z_f \right) I_{a2} = 0 \quad 4.35$$

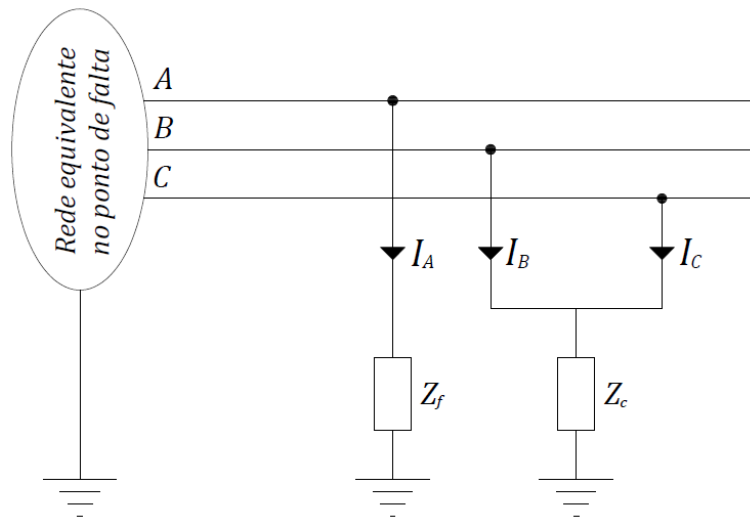
O sistema pode ser escrito na forma matricial, conforme indicado na Equação 4.36:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 + \frac{2Z_f}{3} & -\frac{Z_f}{3} \\ 0 & -\frac{Z_f}{3} & Z_2 + \frac{2Z_f}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.36$$

### 4.3 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT)

Nesta seção será modelado o circuito para a falta FT-FFT. Foi realizada uma tentativa de utilizar duas impedâncias diferentes, sendo uma impedância  $Z_f$  conectada entre a fase A e a terra e uma impedância  $Z_c$  conectada entre a união das fases B e C e a terra, Figura 23.

Figura 23: Diagrama equivalente da falta FT-FFT em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 23 é possível extrair as condições de falta em componentes de fase, expressas pelas Equações 4.37 a 4.39.

$$V_A = Z_f I_A \quad 4.37$$

$$V_B = V_C \quad 4.38$$

$$V_B = Z_c (I_B + I_C) \quad 4.39$$

Em componentes simétricas, as condições de falta são definidas pelas Equações 4.40 a 4.42.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.40$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = V_{a0} + \alpha V_{a1} + \alpha^2 V_{a2} \rightarrow V_{a1} = V_{a2} \quad 4.41$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} = Z_c(I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \quad 4.42$$

Substituindo a Equação 4.41 nas Equações 4.40 e 4.42 e lembrando que  $\alpha^2 + \alpha = -1$ , é possível obter, respectivamente, as Equações 4.43 e 4.44.

$$V_{a0} + 2V_{a1} = Z_f(I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.43$$

$$V_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)V_{a1} = Z_c(2I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a2}) \rightarrow \quad 4.44$$

$$V_{a0} - V_{a1} = 2Z_c I_{a0} - Z_c I_{a1} - Z_c I_{a2}$$

Subtraindo as Equações 4.43 e 4.44, é possível isolar  $V_{a1}$  (Equação 4.45) e, conseqüentemente, determinar  $V_{a2}$  (Equação 4.46).

$$V_{a1} = \frac{Z_f}{3}(I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) - \frac{2Z_c}{3}I_{a0} + \frac{Z_c}{3}I_{a1} + \frac{Z_c}{3}I_{a2} \quad 4.45$$

$$V_{a2} = \frac{Z_f}{3}(I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) - \frac{2Z_c}{3}I_{a0} + \frac{Z_c}{3}I_{a1} + \frac{Z_c}{3}I_{a2} \quad 4.46$$

Somando a Equação 4.43 com o dobro da Equação 4.44, é possível isolar  $V_{a0}$ , definida pela Equação 4.47.

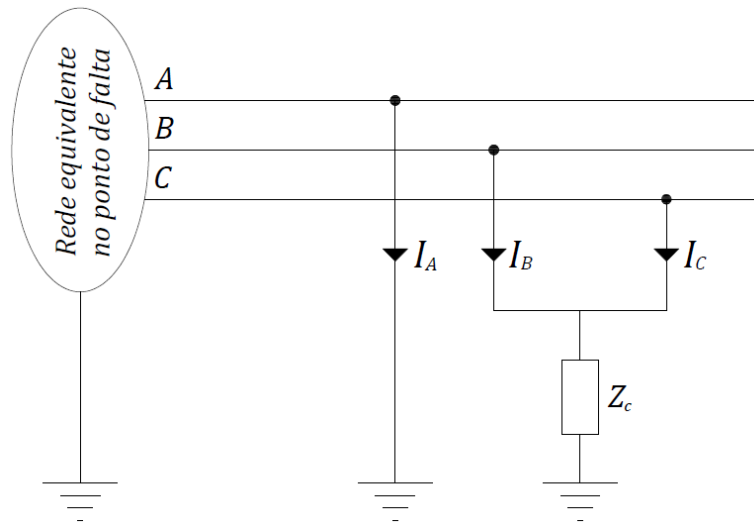
$$V_{a0} = \frac{Z_f}{3}(I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) + \frac{4Z_c}{3}I_{a0} - \frac{2Z_c}{3}I_{a1} - \frac{2Z_c}{3}I_{a2} \quad 4.47$$

Com isso, obtêm-se equações de tensão em componentes de sequência, em função das correntes de sequência. Porém, após a realização de exaustivas tentativas, não obteve-se êxito na construção de um circuito equivalente que atende-se as Equações 4.45 a 4.47. Logo, não foi possível construir o circuito equivalente mais genérico, ou seja, com impedâncias distintas, mas foram realizadas tentativas de casos particulares ( $Z_f = 0$  e  $Z_c \neq 0$ ,  $Z_f \neq 0$  e  $Z_c = 0$  e  $Z_f = Z_c$ ).

#### 4.3.1 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_f = 0$ e $Z_c \neq 0$

Fazendo  $Z_f = 0$  no diagrama equivalente da falta FT-FFT em componentes de fase, indicado na Figura 23, é possível construir o diagrama mostrado na Figura 24.

Figura 24: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = 0$ ) em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, fazendo  $Z_f = 0$  nas Equações 4.45 a 4.47, são obtidas as Equações 4.48 a 4.50.

$$V_{a1} = -\frac{2Z_c}{3}I_{a0} + \frac{Z_c}{3}(I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.48$$

$$V_{a2} = -\frac{2Z_c}{3}I_{a0} + \frac{Z_c}{3}(I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.49$$

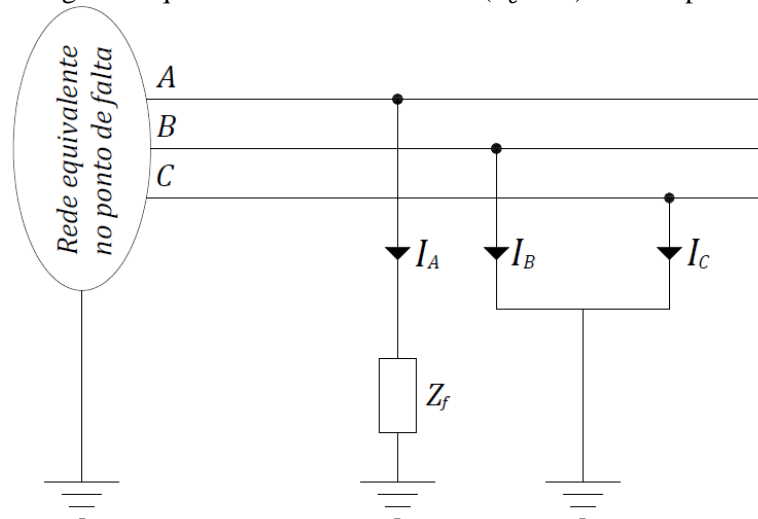
$$V_{a0} = \frac{4Z_c}{3}I_{a0} - \frac{2Z_c}{3}(I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.50$$

Dessa forma, é possível notar que o coeficiente do termo negativo contendo  $I_{a0}$  nas Equações 4.45 e 4.46 é maior do que o coeficiente do termo positivo, logo, através de conhecimento básico de análise de circuito conclui-se, também, não ser possível montar um circuito equivalente para este caso particular.

#### 4.3.2 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_f \neq 0$ e $Z_c = 0$

Admitindo  $Z_c = 0$  no diagrama equivalente da falta FT-FFT em componentes de fase, indicado na Figura 23, é possível construir o diagrama mostrado na Figura 25.

Figura 25: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, considerando  $Z_c = 0$  nas Equações 4.45 a 4.47, são obtidas as Equações 4.51 a 4.53.

$$V_{a1} = \frac{Z_f}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.51$$

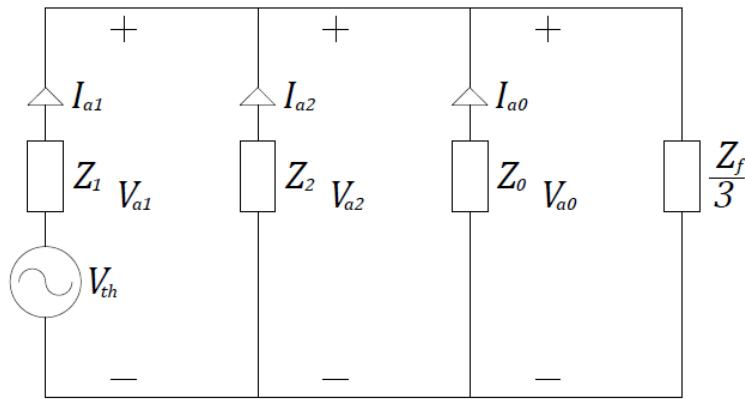
$$V_{a2} = \frac{Z_f}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.52$$

$$V_{a0} = \frac{Z_f}{3} (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.53$$

Para satisfazer o conjunto de Equações 4.51 a 4.53, os circuitos de sequência positiva, negativa e zero são conectados em paralelo, uma vez que as tensões de sequência são iguais. Além disso, as correntes de sequência positiva, negativa e zero devem se unir em um nó e passar por uma impedância  $\frac{Z_f}{3}$ . O circuito que permite calcular a falta simultânea FT através de impedância na fase A e bifásica-terra franca ( $Z_c = 0$ ) nas fases B e C é mostrado na Figura 26.



Figura 26: Circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter as correntes de falta em componentes simétricas deve-se aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Dessa forma, a partir da Figura 26 pode-se definir a Equação 4.54.

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 & -Z_2 \\ -Z_0 & 0 & Z_2 \\ Z_0 + \frac{Z_f}{3} & \frac{Z_f}{3} & \frac{Z_f}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.54$$

#### 4.3.3 Falta monofásica-terra e bifásica-terra (FT-FFT): $Z_c = Z_f$

Considerando  $Z_c = Z_f$  no diagrama equivalente da falta FT-FFT em componentes de fase, indicado na Figura 23, é possível construir o diagrama mostrado na Figura 27.

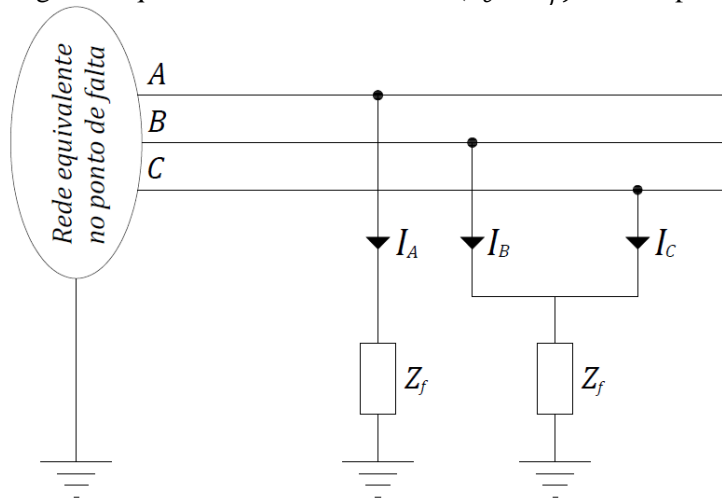
Além disso, fazendo  $Z_c = Z_f$  nas Equações 4.45 a 4.47, são obtidas as Equações 4.55 a 4.57.

$$V_{a1} = \frac{2Z_f}{3}(I_{a1} + I_{a2}) - \frac{Z_f}{3}I_{a0} \quad 4.55$$

$$V_{a2} = \frac{2Z_f}{3}(I_{a1} + I_{a2}) - \frac{Z_f}{3}I_{a0} \quad 4.56$$

$$V_{a0} = -\frac{Z_f}{3}(I_{a1} + I_{a2}) + \frac{4Z_c}{3}I_{a0} \quad 4.57$$

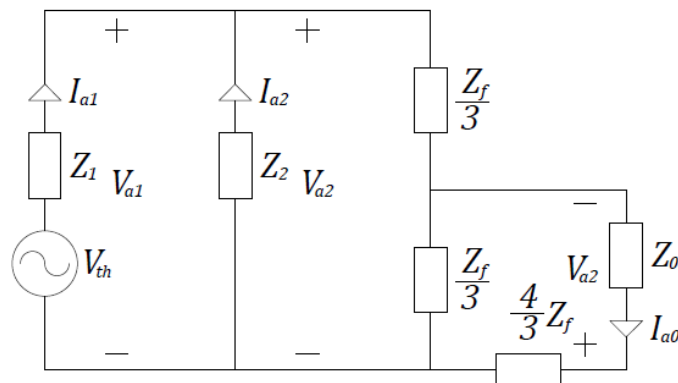
Figura 27: Diagrama equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = Z_f$ ) em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando as Equações 4.55 a 4.57, é perceptível que os circuitos de sequência positiva e negativa devem ser conectados em paralelo, uma vez que as respectivas tensões são iguais. Assim como na falta D-FF há um termo negativo em cada uma das equações com coeficiente  $-\frac{Z_f}{3}$ , a solução para atender essa condição é análoga à utilizada na Figura 21. A Figura 28 apresenta o circuito equivalente para a FT-FFT com impedâncias iguais.

Figura 28: Circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = Z_c$ ) em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

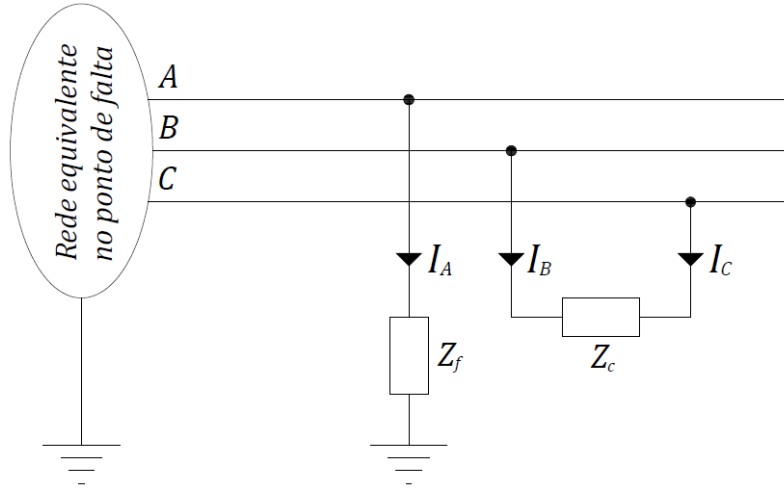
Através da análise da Figura 28 obtém-se a Equação 4.58.

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 & -Z_2 \\ -\frac{Z_f}{3} & \frac{2Z_f}{3} & Z_2 + \frac{2Z_f}{3} \\ Z_0 + \frac{5Z_f}{3} & -\frac{Z_f}{3} & -\frac{Z_f}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.58$$

#### 4.4 Falta monofásica-terra e bifásica (FT-FF)

Nesta seção será modelado o circuito para a falta FT-FF. O curto-circuito simultâneo é modelado por uma impedância de falta ( $Z_f$ ) conectada entre a fase A e o terra, e por uma impedância de falta ( $Z_c$ ) conectada entres as fases B e C, Figura 29.

Figura 29: Diagrama equivalente da falta FT-FF em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em Moura, Lopes, De Moura (2015) é apresentado um modelo semelhante para esta falta, porém com  $Z_c = 0$ , logo, o modelo proposto neste trabalho é mais genérico (com impedâncias distintas), o que torna o circuito apresentado em Moura, Lopes, De Moura (2015) um caso particular do modelo proposto nesta dissertação.

A partir da Figura 29 é possível extrair as condições de falta em componentes de fase, indicadas nas Equações 4.59 a 4.61.

$$V_A = Z_f I_A \quad 4.59$$

$$I_B = -I_C \quad 4.60$$

$$V_B - V_C = Z_c (I_B) \quad 4.61$$

As condições de falta em componentes simétricas são indicadas nas Equações 4.62 a 4.64.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f (I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.62$$

$$I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} = -I_{a0} - \alpha I_{a1} - \alpha^2 I_{a2} \rightarrow 2I_{a0} = -(\alpha^2 + \alpha)(I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.63$$

$$V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} - V_{a0} - \alpha V_{a1} - \alpha^2 V_{a2} = Z_c (I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2}) \quad 4.64$$

Simplificando a Equação 4.63 é obtida a Equação 4.65:

$$2I_{a0} = I_{a1} + I_{a2} \quad 4.65$$

Isolando  $I_{a0}$  na Equação 4.65 e substituindo na Equação 4.62, tem-se a Equação 4.66:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = \frac{3Z_f}{2} (I_{a1} + I_{a2}) \quad 4.66$$

Analogamente, isolando  $I_{a0}$  na Equação 4.65 e substituindo na Equação 4.64 obtém-se a Equação 4.67:

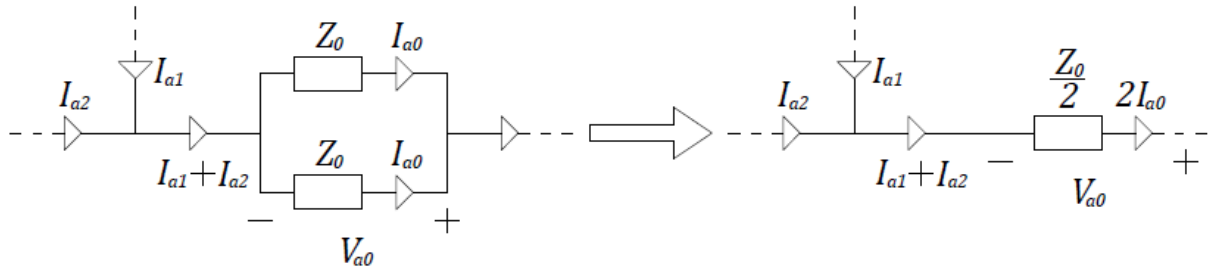
$$(\alpha^2 - \alpha)(V_{a1} - V_{a2}) = Z_c \left( \alpha^2 + \frac{1}{2} \right) I_{a1} + Z_c \left( \alpha + \frac{1}{2} \right) I_{a2} \quad 4.67$$

A partir da consulta à Tabela 1, sabe-se que  $\alpha^2 - \alpha = -j\sqrt{3}$  e  $\alpha^2 + \frac{1}{2} = -\left(\alpha + \frac{1}{2}\right) = \frac{j\sqrt{3}}{2}$ . Logo, é possível determinar a Equação 4.68.

$$V_{a1} - V_{a2} = \frac{Z_c}{2} I_{a1} - \frac{Z_c}{2} I_{a2} \rightarrow V_{a1} - \frac{Z_c}{2} I_{a1} = V_{a2} - \frac{Z_c}{2} I_{a2} \quad 4.68$$

O conjunto de Equações 4.65, 4.66 e 4.68 será utilizado para a construção do circuito equivalente para curto-circuito simultâneo FT-FF ( $Z_f \neq Z_c$ ). Para satisfazer a Equação 4.65, deverá existir um nó no circuito em que as correntes  $I_{a1}$  e  $I_{a2}$  entram e a corrente  $2I_{a0}$  sai, Figura 30.

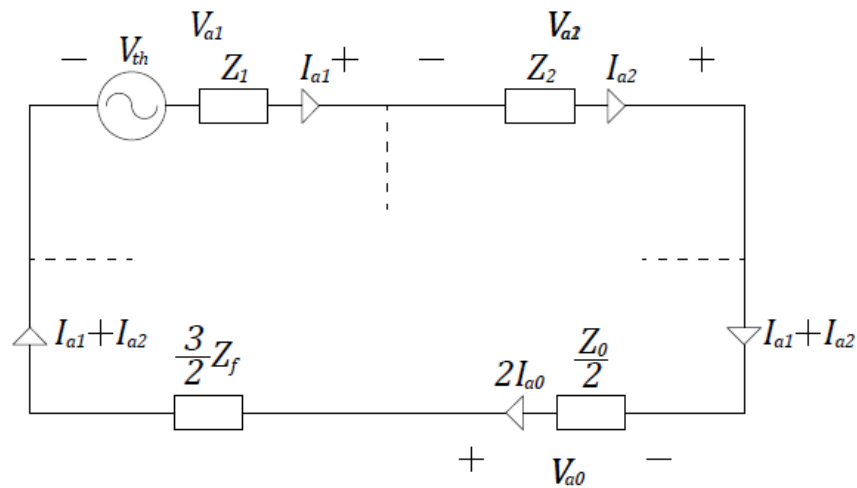
Figura 30: Conexão que satisfaz a Equação 4.65.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para satisfazer a Equação 4.66, deverá haver um caminho fechado no circuito (malha) formada pelo circuito de sequência zero, positiva e negativa e, ainda, uma impedância  $\frac{3}{2}Z_f$  percorrida por uma corrente  $I_{a1} + I_{a2}$ , Figura 31.

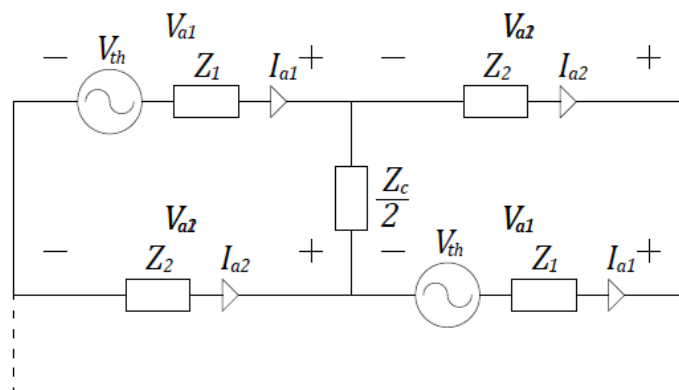
Figura 31: Malha referente a Equação 4.66.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Equação 4.68 poderia ser construída no circuito equivalente de forma análoga à Figura 18.a, com a substituição de  $Z_f$  por  $\frac{Z_c}{2}$ . Porém, se o circuito for conectado da forma citada implica em não satisfazer a Equação 4.66 e a Figura 31, já que seria introduzida uma impedância  $\frac{Z_c}{2}$  em série com os circuitos de sequência positiva e negativa. A sugestão, então, está descrita na Figura 32.

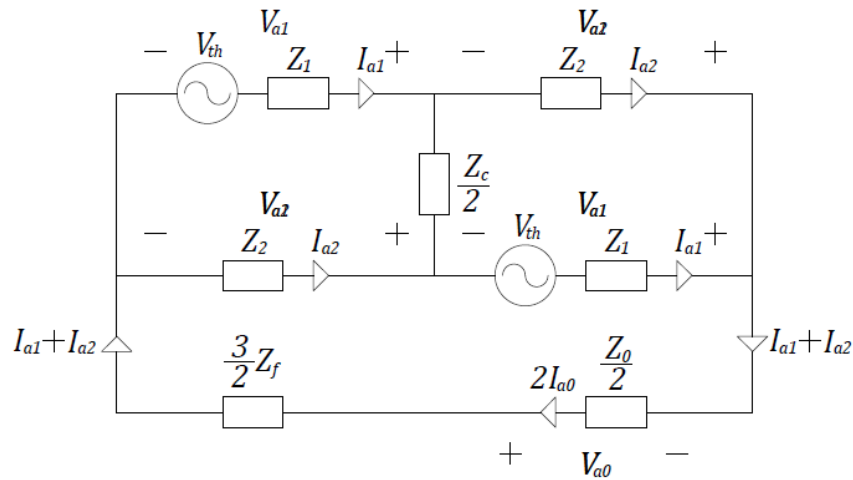
Figura 32: Malha referente a Equação 4.68.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, ao unir as Figuras 30, 31 e 32, obtém-se o modelo para a falta simultânea FT e FF com impedâncias diferentes, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \neq Z_c$ ) em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, para a obtenção das correntes de falta em componentes simétricas deve-se aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Logo, extraindo as relações da Figura 33, tem-se a Equação 4.69.

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 + \frac{Z_c}{2} & -Z_2 - \frac{Z_c}{2} \\ Z_0 & Z_1 + \frac{3Z_f}{2} & Z_2 + \frac{3Z_f}{2} \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.69$$

Devido à generalidade do modelo, é possível calcular vários casos particulares:

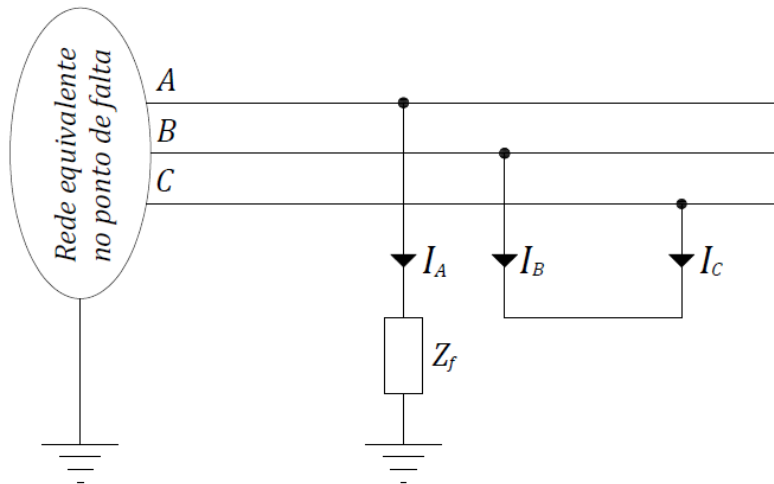
- Falta simultânea FT através de impedância e FF franco ( $Z_c = 0$ );
- Falta simultânea FT franco ( $Z_f = 0$ ) e FF através de impedância;
- Falta FT através de impedância ( $Z_c \rightarrow \infty$ );
- Falta FF através de impedância ( $Z_f \rightarrow \infty$ ).

Estas faltas serão tratadas nas próximas subseções.

#### 4.4.1 Falta simultânea FT através de impedância e FF franco ( $Z_c = 0$ )

Fazendo  $Z_c = 0$  no diagrama equivalente da falta FT-FF em componentes de fase, indicado na Figura 29, é possível construir o diagrama mostrado na Figura 34.

Figura 34: Diagrama equivalente da falta FT-FF ( $Z_c = 0$ ) em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, também considerando  $Z_c = 0$  na Equação 4.69, é possível determinar a Equação 4.70.

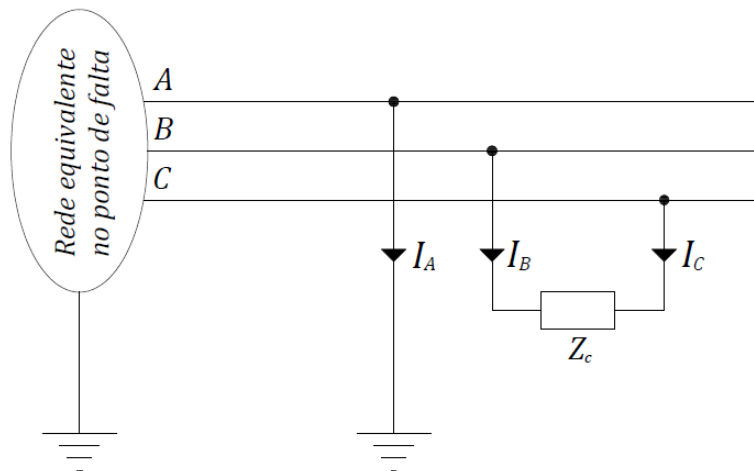
$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 & -Z_2 \\ Z_0 & Z_1 + \frac{3Z_f}{2} & Z_2 + \frac{3Z_f}{2} \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.70$$

Como já mencionado, o caso particular da falta simultânea FT e FF em que  $Z_c = 0$  trata-se do curto-circuito desenvolvido em Moura, Lopes, De Moura (2015).

#### 4.4.2 Falta simultânea FT franco ( $Z_f = 0$ ) e FF através de impedância

Admitindo  $Z_f = 0$  no diagrama equivalente da falta FT-FF em componentes de fase, indicado na Figura 29, é possível construir o diagrama mostrado na Figura 35.

Figura 35: Diagrama equivalente da falta FT-FF ( $Z_f$ ) em componentes de fase.



Fonte: Elaborado pelo autor

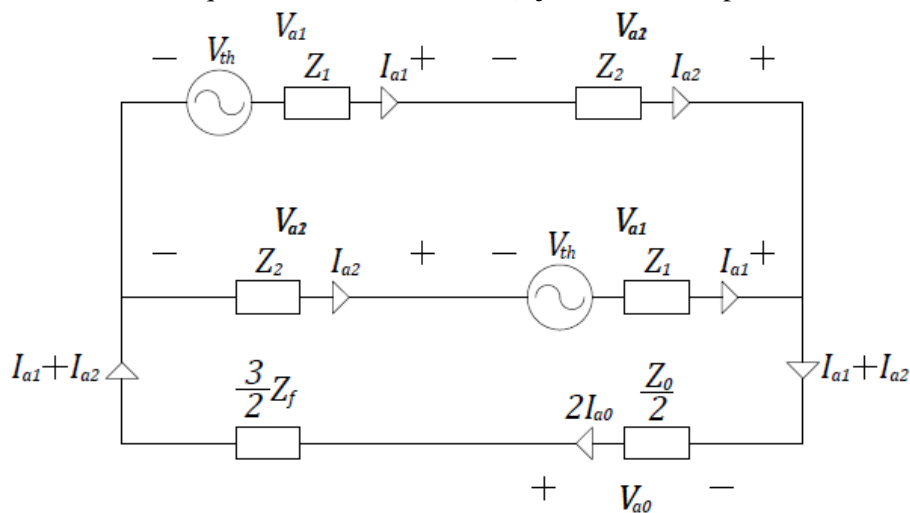
Ainda fazendo a consideração de  $Z_f = 0$  na Equação 4.69, é possível determinar a Equação 4.71.

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 + \frac{Z_c}{2} & -Z_2 - \frac{Z_c}{2} \\ Z_0 & Z_1 & Z_2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.71$$

#### 4.4.3 Falta FT através de impedância ( $Z_c \rightarrow \infty$ )

Neste caso particular em que  $Z_c$  tende a infinito, é possível calcular o curto-circuito clássico FT individualmente, enfatizando a generalidade do modelo. Fazendo  $Z_c \rightarrow \infty$  no circuito equivalente da Figura 33 pode-se obter o circuito equivalente indicado na Figura 36.

Figura 36: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_c \rightarrow \infty$ ) em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que o circuito da Figura 36 é diferente do circuito normalmente utilizado para calcular as correntes na falta FT; porém, é visível que, ao excluir o ramo que continha a impedância  $\frac{Z_c}{2}$ , as correntes de sequência positiva e de sequência negativa passam a ser iguais. Com isso, como  $2I_0 = I_{a1} + I_{a2}$ , conclui-se que  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$ . Além disto a impedância existente no circuito equivalente contido na literatura clássica é de  $3Z_f$ ; neste caso, a impedância é de  $\frac{3}{2}Z_f$  (metade do valor), porém é percorrida por uma corrente  $2I_{a0}$  (dobro da corrente).



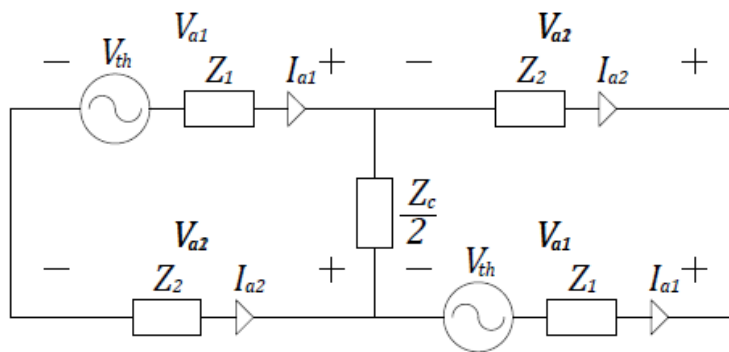
Para obter as correntes de falta em componentes simétricas se faz necessário aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Extraindo as equações da Figura 36 obtém-se a Equação 4.72.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ Z_0 & Z_1 + \frac{3Z_f}{2} & Z_2 + \frac{3Z_f}{2} \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{th} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.72$$

#### 4.4.4 Falta FF através de impedância ( $Z_f \rightarrow \infty$ )

Neste caso particular em que  $Z_f$  tende a infinito, é possível calcular o curto-circuito clássico bifásico individualmente. Fazendo  $Z_f \rightarrow \infty$  no circuito equivalente da Figura 33 pode-se construir o circuito equivalente da Figura 37.

Figura 37: Circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \rightarrow \infty$ ) em componentes simétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar que o circuito indicado na Figura 37 é diferente do circuito normalmente utilizado para calcular as correntes na falta bifásica; porém, é visível que, ao excluir o ramo que continha a impedância  $Z_f$ , as correntes de sequência positiva e de sequência negativa são opostas ( $I_{a1} = -I_{a2}$ ). Logo, tem-se a equação de malha  $V_{a1} - V_{a2} = \frac{Z_c}{2}(I_{a1} - I_{a2}) \rightarrow V_{a1} - V_{a2} = Z_c I_{a1}$ . Ambas as condições encontradas a partir da análise realizada são condições de falta do curto FF clássico.

Para a obtenção das correntes de falta em componentes simétricas deve-se aplicar técnicas de análise de circuitos elétricos. Logo, a partir da Figura 37, pode-se determinar a Equação 4.73.

$$\begin{bmatrix} 0 & Z_1 + \frac{Z_c}{2} & -Z_2 - \frac{Z_c}{2} \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 4.73$$

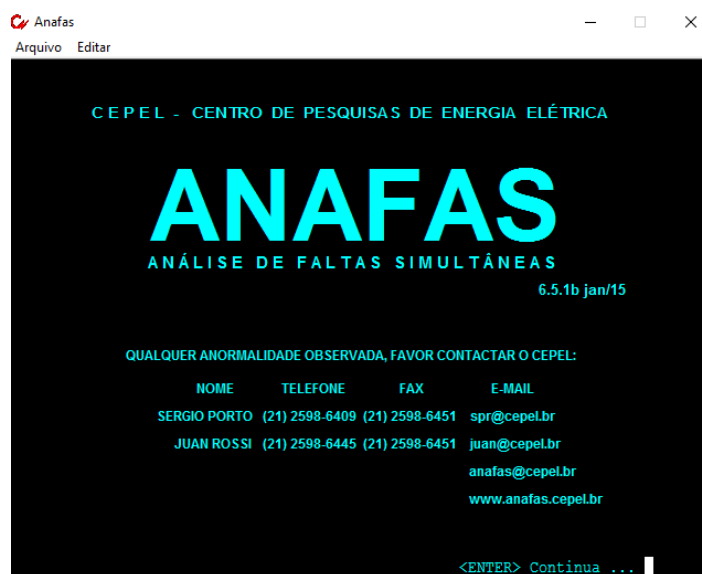
## 5. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentadas as ferramentas utilizadas para validação dos novos modelos desenvolvidos no Capítulo 4, como o *software* comercial para comparação dos resultados obtidos analiticamente, os sistemas de potência teste usados como estudo de caso e, também, o passo-a-passo realizado para constatar a veracidade dos resultados obtidos.

### 5.1 *Software* comercial ANAFAS

Para que a exatidão dos circuitos equivalentes propostos seja validada, utiliza-se o programa computacional ANAFAS, que trata-se de um *software* comercial desenvolvido pelo CEPEL. O ANAFAS está integrado ao SAPRE e foi desenvolvido dentro da linha de pesquisa “Planejamento, Operação e Análise de Redes Elétricas”. A Figura 38 apresenta a tela inicial do *software*.

Figura 38: Interface do *software* ANAFAS.



Fonte: *Print screen* do *software* ANAFAS 6.5.

O ANAFAS tem como principal função o cálculo de curtos-circuitos, permitindo a execução automática de grande número de faltas. Possui, também, serviços auxiliares com estudo automático de superação de disjuntores e obtenção de equivalentes, além de outras funcionalidades (ROMÉRO *et al.*, 2005).

Além do ANAFAS, o CEPEL desenvolveu outros programas computacionais na área de estudo de redes elétricas como o ANATEM, FLUPOT, ANAREDE, PacDyn, etc. De acordo com CEPEL (2015), tais programas são capazes de realizar estudos de:

- Análise em regime permanente, verificando o fluxo de potência e a estabilidade de tensão;
- Análise de curtos-circuitos;
- Análise dinâmica, tanto para grandes perturbações - visando verificar a integridade e o sincronismo do sistema -, quanto para a análise de pequenas perturbações;
- Análise harmônica visando o cálculo da distorção de tensão e fluxo harmônico.

Ainda de acordo com CEPEL (2015), os principais usuários do *software* computacional ANAFAS são:

- Entidades setoriais, como o ONS e a EPE;
- Eletrobras;
- Agentes de geração, transmissão e distribuição;
- Grandes consumidores industriais;
- Universidades (versões acadêmicas).

Neste trabalho utiliza-se uma versão acadêmica do programa ANAFAS 7.2.0 dez/17, que possui limitação para sistemas até 120 barras, atendendo de maneira satisfatória as necessidades do estudo realizado.

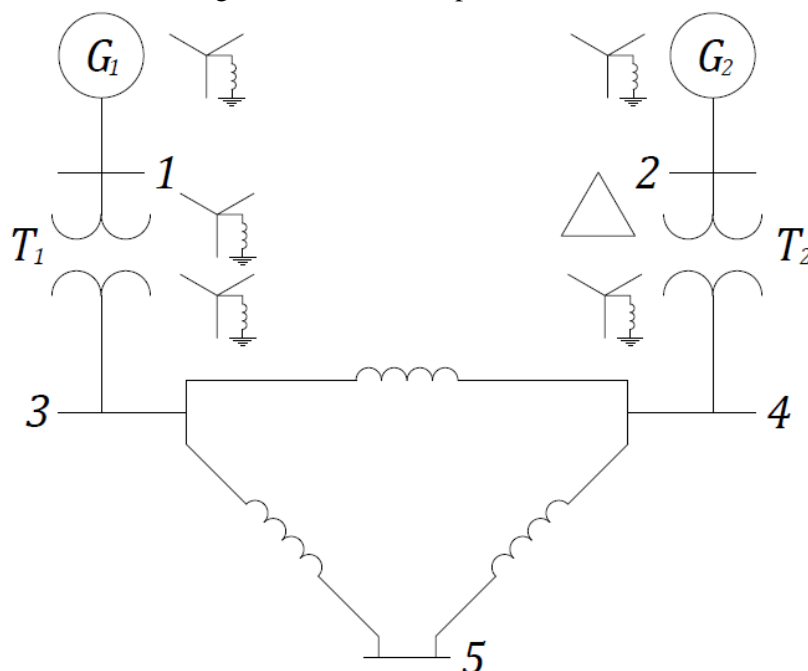
## **5.2 Estudo de caso**

São utilizados exemplos de aplicação dos modelos de faltas simultâneas desenvolvidos, para isto utiliza-se dois sistemas de potência teste. Estes serão apresentados a seguir.

### **5.2.1 Sistema teste 1**

O sistema teste 1, Figura 39, foi adaptado de exemplo numérico de Saadat (1999). O sistema possui cinco barras, dois geradores, dois transformadores e três linhas de transmissão. Os geradores são aterrados com um reator de  $\frac{0,25}{3}$  p.u.

Figura 39: Sistema de potência teste 1.



Fonte: Adaptado de SAADAT, 1999.

A Tabela 3 apresenta os dados do sistema na base de potência teste 1 de 100 MVA, indicado na Figura 39.

Tabela 3: Dados do sistema de potência 1.

Componente	Nível de tensão	$X_1(p.u.)$	$X_0(p.u.)$
$G_1$	20 kV	0,15	0,05
$G_2$	20 kV	0,15	0,05
$T_1$	20/220 kV	0,10	0,10
$T_2$	20/220 kV	0,10	0,10
$L_{34}$	220 kV	0,125	0,30
$L_{35}$	220 kV	0,15	0,35
$L_{45}$	220 kV	0,25	0,7125

Fonte: Adaptado de SAADAT, 1999.

Para a simulação do sistema teste 1 no ANAFAS é necessário, inicialmente, organizar os dados de acordo com a estrutura padrão de entrada. Para isto é utilizado o *software* edit CEPEL. No arquivo de entrada devem ser especificadas as bases de tensão, as configurações de conexão dos equipamentos (delta, estrela ou estrela aterrado), os valores de resistência e reatância de sequência positiva e zero (em p.u.), a disposição dos elementos, etc.

Estes dados estão divididos em duas classificações: dados de barra e dados de circuito. A Figura 40 apresenta o arquivo de entrada de dados para o sistema apresentado. A Tabela 4 auxilia na interpretação da Figura 40.

Figura 40: Arquivo de dados do sistema teste 1.

```

01 (----- Arquivo de Dados do Sistema -----)
02 (----- Caso Exemplo 1 - Sistema em Repouso -----)
03
04 (----- Titulo e Comentarios -----)
05 1 1
06 *** Sistema 5 Barras ***
07
08 (----- Dados de Barra -----)
09 38
10 (NB C M BN VPRE ANG VBAS)
11 (-----)
12 1 B.HUM 20
13 2 B.DOIS 20
14 3 B.TRES 220
15 4 B.QUATRO 220
16 5 B.CINCO 220
17 9999
18
19 (----- Dados de Circuito -----)
20 37
21 (BF C BT NC T R1 X1 R0 X0 CN S1 S0 TAP TB TC IADFP CD CP XNPA)
22 (-----)
23 0 1 1 G 00 15.0 00 5.
24 0 2 1 G 00 15.0 00 5.
25 1 3 1 T 00 10. 00 10. YN YN 8.3334
26 2 4 1 T 00 10. 00 10. D YN 8.3334
27 3 4 1 L 00 12.5 00 30.
28 3 5 1 L 00 15. 00 35.
29 4 5 1 L 00 25. 00 71.25
30 9999

```

Fonte: Print screen do software Edit CEPEL.

Tabela 4: Dados e significados para interpretação do arquivo de dados.

Dado	Significado	Dado	Significado
NB	Número da barra	T	Tipo do circuito (Gerador, transformador, etc.)
BN	Nome da barra	R1	Resistência de seq. positiva
VPRE	Módulo da tensão pré-falta	X1	Reatância de seq. positiva
ANG	Argumento da tensão pré-falta	R0	Resistência de seq. zero
VBAS	Tensão de base	X0	Reatância de seq. zero
BF	Barra do terminal “de”	CD	Tipo de conexão no terminal “de”
BT	Barra do terminal “para”	CP	Tipo de conexão no terminal “para”
NC	Número do circuito	XNPA	Reatância de aterramento do terminal “para”

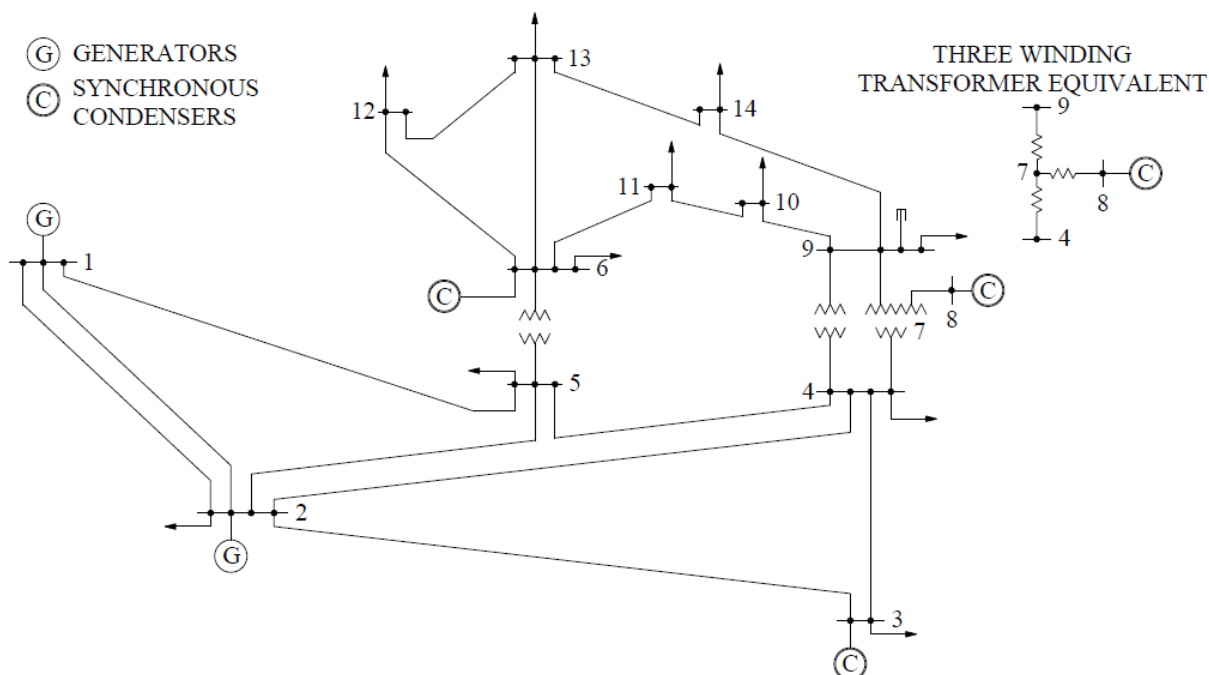
Fonte: Adaptado de ROMÉRO *et al.*, 2005.

### 5.2.2 Sistema teste 2

O segundo sistema de potência teste utilizado possui 14 barras, bem maior quando comparado ao sistema de teste 1. Trata-se de um sistema teste do IEEE que serve de referência para estudos e pesquisas relacionados à grande área de SEPs.

O diagrama unifilar que contém todos os elementos (geradores, transformadores, cargas, linhas, etc.) e conexões entre estes é apresentado na Figura 41. Os dados do sistema podem ser consultados em Washington (2016). O arquivo de dados criado para a simulação do sistema IEEE 14 barras é apresentado no APÊNDICE A.

Figura 41: Diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras.



Fonte: Adaptado de WASHINGTON, 2016.

### 5.3 Metodologia de validação dos modelos

Uma vez adotados os sistemas de potência teste e os arquivos de dados para a realização das simulações no *software* ANAFAS devidamente configurados no *software* Edit CEPEL, realiza-se as simulações para a obtenção das correntes e tensões de falta para todos os curtos-circuitos simultâneos discutidos no Capítulo 4. A saída do ANAFAS apresenta-se em forma de tabela, contendo todas as variáveis calculadas no curto-circuito.

Após a obtenção dos resultados a partir do ANAFAS, utiliza-se os circuitos equivalentes desenvolvidos para o cálculo analítico detalhado das correntes e tensões de falta em componentes simétricas e componentes de fase. Em seguida, faz-se a comparação dos resultados obtidos analiticamente e os resultados obtidos a partir do ANAFAS para faltas ocorrendo na barra 5 do sistema teste 1. Logo, uma vez obtidos resultados coerentes, é possível constatar a validade dos modelos desenvolvidos.

Além disso, apresenta-se uma forma de calcular os curtos-circuitos simultâneos em fases diferentes das que foram realizadas nas demonstrações matemáticas. Para isto, realiza-se uma simples rotação nas componentes de sequência. Calcula-se, também, faltas tradicionais (FFF, FT, FF e FFT) e realiza-se a comparação dos resultados numéricos obtidos com as faltas simultâneas.

Posteriormente, visando aplicar os modelos desenvolvidos a um sistema mais robusto, realiza-se a comparação dos resultados para faltas ocorrendo na barra 5 do sistema teste 2 (IEEE 14 barras), garantindo, então, a viabilidade de aplicação da metodologia proposta para sistemas com maior número de barras (médio porte).



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Sistema teste 1: procedimento de cálculo de faltas simultâneas

Considerando os dados de impedância dos geradores, transformadores e linhas de transmissão do sistema teste 1 (Tabela 3) e que neste estudo de caso serão provocadas faltas simultâneas na barra 5 deste mesmo sistema, será apresentado todo o procedimento para a utilização dos novos circuitos desenvolvidos para o cálculo das faltas: D-FT, D-FF, FT e FFT e FT-FF.

A sequência de passos adotados para a exemplificação da utilização dos novos modelos seguirá a metodologia usada em Moura, Lopes, De Moura (2015).

1° Passo: Adotar a potência de base do sistema

Como já proposto no exemplo numérico original, será adotada uma potência de base de 100 MVA.

2° Passo: Adotar as tensões de base do sistema

A tensão de base do sistema depende da zona de tensão em que ocorrerá o defeito. Logo, como as faltas serão provocadas na barra 5, a tensão de base do sistema é de 220 kV.

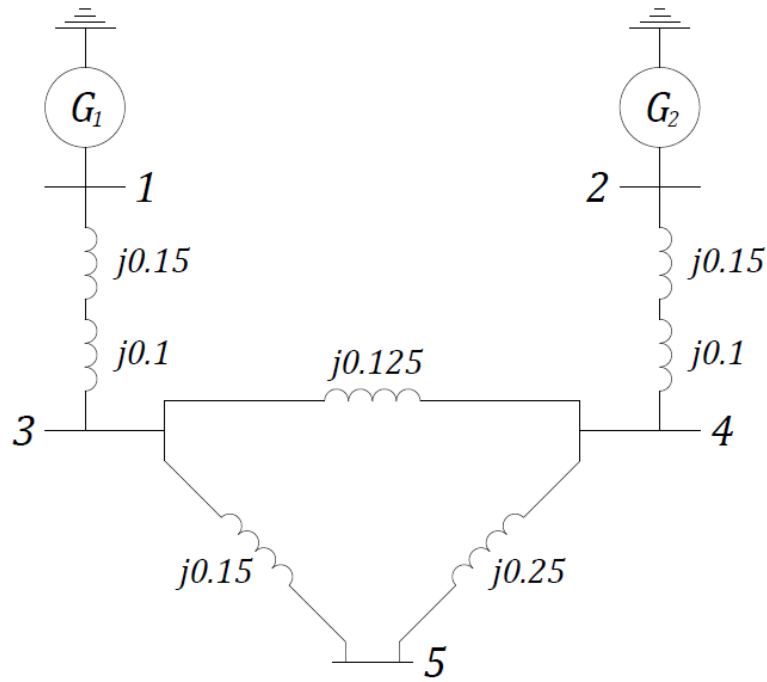
3° Passo: Padronização das impedâncias em valores por unidade

No caso deste exemplo específico, todas as impedâncias já estão padronizadas na base de potência e nas tensões de base de suas respectivas zonas de tensão. Dessa forma, não é necessário realizar cálculos adicionais.

4° Passo: Obter as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero

Baseado na sistema de potência teste 1, indicado na Figura 39, é possível obter o circuito de sequência positiva, mostrado na Figura 42.

Figura 42: Circuito de seqüência positiva para o sistema teste 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para obter a impedância de Thévenin da barra 5, faz-se necessária a transformação, explicitada nas Equações 6.1 a 6.3, do delta formado pelas barras 3, 4 e 5 em um circuito Y equivalente.

$$Z_{1Y} = \frac{(j0,125)(j0,15)}{j0,525} \rightarrow Z_{1Y} = j0,0357143 \text{ p. u.} \quad 6.1$$

$$Z_{2Y} = \frac{(j0,125)(j0,15)}{j0,525} \rightarrow Z_{2Y} = j0,0595238 \text{ p. u.} \quad 6.2$$

$$Z_{3Y} = \frac{(j0,15)(j0,25)}{j0,525} \rightarrow Z_{3Y} = j0,0714286 \text{ p. u.} \quad 6.3$$

Dessa forma, a impedância de Thévenin de seqüência positiva é dada conforme a Equação 6.4.

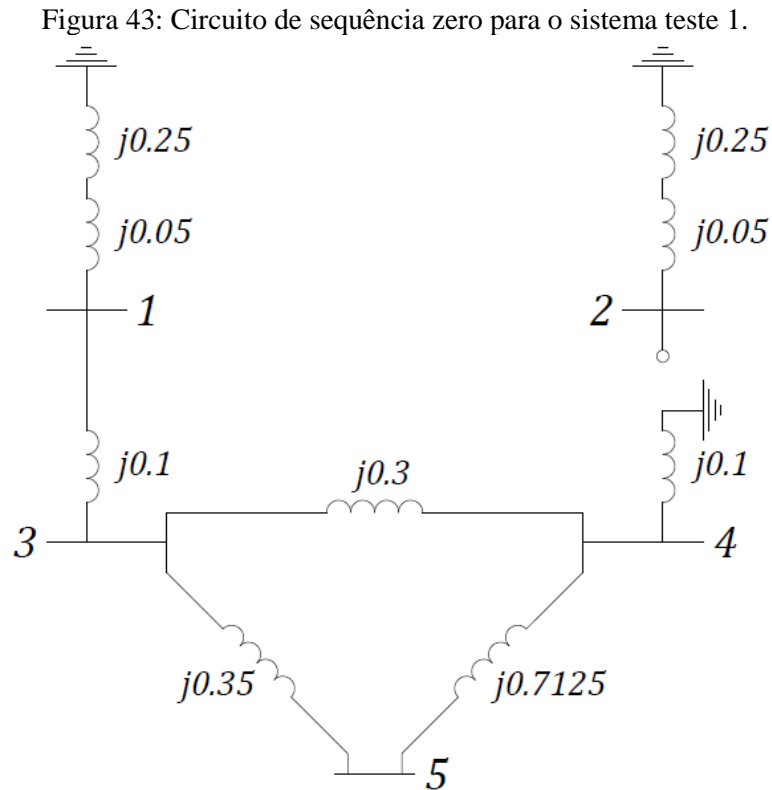
$$Z_1^{th} = (j0,25 + j0,0357143) // (j0,25 + j0,0595238) + j0,0714286 \text{ p. u.} \rightarrow \quad 6.4$$

$$Z_1^{th} = j0,22 \text{ p. u.}$$

Como a impedância de seqüência negativa de cada elemento é igual à impedância de seqüência positiva, esta pode ser determinada conforme a Equação 6.5

$$Z_2^{th} = Z_1^{th} \rightarrow Z_2^{th} = 0,22 \text{ p. u.} \quad 6.5$$

Também baseado na Sistema de potência teste 1, indicado na Figura 39, é possível obter o circuito de sequência zero, mostrado na Figura 43.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar a impedância de Thévenin de sequência zero da barra 5, faz-se necessária a transformação, de acordo com as Equações 6.6 a 6.8, do delta formado pelas barras 3, 4 e 5 em um circuito Y equivalente.

$$Z_{1Y} = \frac{(j0,30)(j0,35)}{j1,3625} \rightarrow Z_{1Y} = j0,0770642 \text{ p. u.} \quad 6.6$$

$$Z_{2Y} = \frac{(j0,30)(j0,7125)}{j1,3625} \rightarrow Z_{2Y} = j0,1568807 \text{ p. u.} \quad 6.7$$

$$Z_{3Y} = \frac{(j0,35)(j0,7125)}{j1,3625} \rightarrow Z_{3Y} = j0,1830257 \text{ p. u.} \quad 6.8$$

Logo, a impedância de Thévenin de sequência zero é dada conforme a Equação 6.9:

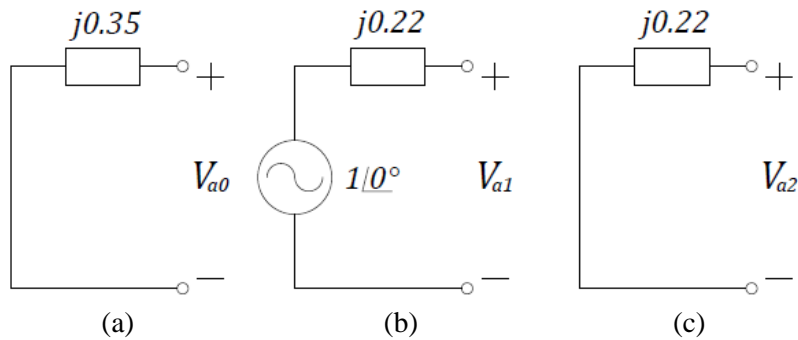
$$Z_0^{th} = (j0,40 + j0,0770642) // (j0,1 + j0,1568807) + j0,1830257 \rightarrow \quad 6.9$$

$$Z_0^{th} = j0,35 \text{ p. u.}$$

5º Passo: Representar as redes de sequência positiva, negativa e zero

As redes equivalentes de sequência positiva, negativa e zero de Thévenin, vistas da barra 5, podem ser visualizadas nas Figuras 44.a, 44.b e 44.c, respectivamente.

Figura 44: Redes de seqüência de Thévenin vistas da barra 5 do sistema teste 1. (a) Zero, (b) Positiva e (c) Negativa.



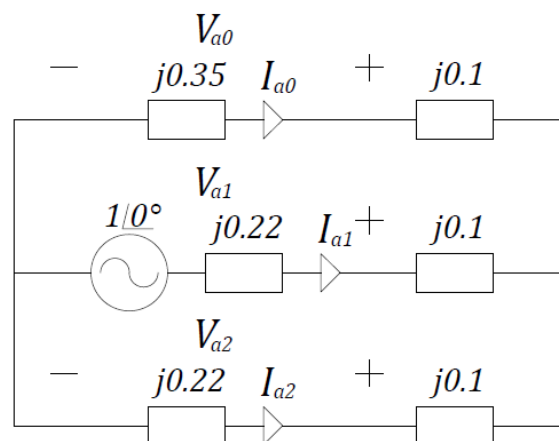
Fonte: Elaborado pelo autor.

6° Passo: Aplicar os modelos de circuitos que representam as faltas simultâneas e calcular as correntes de falta em componentes de seqüência

Aplica-se os valores de impedância equivalente obtidas no 5° passo e a tensão pré-falta aos novos circuitos equivalentes desenvolvidos, Figuras 45 a 51, e nas equações matriciais desenvolvidas no capítulo 4. Obtendo-se, então, os resultados para as correntes de falta em componentes simétricas. Todas as correntes de falta são apresentadas em valores por unidade.

- Falta D-FT ( $Z_f = j0,1 \text{ p.u.}$ )

Figura 45: Aplicação do circuito equivalente da falta D-FT em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

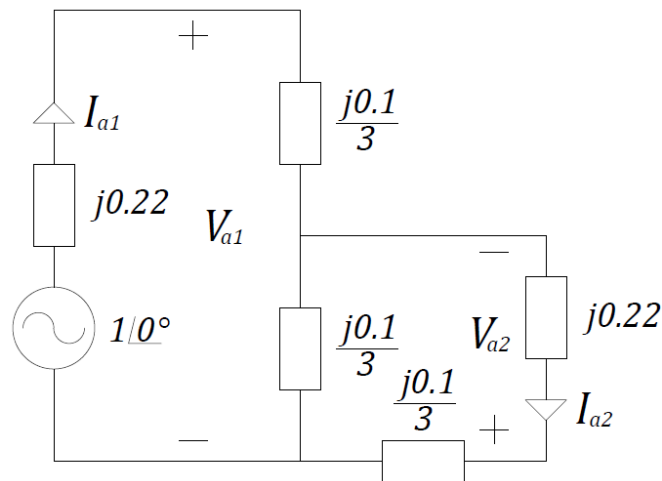
Aplicando a Equação 4.17, pode-se calcular a falta D-FT através de impedância nas fases B e C, conforme apresentado na Equação 6.10.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -j0,35 - j0,1 & j0,22 + j0,1 & 0 \\ 0 & j0,22 + j0,1 & -j0,22 - j0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1\angle 0^\circ \\ 1\angle 0^\circ \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8197\angle 90^\circ \\ 1,9723\angle -90^\circ \\ 1,1527\angle 90^\circ \end{bmatrix} p. u. \quad 6.10$$

- Falta D-FF ( $Z_f = j0,1 p. u.$ )

Figura 46: Aplicação do circuito equivalente da falta D-FF em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

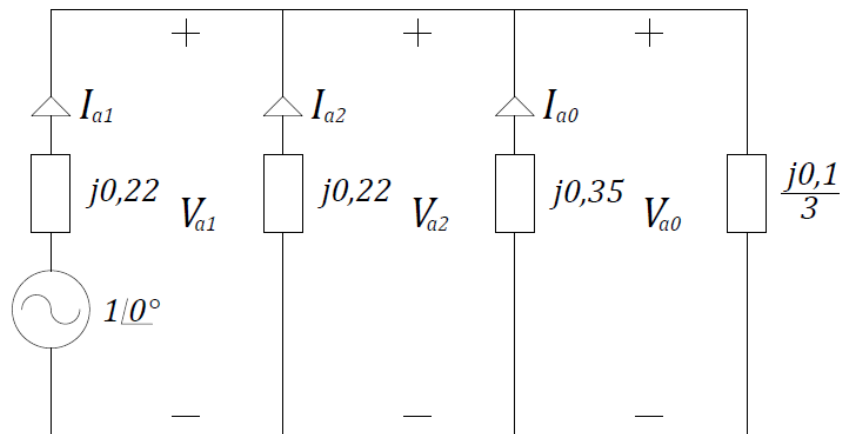
Aplicando a Equação 4.36, pode-se calcular a D-FF através de impedância nas fases AB e AC, como indicado na Equação 6.11.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j0,22 + \frac{j0,1}{3} & -\frac{j0,1}{3} \\ 0 & -\frac{j0,1}{3} & j0,22 + \frac{j0,1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1\angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0\angle 0^\circ \\ 3,5362\angle -90^\circ \\ 0,4112\angle -90^\circ \end{bmatrix} p. u. \quad 6.11$$

- Falta FT-FFT ( $Z_f = j0,1$  e  $Z_c = j0,0$ )

Figura 47: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_c = 0$ ) em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

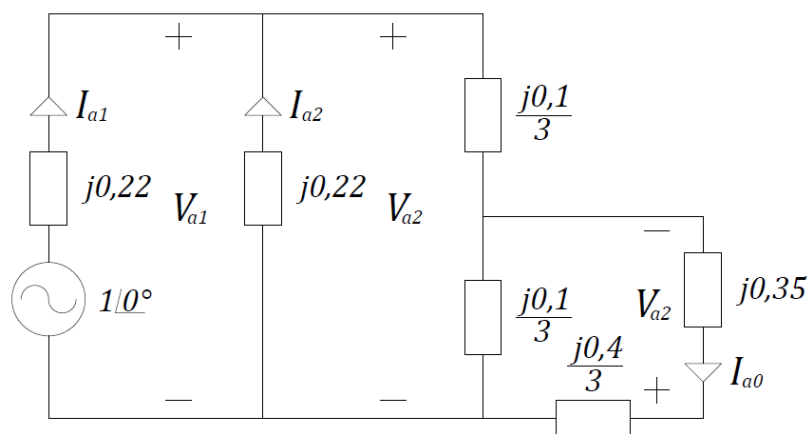
Aplicando a Equação 4.54, pode-se calcular a falta FT-FFT através de impedâncias iguais nas fases A e BC, conforme a Equação 6.12.

$$\begin{bmatrix} 0 & j0,22 & -j0,22 \\ -j0,35 & 0 & j0,22 \\ j0,35 + \frac{j0,1}{3} & \frac{j0,1}{3} & \frac{j0,1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

$$= \begin{bmatrix} 0,3096\angle 90^\circ \\ 4,0529\angle -90^\circ \\ 0,4925\angle 90^\circ \end{bmatrix} p. u.$$

- Falta FT-FFT ( $Z_f = Z_c = j0,1$ )

Figura 48: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FFT ( $Z_f = Z_c$ ) em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

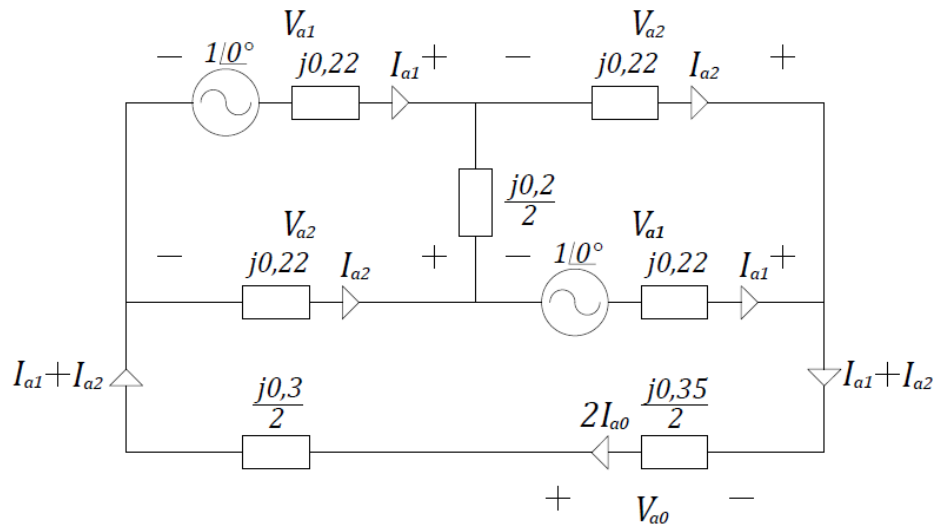
Aplicando a Equação 4.58, pode-se calcular a falta FT através de impedância e FFT franco nas fases A e BC, dada pela Equação 6.13.

$$\begin{bmatrix} 0 & j0,22 & -j0,22 \\ -\frac{j0,1}{3} & \frac{j0,2}{3} & j0,22 + \frac{j0,2}{3} \\ j0,35 + \frac{j0,5}{3} & -\frac{j0,1}{3} & -\frac{j0,1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1848\angle -90^\circ \\ 3,7053\angle -90^\circ \\ 0,8402\angle 90^\circ \end{bmatrix} p. u.$$
6.13

- Falta FT-FF ( $Z_f = j0,1$  e  $Z_c = j0,2$ )

Figura 49: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \neq Z_c$ ) em estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor.

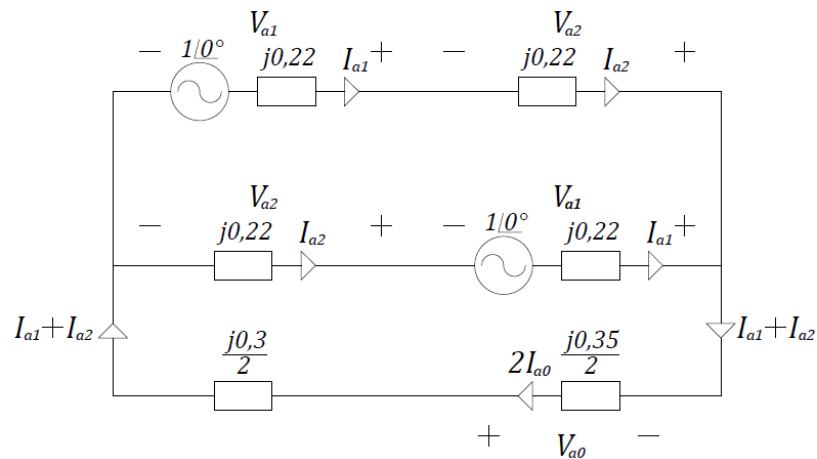
Aplicando a Equação 3.69, pode-se calcular a falta FT-FF através de impedâncias distintas nas fases A e BC, como mostra a Equação 6.14.

$$\begin{bmatrix} 0 & j0,22 + \frac{j0,2}{2} & -j0,22 - \frac{j0,2}{2} \\ j0,35 & j0,22 + \frac{j0,3}{2} & j0,22 + \frac{j0,3}{2} \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\angle 0^\circ \\ 1\angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9174\angle -90^\circ \\ 2,4799\angle -90^\circ \\ 0,6451\angle 90^\circ \end{bmatrix} p. u.$$
6.14

- Falta FT através de impedância ( $Z_c \rightarrow \infty$ )

Figura 50: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_c \rightarrow \infty$ ) em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

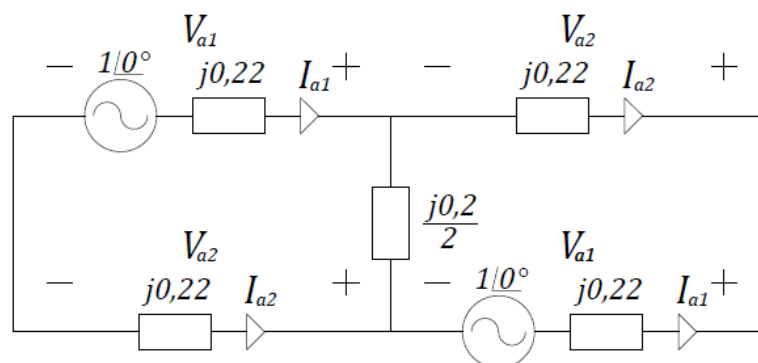
Aplicando a Equação 3.72, pode-se calcular a falta FT através de impedância na fase A (a partir do modelo da falta FT-FF por meio de impedâncias distintas), conforme indicado na Equação 6.15.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ j0,35 & j0,22 + \frac{j0,3}{2} & j0,22 + \frac{j0,3}{2} \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \quad (6.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9174 \angle -90^\circ \\ 0,9174 \angle -90^\circ \\ 0,9174 \angle -90^\circ \end{bmatrix} p. u.$$

- Falta FF através de impedância ( $Z_f \rightarrow \infty$ )

Figura 51: Aplicação do circuito equivalente da falta FT-FF ( $Z_f \rightarrow \infty$ ) em estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando a Equação 3.73, pode-se calcular a falta FF através de impedância nas fases BC (a partir do modelo da falta FT-FF por meio de impedâncias distintas), conforme a Equação 6.16.



$$\begin{bmatrix} 0 & j0,22 + \frac{j0,2}{2} & -j0,22 - \frac{j0,2}{2} \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \angle 0^\circ \\ 1,5625 \angle -90^\circ \\ 1,5625 \angle 90^\circ \end{bmatrix} p. u.$$
6.16

## 6.2 Sistema teste 1: Resultados comparativos

Os resultados são obtidos, também, a partir do ANAFAS. A Figura 52 apresenta um *print screen* da tela de saída do *software* comercial, ilustrando como são apresentados os resultados que servirão de parâmetro para validação. Os resultados apresentados são para o cálculo das correntes e tensões de falta da D-FT.

Figura 52: Resultados obtidos a partir do ANAFAS.



```

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas      Pag. 1

*** Sistema 5 Barras ***

      T E N S O E S   E   C O R R E N T E S   D E   C U R T O

                Barra      5 (B.CINCO      )
          TENSAO (pu)
    mod.  ang.  mod.  ang.      mod.  ang.  mod.  ang.
A 1.107   0.0  Z 0.287   0.0   A  0.000   0.0  Z  0.820  90.0
B 0.297 -114.4 P 0.566   0.0   B  2.973 155.6 P  1.972 -90.0
C 0.297  114.4 N 0.254   0.0   C  2.973  24.4 N  1.153  90.0

```

Fonte: *Print screen* do *software* ANAFAS.

Os valores apresentados na Figura 52 são tensões e correntes de curto-circuito, tanto em componentes de fase, como em componentes de sequência. Além disso, é válido ressaltar que todos os resultados estão em valores por unidade (p.u.). Porém, também poderiam ser obtidos em Volts e Ampère com simples configuração do *software*.

Após a realização de todas as simulações de modelos desenvolvidos no ANAFAS para o sistema teste 1, foi construída a Tabela 5 para facilitar a visualização dos resultados comparativos entre modelos analíticos e o *software* comercial ANAFAS.

Tabela 5: Comparativo entre os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de sequência – Sistema teste 1 (barra 5).

Faltas	ANAFAS			Modelos desenvolvidos		
	$I_0$ (p.u.)	$I_1$ (p.u.)	$I_2$ (p.u.)	$I_0$ (p.u.)	$I_1$ (p.u.)	$I_2$ (p.u.)
D-FT ( $Z_f=j0,1$ )	0,820∠90,0°	1,972∠ - 90,0°	1,153∠90,0°	0,8197∠90,0°	1,9723∠ - 90,0°	1,1527∠90,0°
D-FF ( $Z_f = j0,1$ )	0,000∠0,0°	3,536∠ - 90,0°	0,411∠ - 90,0°	0,000∠0,0°	3,5362∠ - 90,0°	0,4112∠ - 90,0°
FT-FFT ( $Z_f=j0,1$ e $Z_c = j0,0$ )	0,310∠90,0°	4,053∠ - 90,0°	0,493∠90,0°	0,3096∠90,0°	4,0529∠ - 90,0°	0,4925∠90,0°
FT-FFT ( $Z_f's = j0,1$ )	0,185∠ - 90,0°	3,705∠ - 90,0°	0,840∠90,0°	0,1848∠ - 90,0°	3,7053∠ - 90,0°	0,8402∠90,0°
FT-FF ( $Z_f = j0,1$ e $Z_c = j0,2$ )	0,917∠ - 90,0°	2,480∠ - 90,0°	0,645∠90,0°	0,9174∠ - 90,0°	2,4799∠ - 90,0°	0,6451∠90,0°
FT-FF $Z_f = j1,0$ e $Z_c \rightarrow \infty$ )	0,917∠ - 90,0°	0,917∠ - 90,0°	0,917∠ - 90,0°	0,9174∠ - 90,0°	0,9174∠ - 90,0°	0,9174∠ - 90,0°
FT-FF $Z_f \rightarrow \infty$ e $Z_c = j0,2$ )	0,000∠0,0°	1,562∠ - 90,0°	1,562∠90,0°	0,0000∠0,0°	1,5625∠ - 90,0°	1,5625∠90,0°

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode-se verificar na Tabela 5, todos os resultados calculados a partir dos modelos desenvolvidos nessa dissertação são iguais aos valores do ANAFAS, considerando arredondamento na terceira casa decimal (formato padrão de saída da *software*). Diante disto, as equações e circuitos desenvolvidos no capítulo 4 estão validados. A Tabela 6 apresenta o comparativo de resultados em componentes de fase.

Tabela 6: Comparativo entre os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de fase – Sistema teste 1 (barra 5).

Faltas	ANAFAS			Modelos desenvolvidos		
	$I_a$ (p.u.)	$I_b$ (p.u.)	$I_c$ (p.u.)	$I_a$ (p.u.)	$I_b$ (p.u.)	$I_c$ (p.u.)
D-FT ( $Z_f=j0,1$ )	0,000∠0,0°	2,973∠155,6°	2,973∠24,4°	0,0000∠0,00°	2,9725∠155,5673°	2,9725∠24,4327°
D-FF ( $Z_f = j0,1$ )	3,947∠ - 90,0°	3,350∠143,9°	3,350∠36,1°	3,9474∠ - 90,0°	3,3496∠143,8973°	3,3496∠36,1027°
FT-FFT ( $Z_f=j0,1$ e $Z_c = j0,0$ )	3,251∠ - 90,0°	4,457∠152,0°	4,457∠28,0°	3,2508∠ - 90,0°	4,4568∠152,0372°	4,4568∠27,9628°
FT-FFT ( $Z_f's = j0,1$ )	3,050∠ - 90,0°	4,129∠162,4°	4,129∠17,6°	3,0499∠ - 90,0°	4,1295∠162,4137°	4,1295∠17,5863°
FT-FF ( $Z_f = j0,1$ e $Z_c = j0,2$ )	2,752∠ - 90,0°	2,706∠180,0°	2,706∠0,0°	2,7523∠ - 90,0°	2,7063∠180,0°	2,7063∠0,0°
FT-FF $Z_f = j1,0$ e $Z_c \rightarrow \infty$ )	2,752∠ - 90,0°	0,000∠0,0°	0,000∠0,0°	2,7523∠ - 90,0°	0,0000∠0,0°	0,000∠0,0°
FT-FF $Z_f \rightarrow \infty$ e $Z_c = j0,2$ )	0,000∠0,0°	2,706∠180,0°	2,706∠0,0°	0,0000∠0,0°	2,7063∠180,0°	2,7063∠0,0°

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.2.1 Comparativo com faltas clássicas

Com a finalidade de comparar as correntes de falta dos curtos-circuitos clássicos com as dos curtos-circuitos simultâneos, foram calculadas, também, as correntes das faltas FFF ( $Z_f = j0,1$ ), FT ( $Z_f = j0,1$ ), FF ( $Z_f = j0,2$ ) e FF-T ( $Z_f = j0,1$ ) a partir das Equações 3.19, 3.32, 3.44 e 3.55. Após isto, utilizando a Equação 2.4, converteu-se para o domínio das componentes de fase. A Tabela 7 as correntes de falta das faltas clássicas.

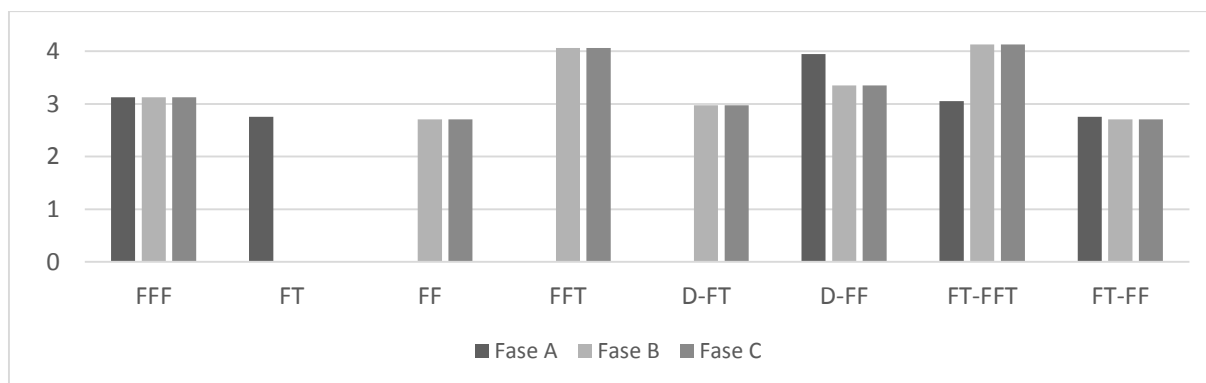
Tabela 7: Faltas clássicas calculadas na barra 5 do sistema teste 1.

Faltas	ANAFAS		
	$I_a$ (p.u.)	$I_b$ (p.u.)	$I_c$ (p.u.)
FFF ( $Z_f = j0,1$ )	$3,1250 \angle -90,0^\circ$	$3,1250 \angle 150,0^\circ$	$3,1250 \angle 30^\circ$
FT ( $Z_f = j0,1$ )	$2,7523 \angle -90,0^\circ$	$0,0000 \angle 0,0^\circ$	$0,0000 \angle 0,0^\circ$
FF ( $Z_f = j0,2$ )	$0,0000 \angle 0,0^\circ$	$2,7063 \angle 180,0^\circ$	$2,7063 \angle 0,0^\circ$
FFT ( $Z_f = j0,1$ )	$0,0000 \angle 0,0^\circ$	$4,058 \angle 165,9^\circ$	$4,058 \angle 14,1^\circ$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os resultados da Tabela 7 (faltas clássicas) com os resultados da Tabela 6 (faltas simultâneas), percebe-se que o modelo da falta FT-FF pode substituir os modelos clássicos das faltas FT e FF, uma vez que os resultados são idênticos. A Figura 53 apresenta um gráfico de barras para um comparativo visual entre as faltas clássicas e as faltas simultâneas estudadas.

Figura 53: Comparativo entre faltas clássicas e faltas simultâneas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.2.2 Rotação de fases

Para demonstrar a utilização do procedimento descrito na seção 3.2, será utilizada a falta D-FT. Inicialmente, o objetivo é calcular a D-FT nas fases A e C (referência à fase

B). Para isto, utiliza-se o resultado obtido na Equação 6.10 e aplica-os nas Equações 3.62 a 3.64; conforme indicado na Equação 6.17.

$$\begin{bmatrix} I_{b0}^F \\ I_{b1}^F \\ I_{b2}^F \end{bmatrix} = [\alpha^2 \quad 1 \quad \alpha] \begin{bmatrix} 0,8197 \angle 90^\circ \\ 1,9723 \angle -90^\circ \\ 1,1527 \angle 90^\circ \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_{b0}^F \\ I_{b1}^F \\ I_{b2}^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8197 \angle -30^\circ \\ 1,9723 \angle -90^\circ \\ 1,1527 \angle -150^\circ \end{bmatrix} \quad 6.17$$

Já para o cálculo da falta D-FT nas fases A e B (referência à fase C), utiliza-se o resultado obtido na Equação 6.10 e aplica-os nas Equações 3.65 a 3.67; conforme a Equação 6.18.

$$\begin{bmatrix} I_{c0}^F \\ I_{c1}^F \\ I_{c2}^F \end{bmatrix} = [\alpha \quad 1 \quad \alpha^2] \begin{bmatrix} 0,8197 \angle 90^\circ \\ 1,9723 \angle -90^\circ \\ 1,1527 \angle 90^\circ \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_{c0}^F \\ I_{c1}^F \\ I_{c2}^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8197 \angle -150^\circ \\ 1,9723 \angle -90^\circ \\ 1,1527 \angle -30^\circ \end{bmatrix} \quad 6.18$$

A Tabela 8 contém o comparativo entre os resultados para a falta D-FT nas fases A e C, e nas fases A e B, e os resultados obtidos no ANAFAS.

Tabela 8: Comparativo entre resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos, aliado a rotação de componentes de sequência e o ANAFAS – Sistema teste 1 (barra 5).

Faltas	ANAFAS			Modelos desenvolvidos		
	$I_0$ (p.u.)	$I_1$ (p.u.)	$I_2$ (p.u.)	$I_0$ (p.u.)	$I_1$ (p.u.)	$I_2$ (p.u.)
D-FT ( $Z_f=j0,1$ ) Fases A e C	$0,820 \angle -30,0^\circ$	$1,972 \angle -90,0^\circ$	$1,153 \angle -150,0^\circ$	$0,8197 \angle -30,0^\circ$	$1,9723 \angle -90,0^\circ$	$1,1527 \angle -150,0^\circ$
D-FT ( $Z_f=j0,1$ ) Fases A e C	$0,820 \angle -150,0^\circ$	$1,972 \angle -90,0^\circ$	$1,153 \angle -30,0^\circ$	$0,8197 \angle -150,0^\circ$	$1,9723 \angle -90,0^\circ$	$1,1527 \angle -30,0^\circ$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mais uma vez os resultados se mostraram satisfatórios, o que permite afirmar que pode-se obter as correntes de faltas para quaisquer fases envolvidas nos curtos-circuitos simultâneos desenvolvidos neste trabalho.

### 6.3 Sistema teste 2: Resultados comparativos

O sistema teste 2 é mais robusto quando comparado ao sistema teste 1, uma vez que possui um número de barras, transformadores, linhas e geradores superior. Com isso, torna-se inviável reduzir este sistema ao equivalente de Thévenin de forma analítica.

Neste caso, pode-se utilizar técnicas clássicas para montar a matriz de impedância do sistema. O passo-a-passo para a formulação da matriz de impedância de um sistema

de potência pode ser consultado em Saadat (1999). Ou ainda, é possível utilizar o próprio ANAFAS para a obtenção das impedâncias de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero vistas da barra 5 do sistema teste 2. O relatório de impedâncias de barra obtido no ANAFAS é mostrado na Figura 54.

Figura 54: Relatório de impedância de barras obtido a partir do ANAFAS.

RELATORIO DE IMPEDANCIAS DE BARRA					
IDENTIFICACAO		SEQUENCIA POS.		SEQUENCIA ZERO	
NUM.	NOME	R (%)	X (%)	R (%)	X (%)
1	BARRA-1	0.9299	8.0097	38.5606	14.0616
2	BARRA-2	1.8454	8.9968	37.4855	10.7393
3	BARRA-3	4.2537	13.2721	37.7682	10.2014
4	BARRA-4	3.0842	10.5578	36.9342	7.9656
5	BARRA-5	2.7086	10.5907	36.9194	9.2502
6	BARRA-6	3.7889	17.9269	41.2496	17.1456
7	BARRA-7	3.3567	17.5846	39.1051	16.3209
8	BARRA-8	1.9524	23.6619	38.9677	33.8476
9	BARRA-9	5.0644	19.1733	40.0652	14.6685

Fonte: Print screen do software ANAFAS.

As impedâncias vistas da barra 5 do sistema IEEE 14 barras são:  $Z_1 = Z_2 = 0,027086 + j0,105907 p.u.$ ;  $Z_0 = 0,369194 + j0,092502 p.u.$  A tensão pré-falta na barra 5 é  $0,9580 \angle -9,9^\circ$ , este valor pode ser obtido a partir de um estudo de fluxo de carga.

Uma vez conhecidos os valores de impedância de Thévenin vistas da barra 5 e a tensão pré-falta nesta mesma barra, pode-se aplicar as equações dos modelos de faltas simultâneas desenvolvidos no capítulo 4.

Tabela 9: Comparativo entre resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos e o ANAFAS em componentes de sequência – Sistema teste 2 (barra 5).

Faltas	ANAFAS			Modelos desenvolvidos		
	$I_a$ (p.u.)	$I_b$ (p.u.)	$I_c$ (p.u.)	$I_a$ (p.u.)	$I_b$ (p.u.)	$I_c$ (p.u.)
D-FT ( $Z_f=j0,1$ )	$0,000 \angle 0,0^\circ$	$5,152 \angle 165,8^\circ$	$3,130 \angle 17,3^\circ$	$0,0000 \angle 0,0^\circ$	$5,1516 \angle 165,7913^\circ$	$3,1297 \angle 17,2684^\circ$
D-FF ( $Z_f = j0,1$ )	$6,754 \angle -88,9^\circ$	$5,387 \angle 138,9^\circ$	$5,070 \angle 39,3^\circ$	$6,7536 \angle -88,8919^\circ$	$5,3866 \angle 138,8595^\circ$	$5,0703 \angle 39,2567^\circ$
FT-FFT ( $Z_f=j0,1$ e $Z_c = j0,0$ )	$5,379 \angle -93,9^\circ$	$8,382 \angle 164,0^\circ$	$7,890 \angle 26,2^\circ$	$5,3787 \angle -93,8845^\circ$	$8,3820 \angle 163,9843^\circ$	$7,8901 \angle 26,2465^\circ$

Continuação da Tabela 9.

FT-FFT ( $Z_f's=j0,1$ )	4,195∠ - 89,1°	7,352∠170,3°	8,248∠17,0°	4,1953∠ - 89,0809°	7,3519∠170,3048°	8,2479∠17,0242°
FT-FF ( $Z_f = j0,1$ e $Z_c = j0,2$ )	3,895∠ - 64,9°	3,995∠177,6°	3,995∠ - 2,4°	3,8951∠ - 64,8860°	3,9948∠177,5939°	3,9948∠ - 2,4061°
FT-FF $Z_f = j1,0$ e $Z_c \rightarrow \infty$ )	3,895∠ - 64,9°	0,000∠0,0°	0,000∠0,0°	3,8951∠ - 64,8860°	0,000∠0,0°	0,000∠0,0°
FT-FF $Z_f \rightarrow \infty$ e $Z_c = j0,2$ )	0,000∠0,0°	3,995∠177,6°	3,995∠ - 2,4°	0,000∠0,0°	3,9948∠177,5939°	3,9948∠ - 2,4061°

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresenta novas equações e novos circuitos equivalentes para cinco diferentes casos de faltas simultâneas, são estes: faltas D-FT, D-FF, FT-FFT (dois casos), e FT-FF. No capítulo 4 foram desenvolvidos todos os modelos citados utilizando a teoria de componentes simétricas e de análise de circuitos elétricos.

Foram utilizados dois sistemas de potência teste com a finalidade de aplicar os modelos para o cálculo de faltas simultâneas. O primeiro de pequeno porte, com apenas cinco barras, e o segundo de médio porte, com 14 barras. Para o sistema teste 1 foi desenvolvido todo o procedimento de aplicação dos circuitos equivalentes a partir de passos normalmente utilizados, em literaturas clássicas, no cálculo de curtos-circuitos; evidenciando, dessa forma, que a modelagem proposta permite solução analítica de correntes de faltas simultâneas.

A partir da comparação entre os resultados numéricos obtidos e os resultados de saída do *software* comercial ANAFAS, constatou-se que todos os resultados são exatamente iguais, uma vez considerado o arredondamento na terceira casa decimal para o módulo das correntes e na primeira casa decimal para o ângulo de fase.

As faltas D-FT e D-FF são modeladas a partir de impedância iguais ( $Z_f$ ). Durante a formulação do circuito equivalente destes curtos-circuitos simultâneos realizaram-se exaustivas tentativas de casos mais genéricos, como impedâncias distintas, ou ainda, uma falta através de impedância e outra franca. Porém, nestes casos, não houve êxito na obtenção de modelos mais genéricos.

No caso da falta FT-FFT, obteve-se êxito na modelagem para dois casos: ambos os curtos com impedâncias iguais, e a falta FT através de impedância e a FFT sem impedância. Durante a formulação do circuito equivalente, também, realizou-se a tentativa da obtenção de um modelo com impedâncias distintas.

Já a falta FT-FF trata-se do modelo mais importante dentre os desenvolvidos. Neste caso, obteve-se sucesso na modelagem com duas impedâncias distintas, sendo  $Z_f$  conectada entre a fase A e a terra, e  $Z_c$  conectada entre a fase B e a fase C. Como citado na seção 3.4, o circuito equivalente desenvolvido em Moura, Lopes, De Moura (2015) trata-se de um caso particular do circuito equivalente proposto neste trabalho, inclusive,

nas conclusões do artigo cita-se que a desvantagem do modelo é a ausência da impedância entre as fases B e C, evidenciando a contribuição desta dissertação. Além disso, ao fazer a impedância  $Z_f$  tender a infinito, obtém-se o circuito equivalente para a falta FF clássica e, fazendo-se a impedância  $Z_c$  tender a infinito, obtém-se o circuito equivalente para a falta FT clássica.

No comparativo entre as faltas simultâneas e as faltas clássicas percebeu-se que as correntes de curto-circuito da falta FT-FF são iguais às correntes de curto-circuito das faltas tradicionais FT e FF. Logo, permitiria a substituição dos modelos das faltas FT e FF por um único modelo, o modelo da falta simultânea FT-FF.

Através da rotação adequada das componentes de sequência, verificou-se que pode-se obter as correntes de faltas para quaisquer fases envolvidas nos curtos-circuitos simultâneos desenvolvidos neste trabalho.

Por fim, sugere-se que os novos circuitos equivalentes para as faltas D-FT, D-FF, FT -FFT, e FT-FF sejam incorporadas à literatura clássica de cálculo de curtos-circuitos em SEPs.



## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Paul Maurice. **Analysis of Faulted Power Systems**. Piscataway: IEEE press, 1995.
- ARAÚJO, A. E. A. de; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- BERGEN, Arthur R; VITTAL, V.. **Power Systems Analysis**. 1986.
- BERMÚDEZ, J. F. *et al.* **A Generalized Methodology Based on Symmetrical Components for Multiple-Fault Calculation in Power Systems**. *Electric Power Components and Systems*, v. 37, n. 10, p. 1081-1101, 2009.
- BORGES, Carmen Lucia Tancredo. **Análise de Sistemas de Potência**. 2005.
- BUALOTI, R. *et al.* **A Generalized Method for Simultaneous Fault Analysis**. In: *Electrotechnical Conference, 1996. MELECON'96., 8th Mediterranean*. IEEE, 1996. p. 721-725.
- CEPEL. **ANAFAS - Análise de Faltas Simultâneas**. Disponível em <<http://www.cepel.br/produtos/programascomputacionais/analise-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em 12 de jan. de 2018.
- COLAÇO, E. T. M.; NEVES, W. L. A.. **A Modelagem e a Simulação de Circuitos Elétricos Solidificam Conhecimentos em Análise de Sistemas de Potência**. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática e Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2008.
- DAS, J. C. **Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics**. CRC Press, 2002.
- FEHR, Ralph. **Industrial power distribution**. John Wiley & Sons, 2015.
- FORTESCUE, Charles L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, n. 2, p. 1027-1140, 1918.
- GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas. **Power System Analysis & Design**, SI Version. Cengage Learning, 2012.
- GUPTA, Anubha; CHANDRAN, Sunil V.; BHAT, S. S. Simultaneous fault analysis. In: **Power, Automation and Communication (INPAC), 2014 International Conference on**. IEEE, 2014. p. 33-38.
- ISSURY, Irwin; HENRY, David. A methodology for multiple and simultaneous fault isolation. In: **Control Conference (ECC), 2009 European**. IEEE, 2009. p. 2518-2523.
- KINDERMANN, Geraldo. **Curto circuito**. Sagra-DC Luzzatto, 1997.

MOURA, Ailson P.; LOPES, JA Peças; DE MOURA, Adriano AF. Sequence networks to the calculation of two-simultaneous faults at the same location. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 69, p. 414-420, 2015.

ROBBA, E. J.. **Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas**. Inst. Nacional do Livro, Ministério da Educação e Cultura, 1996.

ROMÉRO, Sérgio Porto *et al.* ANAFAS-Análise de Faltas Simultâneas V4. 1-Manual do Usuário. **Cepel, Rio de Janeiro, Brasil**, 2005.

ROY, L.; RAO, N. D. **Exact Calculation of Simultaneous Faults Involving Open Conductors and Line-to-Ground Short Circuits on Inherently Unbalanced Power Systems**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 8, p. 2738-2746, 1982.

RUBACK, Rodolfo Oliveira. **Análise de Faltas em Sistemas Elétricos de Potência Considerando Dados Incertos**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

SAADAT, Hadi. **Power system analysis**. WCB/McGraw-Hill, 1999.

SILVA, Murilo da. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet**. 2003. 231 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

STEVENSON, William D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

TLEIS, Nasser. **Power systems modelling and fault analysis: theory and practice**. Newnes, 2007.

WASHINGTON. **Power Systems Test Case Archive**. Disponível em <<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso em 12 de jan. de 2018.

ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

## APÊNDICE A – ARQUIVO DE DADOS: SISTEMA IEEE 14 BARRAS

A Figura 55 apresenta o arquivo de dados utilizado para a simulação do sistema IEEE 14 barras no ANAFAS.

Figura 55: Arquivo de dados do ANAFAS para o sistema IEEE 14 barras.

```

14b.dat
01 TIPO
02 A 1
03 TITU
04 L **** Sistema teste de 14 barras - IEEE ****
05 DBAR
06 (NB CEM BN VPRE ANG VBAS DISJUN DDMMAAADDMMAAAA IA SA
07 (-----)
08 1 BARRA-1 1000 1
09 2 BARRA-2 1000-5.7 1
10 3 BARRA-3 1000 -15 1
11 4 BARRA-4 956 -12 1
12 5 BARRA-5 958-9.9 1
13 6 BARRA-6 1000 -16 1
14 7 BARRA-7 984 -15 1
15 8 BARRA-8 1000 -15 1
16 9 BARRA-9 979 -17 1
17 10 BARRA-10 975 -17 1
18 11 BARRA-11 984 -17 1
19 12 BARRA-12 984 -17 1
20 13 BARRA-13 978 -17 1
21 14 BARRA-14 959 -18 1
22 99999
23 DCIR
24 (BF CE BT NCT R1 X1 R0 X0 CN S1_PgS0_Qg TAP TB TCIA DEFE KM
25 (-----)
26 1 2 1L 1.938 5.917 1.938 5.917 528 528 1
27 1 5 1L 5.40322.304 5.40322.304 492 492 1
28 2 3 1L 4.69919.797 4.69919.797 438 438 1
29 2 4 1L 5.81117.632 5.81117.632 374 374 1
30 2 5 1L 5.69517.388 5.69517.388 340 340 1
31 3 4 1L 6.70117.103 6.70117.103 346 346 1
32 4 5 1L 1.335 4.211 1.335 4.211 128 128 1
33 4 7 1T 20.912 20.912 9780 1
34 4 9 1T 55.618 55.618 9690 1
35 5 6 1T 25.202 25.202 9320 1
36 6 11 1L 9.498 1989 9.498 1989 1
37 6 12 1L12.29125.58112.29125.581 1
38 6 13 1L 6.61513.027 6.61513.027 1
39 7 8 1L 17.615 17.615 1
40 7 9 1L 11.001 11.001 1
41 9 10 1L 3.181 845 3.181 845 1
42 9 14 1L12.71127.03812.71127.038 1
43 10 11 1L 8.20519.207 8.20519.207 1
44 12 13 1L22.09219.98822.09219.988 1
45 13 14 1L17.09334.80217.09334.802 1
46 0 9 1H -52632 -52632 1
47 0 2 1C 34326 20089 34326 20089 1
48 0 3 1C 1020120.575 1020120.575 1
49 0 4 1C 18994 -1550 18994 -1550 1
50 0 5 1C115633 24344115633 24344 1
51 0 6 1C 61643 41279 61643 41279 1
52 0 9 1C 24676 13885 24676 13885 1
53 0 10 1C 74630 48095 74630 48095 1
54 0 11 1C218780112515218780112515 1
55 0 12 1C148513 38954148513 38954 1
56 0 13 1C 59811 25696 59811 25696 1
57 0 14 1C 55476 18616 55476 18616 1
58 0 1 1G 12.685 999998 1
59 0 2 1G 5660 999998 1
60 0 3 1G 5660 999998 1
61 0 6 1G 5660 999998 1
62 0 8 1G 5660 999998 1
63 99999
64 DARE
65 (NN C NOME
66 1
67 99999

```

Fonte: Print screen do software Edit CEPTEL.