

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

AUGUSTO MARCONATO DE MELO

**MÉTODOS COMPUTACIONAIS APLICADOS EM ESTUDOS
DE CURTO-CIRCUITO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Dezembro de 2016

AUGUSTO MARCONATO DE MELO

**MÉTODOS COMPUTACIONAIS APLICADOS EM ESTUDOS
DE CURTO-CIRCUITO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricista.

Orientador: Danilo Pereira Pinto

Juiz de Fora, MG - Brasil

Dezembro de 2016

Modelo disponível no site da biblioteca

<http://www.ufjf.br/biblioteca/servicos/usando-a-ficha-catalogfica/>

Melo, Augusto Marconato.

Métodos Computacionais Aplicados em Estudos de Curto-circuito nos Sistemas Elétricos de Potência/

Augusto Marconato de Melo. -- 2016.

77 f. : il.

Orientador: Danilo Pereira Pinto

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Potência. 2. Curto-circuito. 3. Algoritmo. I. Marconato de Melo, Augusto. II. Métodos Computacionais Aplicados em Estudos de Curto-circuito nos Sistemas Elétricos de Potência.

AUGUSTO MARCONATO DE MELO

**MÉTODOS COMPUTACIONAIS APLICADOS EM ESTUDOS
DE CURTO-CIRCUITO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal De Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricista.

Orientador: Danilo Pereira Pinto

Aprovada em 22 de dezembro de 2016

Prof. Danilo Pereira Pinto, D.Sc. (Orientador)

Prof. Cristiano Gomes Casagrande, D.Sc.

Prof. Vander Menengoy da Costa, D.Sc.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por proporcionar todos os momentos que vivi.

Agradeço aos meus pais, Alberto e Cláudia por todo incentivo e confiança, à minha namorada Priscilla pela compreensão e companheirismo ao longo dessa longa e valiosa jornada.

Agradeço a todos os professores da graduação em Engenharia Elétrica da UFJF que contribuíram para minha formação e em especial ao Prof. Danilo pela orientação e parceria na realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a toda minha família pelo apoio e aos amigos e colegas de curso pela amizade e contribuição para essa conquista.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Métodos Computacionais Aplicados em Estudos de Curto-circuito nos Sistemas Elétricos de Potência

Augusto Marconato de Melo

Dezembro, 2016

Orientador: Danilo Pereira Pinto.

Os estudos relacionados a curtos-circuitos no Sistema Elétrico de Potência são fundamentais para o estabelecimento de parâmetros de planejamento e coordenação dos sistemas de proteção das redes elétricas.

O presente trabalho apresenta métodos computacionais, aplicados aos Sistemas Elétricos de Potência, a fim de monitorar as correntes e tensões de todo o sistema quando estes sofrem curtos-circuitos simétricos (trifásico e trifásico-terra) e assimétricos (monofásicos, bifásicos e bifásicos-terra). Para análise desses curtos-circuitos, utiliza-se as teorias de Componentes Simétricos, Método da Admitância Nodal e Método do Vetor Esperso e Técnicas de Esparsidade.

Por fim, será implementado, a partir da teoria apresentada, um algoritmo desenvolvido no software MATLAB para o cálculo das tensões e correntes em todo o sistema após a ocorrência de curtos-circuitos de qualquer natureza. O algoritmo avalia também a influência da variação da impedância de curto-circuito em função da corrente de curto-circuito no sistema analisado.

ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to UFJF as a partial fulfilment of the requirements for the title of Electrical Engineer.

Computational Methods Applied on Short Circuit Studies in Power Systems

Augusto Marconato de Melo

December, 2016

Supervisor: Danilo Pereira Pinto.

The studies related to short circuits in Electric Power System are fundamental to the establishment of planning parameters and coordination of protection systems for power grids.

This paper presents computational methods applied to Electric Power Systems in order to monitor the currents and voltages of the whole system when they suffer symmetrical short circuits (three-phase and phase-to-ground) and asymmetric (single-phase, two-phase and two-phase-to-ground) . For analysis of short circuits, it uses the theories of Symmetrical Components, Admittance Method Nodal and Vector Method Sparse and techniques sparsity.

Finally, it was implemented from the presented theory, an algorithm developed in MATLAB software to calculate the voltages and currents throughout the system after the occurrence of short circuits of any kind. The algorithm also assesses the influence of the variation in short-circuited due to the short-circuit current impedance of the analyzed system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama Unifilar de um Sistema Elétrico de Potência.....	19
Figura 2.2 Símbolos utilizados em diagramas unifilares.....	20
Figura 2.3 a) Sequência Positiva para geradores conectados em Y e Y aterrado. b) Sequência Negativa para geradores conectados em Y e Y aterrado. c) Sequência Zero para geradores conectados em Y aterrado. d) Sequência Zero para geradores conectados em Y aterrado por uma impedância Z_n ou conectados em Y com $Z_n = \infty$	22
Figura 2.4 a) Sequência Positiva para motores de indução. b) Sequência Negativa para motores de indução.....	23
Figura 2.5 Representação no diagrama de impedâncias dos transformadores de núcleo envolvido ou envolvente, entre duas barras R e S, para as sequências Positiva e Negativa	24
Figura 2.6 Representação no diagrama de impedâncias dos transformadores de núcleo envolvente, entre duas barras, para sequência Zero	24
Figura 2.7 Representação no diagrama de impedâncias do transformador Y aterrado - Y aterrado de núcleo envolvido, entre duas barras, para sequência Zero	25
Figura 2.8 Representação no diagrama de impedâncias das linhas de transmissão, entre duas barras R e S, para as sequências Zero, Positiva e Negativa.....	25
Figura 2.9 Representação dos elementos da rede, através de suas impedâncias, entre quaisquer duas barras	26
Figura 2.10 Representação dos elementos da rede, através de suas admitâncias, entre quaisquer duas barras	28
Figura 2.11 Substituição direta para obtenção do vetor y a partir de uma matriz triangular inferior	31
Figura 2.12 Substituição inversa para obtenção do vetor x a partir de uma matriz triangular superior	31
Figura 2.13 Representação trifásica de um sistema de potência com uma falha na barra p.....	32
Figura 2.14 Representação das matrizes de admitância de falha para cada tipo de curto	35
Figura 3.1 Sistema de Potência de 14 barras	39
Figura 3.2 Importação dos dados e armazenamento das informações	40
Figura 3.3 Montagem das matrizes de Incidência Reduzida.....	41
Figura 3.4 Montagem das matrizes de Impedância Primitiva	42
Figura 3.5 Cálculo de Y_{barra}	42
Figura 3.6 Cálculo de VZ_{barra} para sequência positiva e negativa	43
Figura 3.7 Cálculo de VZ_{barra} para sequência zero	44
Figura 3.8 Cálculo das correntes e tensões de curto-circuito monofásico.....	45
Figura 3.9 Cálculo das correntes nos ramos para ocorrências de curto monofásico	46
Figura 4.1 Módulo das correntes na fase 'a' para curto na barra 5	52
Figura 4.2 Módulo das correntes na fase 'a' para curto na barra 12	52
Figura 4.3 Módulo das correntes nas fases 'a', 'b' e 'c' para curto na barra 3	56
Figura 4.4 Módulo das correntes nas fases 'a', 'b' e 'c' para curto na barra 11	57
Figura 4.5 Módulo das correntes nas fases 'b' e 'c' para curto na barra 3.....	61
Figura 4.6 Módulo das correntes nas fases 'b' e 'c' para curto na barra 11	61
Figura 4.7 Módulo das correntes nas fases 'b' e 'c' para curto na barra 3.....	65
Figura 4.8 Módulo da corrente na fase 'b' para curto na barra 11	66
Figura 4.9 Módulo da corrente na fase 'c' para curto na barra 11	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Códigos para a representação dos elementos da rede.....	36
Tabela 2 Códigos para os tipos de curto-circuito	37
Tabela 3 Banco de dados Sistema 14 barras.....	38
Tabela 4 Códigos das barras representadas	39
Tabela 5 Correntes de curto-circuito monofásico.....	47
Tabela 6 Comparação entre as correntes determinísticas e a utilização da matemática intervalar	48
Tabela 7 Tensões de curto-circuito monofásico	49
Tabela 8 Correntes de curto-circuito monofásico na barra 5.....	50
Tabela 9 Tensões nas barras do sistema para curto monofásico na barra 5	51
Tabela 10 Correntes de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra	53
Tabela 11 Tensões de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra.....	53
Tabela 12 Correntes de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra na barra 3	54
Tabela 13 Tensões nas barras do sistema para curto Trifásico Trifásico-Terra na barra 3	55
Tabela 14 Correntes de curto-circuito Bifásico	57
Tabela 15 Tensões de curto-circuito Bifásico	58
Tabela 16 Correntes de curto-circuito bifásico na barra 3.....	59
Tabela 17 Tensões nas barras do sistema para curto bifásico na barra 3	60
Tabela 18 Correntes de curto-circuito bifásico-terra.....	62
Tabela 19 Tensões de curto-circuito bifásico-terra	62
Tabela 20 Correntes de curto-circuito bifásico-terra na barra 5.....	63
Tabela 21 Tensões nas barras do sistema para curto bifásico-terra na barra 5.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{base1}	: Tensão de base na região 1;
V_{base2}	: Tensão de base na região 2;
N_1	: Número de espiras no primário do transformador;
N_2	: Número de espiras no secundário do transformador;
Z_{base}	: Impedância de base;
$V_{L,base}$: Tensão de linha de base;
$S_{3\phi,base}$: Potência trifásica de base;
$I_{L,base}$: Corrente de linha de base;
V_{pu}	: Tensão em pu;
S_{pu}	: Potência aparente em pu;
I_{pu}	: Corrente em pu;
Z_{pu}	: Impedância em pu;
V_L	: Tensão de linha em volts;
$S_{3\phi}$: Potência aparente trifásica em VA;
I_L	: Corrente de linha em ampères;
Z	: Impedância em ohms;
$Z_{pu,nova}$: Impedância de base da nova base;
$V_{base,nova}$: Tensão de linha de base da nova base;

$S_{base,nova}$: Potência trifásica de base da nova base;
V_a	: Tensão na fase a;
V_b	: Tensão na fase b;
V_c	: Tensão na fase c;
V_{a1}	: Componente de sequência positiva da fase a;
V_{a2}	: Componente de sequência negativa da fase a;
V_{a0}	: Componente de sequência zero da fase a;
I_n	: Corrente de neutro;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
CAPÍTULO 1	15
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Contribuições do Trabalho	16
1.3 Estrutura do Trabalho	16
CAPÍTULO 2	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Representação do Sistema Elétrico de Potência	17
2.1.1 Elementos do Sistema Elétrico de Potência	18
2.1.2 Modelagem dos Elementos no Diagrama de Impedâncias	20
2.2 Método da Admitância Nodal	26
2.2.1 Matriz de Impedância Primitiva	26
2.2.2 Matriz de Admitância Primitiva	27
2.2.3 Matriz de Incidência Reduzida	28
2.2.4 Matriz <i>Ybarra</i>	28
2.3 Método do Vetor Esperso e técnicas de esparsidade aplicados em Sistemas de Potência	29
2.4 Estudos de Curto-Circuito a partir de <i>Zbarra</i>	31
CAPÍTULO 3	36
3. IMPLEMENTAÇÃO	36
3.1 Considerações Iniciais	36

3.1.1	Descrição dos elementos do Sistema Elétrico de Potência	36
3.1.2	Impedância de Aterramento dos Elementos da Rede	37
3.1.3	Tipos de Curto-circuito	37
3.2	Banco de Dados	37
3.2.1	Entrada de dados do usuário	40
3.3	Montagem das Matrizes de Incidência Reduzida	40
3.4	Montagem das Matrizes de Impedância Primitiva	41
3.5	Cálculo da Matriz $Ybarra$	42
3.6	Vetor de $Zbarra$ correspondente à barra de curto-circuito	43
3.7	Funções para os cálculos de curto-circuito	44
CAPÍTULO 4		47
4.	RESULTADOS	47
4.1	Curto-circuito Monofásico	47
4.2	Curto-circuito Trifásico ou Trifásico-terra	53
4.3	Curto-circuito Bifásico	57
4.4	Curto-circuito Bifásico-terra	62
CAPÍTULO 5		67
5.	CONCLUSÕES	67
5.1	Sugestões Para Estudos Futuros	67
6.	REFERÊNCIAS	69
A.	REVISÃO SISTEMAS POR UNIDADE	70
A.1	Sistemas Por Unidade	70
B.	REVISÃO COMPONENTES SIMÉTRICOS	73
B.1	Componentes Simétricos	73
B.2	Componentes Simétricos – sistemas desacoplados	76

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser definido pelo conjunto que engloba os equipamentos e instalações utilizados nos setores de geração, transmissão e distribuição, utilização da energia elétrica representada pelas cargas, sistemas de operação e manutenção, proteção e controle de energia elétrica.

Sabe-se que o Sistema Elétrico de Potência está constantemente sujeito a curtos-circuitos tanto permanentes quanto temporários de diversas naturezas. Dentre as causas desses surtos, podem-se destacar as causas naturais, ou seja, tempestades, galhos de árvores, pássaros, vento, neve ou problemas de outras naturezas como atos de vandalismo, problemas de isolamento do sistema ou manutenção incorreta, dentre vários outros. Segundo KINDERMANN (1997), a maior parte das falhas, cerca de 89% delas, ocorrem nas linhas de transmissão, visto que estas geralmente percorrem grandes distâncias em todos os tipos de terreno e clima. Cerca de 6% acontecem na Geração e apenas 5% nas Subestações.

Em relação à ocorrência dos tipos de curto-circuito, ainda segundo KINDERMANN (1997), a maior parte destes, são os curtos fase-terra que representam 63% das ocorrências, seguidos pelos curtos bifásico-terra com 16%, bifásico com 15% e por fim o curto-circuito trifásico com apenas 6% das ocorrências registradas.

A motivação pela escolha desse tema, é devido à importância dos estudos no Sistema Elétrico de Potência, buscando melhores soluções, para o imenso número de falhas que ocorrem nos sistemas de potência de grande porte, como por exemplo o sistema brasileiro. Segundo relatório do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 2015, o sistema elétrico brasileiro apresentou mais de 2300 falhas, mais de seis falhas por dia, onde grande parte dessas atinge o consumidor final com cortes no fornecimento de energia elétrica. De acordo com o relatório do ONS, nos cinco anos anteriores, as ocorrências variaram de 2258 a 2670 casos por ano.

Tais perturbações alteram as grandezas elétricas nominais do sistema (correntes, tensões e frequência) e são as principais causadoras de interrupções no fornecimento de energia elétrica, o que mostra a importância dos estudos realizados no SEP para a manutenção do perfeito

funcionamento de todo o sistema. Dessa forma, este trabalho pretende apresentar a representação do SEP, o cálculo das matrizes que caracterizam os SEP e como calcular as correntes e tensões após a ocorrência das falhas para todos os tipos de curto-circuito especificados. Tais estudos são imprescindíveis para a quantificação da variação das grandezas elétricas e a mais rápida eliminação da falta, a fim de preservar os equipamentos que compõem o sistema.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um software acadêmico de cálculo de curto-circuito, capaz de avaliar as variações das grandezas tensões em todas as barras e correntes em todos os ramos, além de analisar a influência da variação da impedância de curto nas correntes de curto-circuito de um sistema elétrico de potência.

1.2 Contribuições do Trabalho

Tal trabalho pretende contribuir com uma aplicação no cálculo de curto-circuito obtendo resultados para uma ampla variação da impedância de curto-circuito em dado sistema de potência, uma vez que o valor de tal impedância é difícil de ser obtido com precisão. Outra contribuição é a utilização de técnicas de esparsidade aplicada aos Sistemas Elétricos de Potência com a finalidade de tornar os cálculos mais eficientes.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura com as principais teorias utilizadas para o estudo proposto. Assim, é feita a representação do Sistema Elétrico de Potência e a apresentação dos métodos da admitância nodal e do vetor esparso. No capítulo 3 será apresentada a metodologia utilizada na implementação do algoritmo proposto para o cálculo de curto-circuito. No capítulo 4 são obtidos e analisados os resultados de simulações feitas utilizando o algoritmo proposto e um sistema de potência exemplo. Por fim, no capítulo 5, são feitas as considerações finais com a conclusão e algumas propostas de continuidade do trabalho. O presente trabalho conta também com uma revisão de sistemas por unidade e a teoria de componentes simétricos apresentados nos apêndices A e B respectivamente.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentadas algumas teorias fundamentais para a execução e o perfeito entendimento do algoritmo proposto. Serão apresentados todos os elementos que podem fazer parte do Sistema Elétrico de Potência e como esses elementos são representados em um Diagrama Unifilar da rede. Será discutida também a utilização do sistema por unidade (pu) e de Componentes Simétricos para análise dos dados da rede, a aplicação do Método de Admitância Nodal e o Método do vetor Esparso.

2.1 Representação do Sistema Elétrico de Potência

Os Sistemas Elétricos de Potência podem ser representados por desenhos integrais de toda a rede trifásica, inclusive com o neutro, resultando nos chamados Diagramas Multifilares. Entretanto, como os sistemas são projetados e operados para serem trifásicos equilibrados, torna-se conveniente a simplificação desses desenhos. Na maioria das vezes, utiliza-se Diagramas Unifilares, ou seja, representação de apenas uma das fases e o neutro do sistema.

Em um Diagrama Unifilar, a representação da rede é feita através de *barras* (nós ou barramentos) e *ramos* que são os locais de interligação dos elementos que compõe o sistema às barras. Os elementos devem ser identificados por meio de símbolos específicos padronizados e no Diagrama Unifilar, deve conter a informação de qual o modo de ligação desses elementos.

A partir do Diagrama Unifilar da rede, elabora-se o Diagrama de Impedâncias, que é utilizado nos cálculos de análise de Sistemas Elétricos de Potência. Tal diagrama deve conter a representação dos modelos dos elementos da rede conectados bem como todas as suas impedâncias. A montagem do Diagrama de Impedâncias é feita a partir de todas as grandezas normalizadas no sistema por unidade (pu) como medida de simplificação da análise numérica, visto que ela elimina os diferentes níveis de tensão da rede causados pelos transformadores. Outras vantagens da utilização do sistema por unidade na análise de curto-circuito são comentadas no Apêndice A.

Simplificações no diagrama de impedância nos leva a definir os diagramas de reatâncias. Desprezam-se os ramos de magnetização dos modelos dos transformadores, devido ao elevado rendimento destes equipamentos. Em outras palavras, a corrente de magnetização do núcleo,

responsável pelas perdas no ferro é desprezível. Desprezam-se as reatâncias *shunt* nos modelos das linhas, devido aos valores de correntes nestes ramos serem muito inferiores aos valores de correntes nos ramos série. As resistências nos modelos dos componentes dos sistemas são muito menores que as reatâncias, em outras palavras, o sistema é projetado para operar com pequenas perdas ôhmicas, o que nos leva a poder desprezar estas resistências. Além disso, as cargas estáticas não contribuem para a corrente de curto circuito e podem ser desprezadas. A parcela da carga com característica dinâmica representada por motores de indução ou motores síncronos devem ser representadas pois estas, na presença de um distúrbio, passam a gerar energia e contribuem para a corrente de curto circuito.

Como o estudo em questão se trata de análise de curto-circuito no SEP e muitos desses curtos-circuitos são desequilibrados, outra medida a fim de simplificar a solução do sistema, é utilizar o método de Componentes Simétricos (apresentado no Apêndice B). Assim, o sistema de potência é representado pelos diagramas de reatâncias em PU para estudos de curto-circuito, a partir dos modelos em componentes de sequência positiva, negativa e zero (sistemas equilibrados) e não mais em componentes de fase ‘abc’ desequilibrado. Cabe ressaltar que para curtos-circuitos simétricos, os sistemas serão representados pelos diagramas de reatâncias de sequência positiva (monofásico equivalente).

2.1.1 Elementos do Sistema Elétrico de Potência

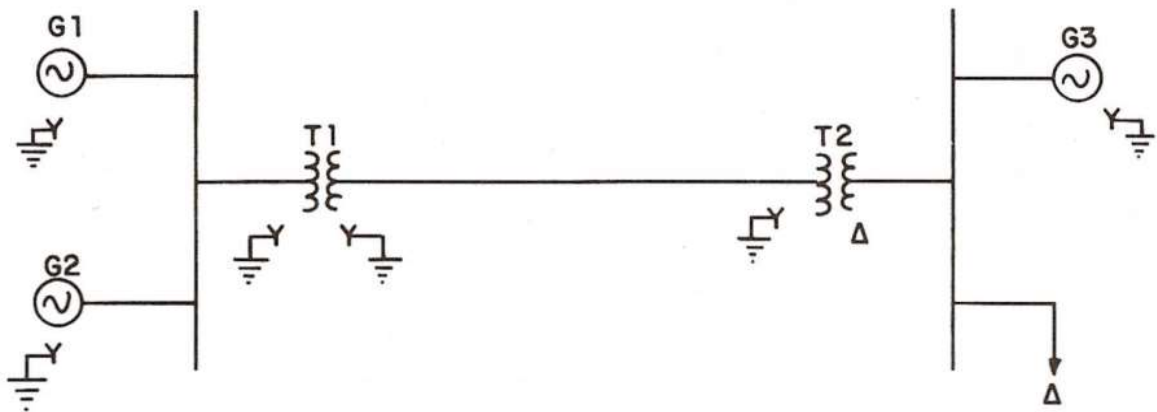
Os principais elementos de um Sistema Elétrico de Potência são os Geradores, Transformadores, Linhas de Transmissão e as Cargas.

Os geradores representam qualquer tipo de fonte de energia elétrica. Em sistemas de grande porte, podem representar usinas hidrelétricas, PCH's, usinas termelétricas, solares, eólicas, biomassa dentre várias outras fontes responsáveis por suprir as demandas de potência das cargas. Os transformadores são os equipamentos responsáveis por elevar ou abaixar os níveis de tensão do sistema, assim, podem representar as subestações nos Diagramas Unifilares. As linhas de transmissão representam o longo caminho entre a fonte geradora e a carga consumidora do SEP. Finalmente, as cargas representam os consumidores comerciais, residências ou industriais. Nos níveis de alta tensão, as cargas representadas nos diagramas do sistema são agregações de todas as cargas de determinada região que são atendidas. Assim, a carga é dinâmica e muda com a variação da tensão e da frequência. Entretanto, parte desta carga agregada apresenta um comportamento estático (resistivo) e outra parcela apresenta um

comportamento dinâmico, podendo ser representada por um motor síncrono ou de indução. Após um pequeno período da ocorrência do curto, os motores síncronos e de indução atuam como fonte alimentando a falta. A corrente de contribuição dos motores é causada por uma tensão eletromotriz gerada pelo fluxo do rotor (variável e residual). Já quanto à parcela resistiva, não existe nenhum fluxo criando tal contribuição para a corrente de curto, sendo assim como dito, ela é desprezada nas análises.

Na Figura 2.1 temos um exemplo de um Diagrama Unifilar de um Sistema Elétrico de Potência e na Figura 2.2 alguns dos principais símbolos utilizados para essa representação.

Figura 2.1 Diagrama Unifilar de um Sistema Elétrico de Potência



Fonte: ALMEIDA; FREITAS, 1995, p.100.

Figura 2.2 Símbolos utilizados em diagramas unifilares

	- MÁQUINA ROTATIVA (SÍMBOLO BÁSICO)
	- GERADOR DE c.a.
	- MOTOR ELÉTRICO
	- BARRA (BARRAMENTO) NÚMERO <u>B</u>
	- TRANSFORMADOR DE 2 ENROLAMENTOS (NOTAÇÃO AMERICANA)
	- TRANSFORMADOR DE 2 ENROLAMENTOS (NOTAÇÃO ALEMÃ)
	- TRANSFORMADOR DE 3 ENROLAMENTOS (NOTAÇÃO AMERICANA)
	- TRANSFORMADOR DE 3 ENROLAMENTOS (NOTAÇÃO ALEMÃ)
Y	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO ISOLADO.
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO.
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DA IMPEDÂNCIA Z_N .
Δ	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM TRIÂNGULO

Fonte: ALMEIDA; FREITAS, 1995, p.102.

2.1.2 Modelagem dos Elementos no Diagrama de Impedâncias

Para estudos de curto simétricos, a solução é obtida através do circuito monofásico equivalente, sendo uma das fases adotada como referência, e as demais fases são obtidas apenas defasando de + ou - 120°, de acordo com a sequência de fases do sistema. Conforme mencionado nas seções anteriores, para estudos de curtos-circuitos desequilibrados é conveniente representar o sistema através das componentes de sequência, obtidas a partir do Teorema de Fortescue.

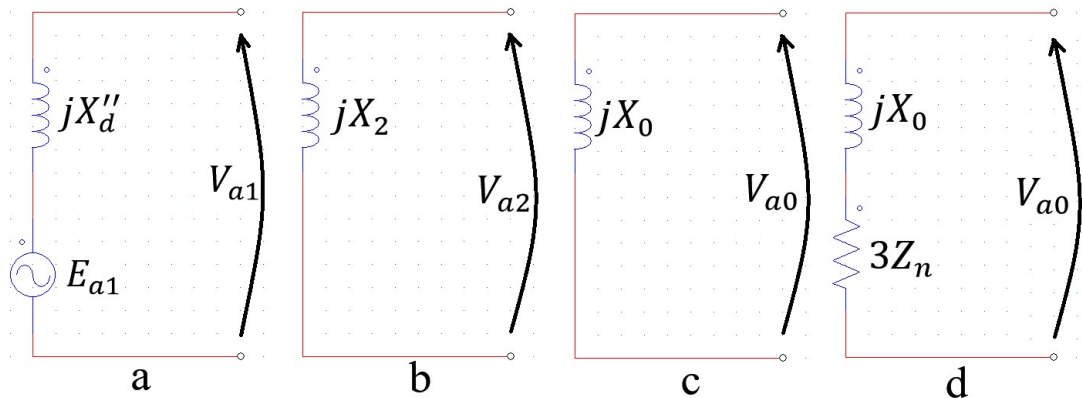
Para modelagem do diagrama de impedância ou reatância do sistema, torna-se fundamental conhecer a configuração da rede e as impedâncias (ou reatâncias) de sequência (positiva, negativa e zero) de cada elemento. Essas grandezas são obtidas a partir de ensaios em laboratórios, pela característica do material e forma de ligação, obtidas diretamente com os fabricantes dos equipamentos que já realizaram os ensaios ou ainda através de transformações da componente de fase em componentes de sequência.

O *gerador síncrono* é um elemento ativo em situação de curto-circuito. Na ocorrência do curto, para um pequeno intervalo de tempo, o gerador fornece uma potência e esta tende a permanecer constante, a tensão cai, logo a corrente aumenta, contribuindo para a corrente de curto. Para uma análise de curto-circuito no gerador, a corrente de curto pode ser subdividida em três períodos de tempo distintos. O primeiro corresponde ao período subtransitório em que o gerador possui reatância igual a X_d'' (reatância subtransitória de eixo direto), o segundo é o período transitório e sua reatância é igual a X_d' (reatância transitória de eixo direto), e o terceiro caracterizado pelo período permanente onde a reatância é designada por X_d (reatância de eixo direto). Como o gerador é um elemento ativo e deseja-se calcular a corrente imediatamente após a ocorrência do distúrbio, para sequência positiva, utiliza-se no modelo X_d'' , que vai provocar a maior corrente de curto no sistema, em série com uma fonte de tensão ideal E_{a1} representando a tensão de fase no terminal do gerador girando a vazio. Para a sequência negativa, como o gerador é construído perfeitamente equilibrado, o campo magnético do seu rotor só poderá gerar tensões equilibradas na sequência abc. Portanto o modelo de sequência negativa é um circuito passivo sem fonte de tensão. Nos geradores síncronos de pólos salientes com enrolamentos amortecedores, a reatância de sequência negativa pode ser obtida pela expressão 2.1 onde, X_2 é a reatância de sequência negativa e X_q'' é a reatância subtransitória de eixo de quadratura. Para sequência zero, o gerador também se comporta como um circuito passivo. Caso exista impedância de aterramento, tem-se que a corrente de sequência zero passa por cada uma das fases do gerador, assim, a corrente que sobe pelo aterramento e passa pela impedância Z_n é $3I_0$, sendo I_0 a corrente em cada fase.

Os modelos para a representação dos geradores no diagrama de impedâncias podem ser vistos na Figura 2.3, onde X_0 é a reatância de sequência zero, Z_n é a impedância de aterramento e as tensões V_{a0} , V_{a1} e V_{a2} são as tensões de sequência na fase “a” em relação ao neutro do gerador.

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (2.1)$$

Figura 2.3 a) Sequência Positiva para geradores conectados em Y e Y aterrado. b) Sequência Negativa para geradores conectados em Y e Y aterrado. c) Sequência Zero para geradores conectados em Y aterrado. d) Sequência Zero para geradores conectados em Y aterrado por uma impedância Z_n ou conectados em Y com $Z_n = \infty$

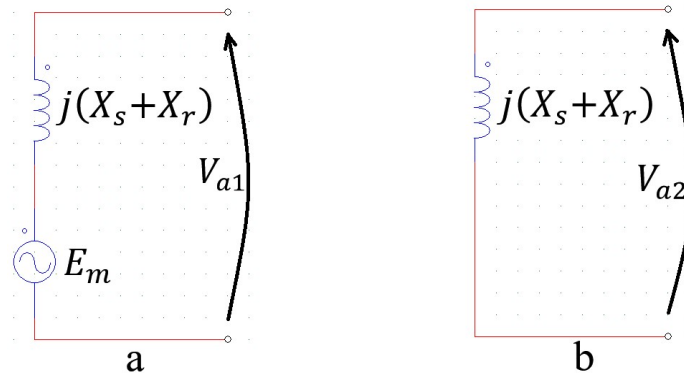


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O *motor síncrono* possui um funcionamento muito semelhante ao dos geradores síncronos. A única diferença reside na direção do fluxo de potência. Para os geradores, o fluxo vai da conversão de energia mecânica para elétrica, já nos motores síncronos, o fluxo vai da conversão de energia elétrica para mecânica. Assim, a representação no Diagrama de Impedâncias dos motores síncronos é idêntica à que foi feita para os geradores da Figura 2.3.

Da mesma maneira que os geradores e motores síncronos, os *motores assíncronos* ou de *indução*, também contribuem para as correntes de curto-circuito, porém a representação no diagrama de impedâncias é diferente das anteriores e pode ser analisada na Figura 2.4, onde X_s é a reatância de dispersão da bobina do estator, X_r é a reatância de dispersão da bobina do rotor referida ao estator e E_M é a tensão por fase nos terminais do motor de indução antes do defeito. O motor de indução não tem sequência zero já que para essa componente ele é uma impedância infinita, ou seja, não há indução, pois não há fluxo magnético resultante quando se alimenta o estator com corrente de sequência zero.

Figura 2.4 a) Sequência Positiva para motores de indução. b) Sequência Negativa para motores de indução

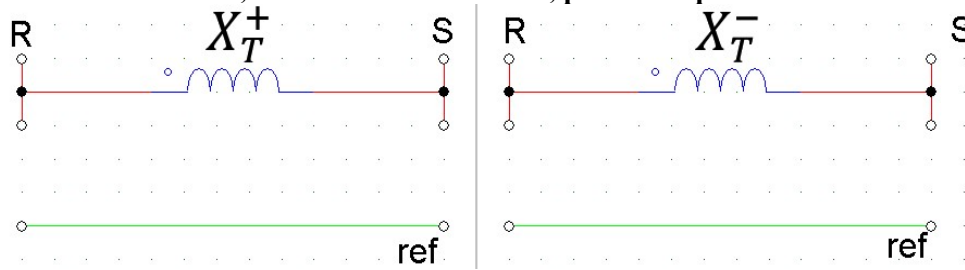


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A representação no diagrama de impedância dos *transformadores* também é bastante simples. O problema é que essas representações mudam, principalmente para a sequência zero, dependendo da forma de ligação do primário e do secundário destes (podem ser uma das combinações dois a dois entre delta, Y, Y aterrado ou Y aterrado por impedância Z_n). Para as sequências positiva e negativa, as formas de ligação não influenciam na representação do transformador conectado entre duas barras do sistema. Outro fator determinante na representação é a forma e o tipo de enrolamento dos condutores no núcleo. Estes podem ser de núcleo envolvido ou núcleo envolvente.

Os transformadores de núcleo envolvente são utilizados nos sistemas elétricos de alta tensão, devido seu maior rendimento. São mais eficientes (menores perdas) e são mais pesados (devido a maior quantidade de ferro), em comparação com os de núcleo envolvidos. Conseqüentemente, estes possuem maior custo. Já os transformadores de núcleo envolvido, são menos eficientes, porém são os mais utilizados nas redes de distribuição e nas indústrias, dado seu custo reduzido, quando comparado com os de núcleo envolvente. A partir dos ensaios realizados nos transformadores para obtenção das suas reatâncias, observa-se também que as reatâncias de sequências são iguais, ou seja, $X_T^+ = X_T^- = X_T^0$. Na Figura 2.5 temos a representação para sequência positiva e negativa, em que X_T^+ é a reatância de sequência positiva e X_T^- é a reatância de sequência negativa.

Figura 2.5 Representação no diagrama de impedâncias dos transformadores de núcleo envolvido ou envoltente, entre duas barras R e S, para as seqüências Positiva e Negativa



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Algumas das combinações mais utilizadas quanto aos tipos de ligação no primário e secundário dos transformadores são mostradas na Figura 2.6 assim como a representação para seqüência zero nos transformadores de núcleo envolvente.

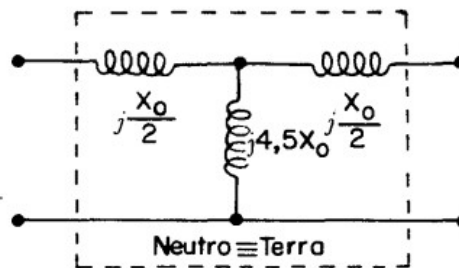
Figura 2.6 Representação no diagrama de impedâncias dos transformadores de núcleo envolvente, entre duas barras, para seqüência Zero

SÍMB.	DIAGRAMA DE LIGAÇÕES	CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SEQÜENCIA ZERO

Fonte: STEVENSON, 1986, p.319.

Para os transformadores de núcleo envolvido, a representação da sequência zero torna-se bastante similar à feita nos de núcleo envolvente, com a diferença de ser considerado um enrolamento adicional, denominado delta fictício, entre os enrolamentos do primário e secundário para terra. Esse delta fictício tem a função de quantificar a maior dificuldade da passagem do fluxo magnético por um caminho de diferente relutância em relação ao material do núcleo, visto que de acordo com as características construtivas do núcleo, o fluxo magnético não está totalmente contido no núcleo ferromagnético, diferentemente do que ocorre no transformador de núcleo envolvente. Para exemplificar, a Figura 2.7 mostra a representação do transformador de núcleo envolvido Y aterrado Y aterrado com o delta fictício, onde o valor de $4,5X_0$ é aproximadamente o valor obtido por ensaios, para o delta fictício.

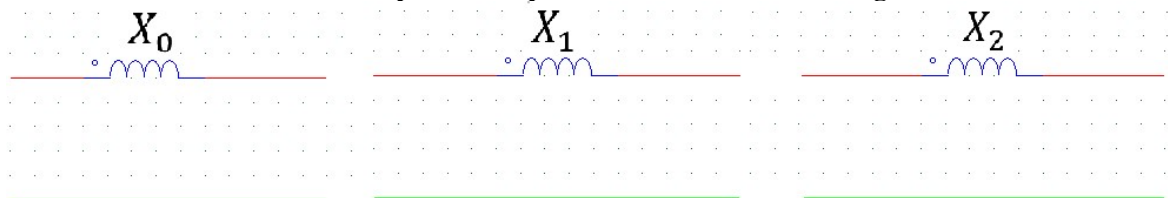
Figura 2.7 Representação no diagrama de impedâncias do transformador Y aterrado - Y aterrado de núcleo envolvido, entre duas barras, para sequência Zero



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.92.

Por fim, a *linha de transmissão* é o elemento mais simples de se representar no diagrama de impedâncias. Uma linha entre duas barras quaisquer de um sistema é representada por sua reatância de sequência positiva, negativa e zero de acordo com a Figura 2.8.

Figura 2.8 Representação no diagrama de impedâncias das linhas de transmissão, entre duas barras R e S, para as sequências Zero, Positiva e Negativa



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.2 Método da Admitância Nodal

Para o estudo dos curtos-circuitos em redes trifásicas, foi adotado o método da admitância nodal. Nesse método, faz-se necessário o estudo e o cálculo das matrizes de Admitância Primitiva, Incidência Reduzida e por fim as matrizes Admitância/Impedância de barra, a partir dos dados do sistema em análise. As matrizes devem ser calculadas, no caso de curtos-circuitos desequilibrados, em componentes de sequência positiva, negativa e zero. Já para curtos equilibrados, apenas o cálculo da sequência positiva se torna necessário.

2.2.1 Matriz de Impedância Primitiva

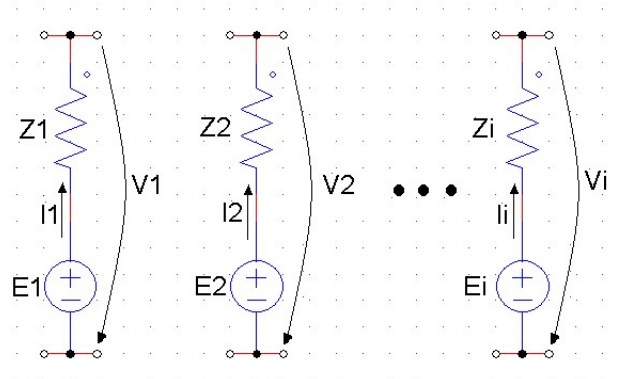
Como visto na seção 2.1, “todos os elementos de uma rede podem ser representados através de um conjunto de ramos individuais, formados por uma impedância em série com uma fonte de tensão, para o qual se pode escrever equações de tensões em cada ramo” Anderson (1995, p. 366). Estas equações chamam-se “equações primitivas” e a rede desconectada de “rede primitiva” mostrada na Figura 2.9. As equações primitivas são facilmente escritas como:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} - \mathbf{E} \quad (2.2)$$

Onde,

- \mathbf{E} = Vetor coluna das fontes de tensão de cada ramo, definido pelo aumento de tensão na direção de \mathbf{I} ;
- \mathbf{I} = Vetor coluna de correntes dos ramos com a direção escolhida arbitrariamente, mas posteriormente usado para definir a orientação do ramo;
- \mathbf{Z} = Matriz de impedâncias primitivas próprias (diagonal) e mútuas (fora da diagonal) dos ramos.

Figura 2.9 Representação dos elementos da rede, através de suas impedâncias, entre quaisquer duas barras



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Em sistemas de energia, os ramos da rede são muitas vezes mutuamente acoplados, especialmente na rede de sequência zero. Em tais casos, a matriz primitiva contém termos fora da diagonal para esses elementos mutuamente acoplados. Suas dimensões são: N° de Ramos x N° de Ramos. Assim, a matriz de Impedâncias Primitivas pode de montada de acordo com a Equação 2.3. Considerando “r” o número de ramos em um sistema de “b” barras temos:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1r} \\ Z_{21} & Z_{22} & & Z_{2r} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{r1} & Z_{r2} & \cdots & Z_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- Z_{kk} = Impedância própria do ramo k; $k = 1, \dots, r$
- Z_{kl} = Impedância mútua entre os ramos k e l; $k, l = 1, \dots, r$

2.2.2 Matriz de Admitância Primitiva

De forma análoga, todos os elementos de uma rede podem ser representados através de uma coleção de ramos individuais, formados por uma admitância em paralelo com uma fonte de corrente.

As matrizes de Admitâncias Primitivas são formadas a partir da matriz inversa de Impedâncias Primitivas. As matrizes de Impedâncias Primitivas são obtidas a partir dos dados dos componentes que constituem a rede do sistema. Logo, as dimensões das matrizes de Admitância Primitiva são: N° de Ramos x N° de Ramos. Partindo da equação primitiva 2.2 que relaciona a matriz de Impedâncias Primitivas e multiplicando ambos os lados por $\mathbf{Z}^{-1} = \mathbf{Y}$, temos:

$$\mathbf{YV} = \mathbf{YZI} - \mathbf{YE} \quad (2.4.1)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} + \mathbf{YE} \quad (2.4.2)$$

Onde,

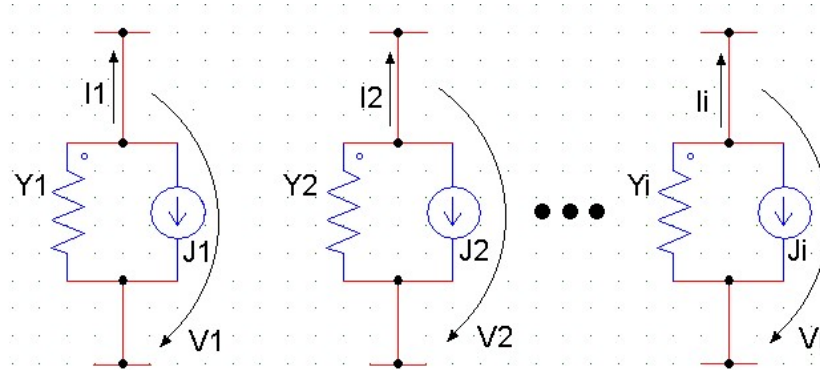
$$\mathbf{J} = -\mathbf{YE} \quad (2.4.3)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} - \mathbf{J} \quad (2.5)$$

- \mathbf{Y} = Matriz de admitâncias primitivas próprias (diagonal) e mútuas (fora da diagonal) dos ramos.

O circuito equivalente para a Equação 2.5 é apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 Representação dos elementos da rede, através de suas admitâncias, entre quaisquer duas barras



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.2.3 Matriz de Incidência Reduzida

A matriz de Incidência Reduzida fornece a informação sobre a forma como os vários ramos (ou elementos) estão conectados para formar a rede. Ela é obtida através de um grafo orientado das correntes do sistema. Suas dimensões são: N° de Barras x N° de Ramos.

A montagem do grafo da rede é feita através de uma escolha de orientação em função dos fluxos de corrente, em cada ramo do diagrama de impedância, para cada componente de sequência. Após arbitrados os sentidos dos fluxos nos ramos (escolhido um sentido para um componente de sequência, esse deve ser mantido nos demais), segue-se a seguinte regra para o preenchimento das posições na montagem da matriz de Incidência Reduzida:

$$\begin{cases} +1, & \text{se o ramo } i \text{ incide na barra } j \text{ com orientação para dentro da barra.} \\ -1, & \text{se o ramo } i \text{ incide na barra } j \text{ com orientação para fora da barra.} \\ 0, & \text{se o ramo } i \text{ não incide na barra } j. \end{cases} \quad (2.6)$$

Com a finalidade de tornar a matriz linearmente independente, deve-se desconsiderar a linha da matriz referente ao nó de referência para o cálculo da Y_{barra} .

2.2.4 Matriz Y_{barra}

Após as construções das matrizes de Admitância Primitiva (Y_{prim}) e Incidência Reduzida (A), pode-se montar a matriz de Admitância de Barras (Y_{barra}). Essa matriz possui

várias propriedades interessantes a serem consideradas para as aplicações envolvendo curtos-circuitos. Algumas dessas propriedades são destacadas em ANDERSON (1995):

- O somatório dos elementos em qualquer linha ou coluna é igual a zero.
- Ligar um novo ramo entre quaisquer dois terminais j e k (adicionar um novo elemento na rede) gera uma nova rede cuja matriz de admitância de barras pode ser formada apenas adicionando linhas e colunas j e k na matriz de admitância original.
- O efeito de se conectar qualquer admitância Y entre quaisquer terminais j e k de uma rede é adicionar Y aos elementos da diagonal principal na posição jj e kk , e subtrair Y dos elementos fora da diagonal jk e kj .

A matriz Admitância de Barras é formada de números complexos ($Y = G + jB$), simétrica (na maioria dos sistemas), esparsa, têm dimensões N° de Barras LI x N° de Barras LI (as barras Linearmente Independentes são todas do sistema menos a barra de referência) e é obtida através da seguinte operação:

$$Y_{barra} = AY_{prim}A^t \quad (2.7)$$

2.3 Método do Vetor Esperso e técnicas de esparsidade aplicados em Sistemas de Potência

Para análise de curto-circuito, é fundamental a obtenção da matriz de Impedância de Barras Z_{barra} . Os elementos de Z_{barra} são definidos como: Z_{ii} – impedância própria de circuito aberto ou impedância de Thévenin, necessária para o cálculo das correntes de curto-circuito e Z_{ij} – impedância de transferência de circuito aberto ou impedância equivalente entre as barras i e j do sistema, necessárias para os cálculos de correntes nos ramos e tensões nas outras barras da rede.

Obtém-se a matriz Z_{barra} pela inversão de Y_{barra} , visto que $Z_{barra} = Y_{barra}^{-1}$. Assim, visando minimizar o tempo computacional nessa inversão da matriz e otimizar o armazenamento de dados, é utilizado o Método do Vetor Esperso e as técnicas de esparsidade aplicadas aos sistemas de potência.

O problema consiste em resolver um sistema linear do tipo $Ax = b$ pelo Método do Vetor Esperso para obter o vetor (coluna/linha) da matriz Z_{barra} correspondente à barra de

curto. Esse procedimento evita a inversão da matriz \mathbf{Y}_{barra} inteira, pois apenas será necessária a linha/coluna correspondente à barra do curto em análise, assim, reduzindo significativamente o custo computacional principalmente para redes maiores. Assim, para sistemas de grande porte, espera-se um melhor desempenho tendo em vista o grau de esparsidade da matriz \mathbf{Y}_{barra} .

Considerando a solução do sistema linear da Equação 2.8 temos:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.8)$$

- $\mathbf{Y}_{barra} = \mathbf{A}$;
- \mathbf{b} = vetor de zeros e o valor 1 na posição da barra onde ocorreu o curto;
- \mathbf{x} = vetor de solução que contém as Impedâncias de barras da posição da barra de curto.

Utilizando a Eliminação de Gauss para fatorar a matriz \mathbf{A} em uma matriz \mathbf{LU} , tem-se:

$$\mathbf{A} = \mathbf{LU} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{LUx} = \mathbf{b} \quad (2.10)$$

Considerando $\mathbf{y} = \mathbf{Ux}$, na Equação 2.10, obtém-se as Equações 2.11 e 2.12.

$$\mathbf{Ly} = \mathbf{b} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{Ux} = \mathbf{y} \quad (2.12)$$

Assim, através da técnica do vetor esparso, \mathbf{y} é obtido por substituição direta na Equação 2.11 visto que \mathbf{L} é uma matriz triangular inferior. A substituição direta é feita de acordo com a Figura 2.11:

Figura 2.11 Substituição direta para obtenção do vetor y a partir de uma matriz triangular inferior

$$\begin{bmatrix} \downarrow & 0 & 0 \\ & & \\ & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ \\ \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Com o valor de y calculado, faz-se a substituição inversa na Equação 2.12 visto que U é uma matriz triangular superior. A substituição inversa é feita de acordo com a Figura 2.12:

Figura 2.12 Substituição inversa para obtenção do vetor x a partir de uma matriz triangular superior

$$\begin{bmatrix} \uparrow & & \\ 0 & & \\ 0 & 0 & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \\ \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim, tem-se o cálculo do vetor de solução x que representa o vetor da matriz Z_{barra} referente à barra que se quer analisar o curto-circuito. É a partir do cálculo desses vetores x para sequência positiva, negativa e zero que se calculam as correntes e tensões de curto-circuito discutidas na seguinte seção.

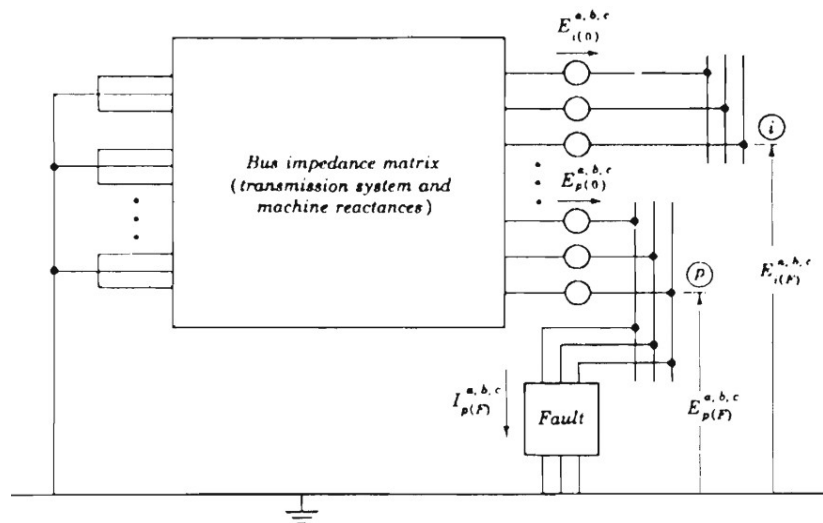
2.4 Estudos de Curto-Circuito a partir de Z_{barra}

De acordo com STAGG e EL-ABIAD (1979), desde quando se desenvolveram as técnicas que proporcionaram a aplicação a um computador digital da matriz de impedância com relação aos barramentos, tornou-se possível utilizar o teorema de Thévenin para o cálculo de curtos-circuitos. Nesse contexto, tornou-se simples a obtenção das correntes e tensões de curto-circuito em todo o sistema visto que apenas algumas operações, partindo da matriz Z_{barra} , precisam ser feitas.

A figura 2.13 traz as impedâncias de todos os componentes do sistema de transmissão que são representadas pela matriz de impedância de barra e as tensões em cada barramento referente ao solo. Na barra “p” observa-se a ocorrência da falha.

As equações serão descritas em componentes simétricos, pois como discutido no Apêndice B deste trabalho, eles facilitam os cálculos para análise de curtos desequilibrados.

Figura 2.13 Representação trifásica de um sistema de potência com uma falha na barra p



Fonte: STAGG,EL-ABIAD, 1979,p170.

Escrevendo a equação de performance para o sistema em componentes de sequência positiva, negativa e zero temos:

$$\mathbf{E}_{BUS(F)}^{0,1,2} = \mathbf{E}_{BUS(0)}^{0,1,2} - \mathbf{Z}_{barra}^{0,1,2} \mathbf{I}_{BUS(F)}^{0,1,2} \quad (2.13)$$

Onde,

$\mathbf{E}_{BUS(F)}^{0,1,2}$ = Vetor de tensões (desconhecidas) de falta nas barras do sistema;

$\mathbf{E}_{BUS(0)}^{0,1,2}$ = Vetor de tensões (conhecidas) antes da ocorrência de curto. Pode ser obtido pelo fluxo de potência ou considerando por simplificação, 1pu para sequência positiva (as tensões nas barras de um sistema operando normalmente ficam em torno de 1pu) e 0 para as sequências negativas e zero (inicialmente o sistema opera de forma equilibrada);

E fazendo as substituições, onde \mathbf{U} é a matriz identidade:

$$\mathbf{I}_{p(F)}^{0,1,2} = \mathbf{Y}_F^{0,1,2} (\mathbf{U} + \mathbf{Z}_{pp}^{0,1,2} \mathbf{Y}_F^{0,1,2})^{-1} \mathbf{E}_{p(F)}^{0,1,2} \quad (2.18)$$

Para a equação de solução das tensões de curto-circuito na barra de curto, basta substituir $\mathbf{I}_{p(F)}^{0,1,2}$ em 2.15. Assim:

$$\mathbf{E}_{p(F)}^{0,1,2} = \mathbf{Z}_F^{0,1,2} (\mathbf{Z}_F^{0,1,2} + \mathbf{Z}_{pp}^{0,1,2})^{-1} \mathbf{E}_{p(0)}^{0,1,2} \quad (2.19)$$

Expressando em função da matriz admitância de falha, substitui-se $\mathbf{I}_{p(F)}^{0,1,2}$ da equação 2.17 na equação “p” do sistema 2.14. Logo:

$$\mathbf{E}_{p(F)}^{0,1,2} = (\mathbf{U} + \mathbf{Z}_{pp}^{0,1,2} \mathbf{Y}_F^{0,1,2})^{-1} \mathbf{E}_{p(0)}^{0,1,2} \quad (2.20)$$

Da mesma maneira, pode-se obter a equação que calcula todas as tensões em todas as barras do sistema. Basta substituir $\mathbf{I}_{p(F)}^{0,1,2}$ da equação 2.16 ou 2.18 nos outros barramentos do sistema mostrado em 2.14. Assim:

$$\mathbf{E}_{i(F)}^{0,1,2} = \mathbf{E}_{i(0)}^{0,1,2} - \mathbf{Z}_{ip}^{0,1,2} (\mathbf{Z}_F^{0,1,2} + \mathbf{Z}_{pp}^{0,1,2})^{-1} \mathbf{E}_{p(0)}^{0,1,2} \quad \text{para } i \neq j \quad (2.21)$$

Ou,

$$\mathbf{E}_{i(F)}^{0,1,2} = \mathbf{E}_{i(0)}^{0,1,2} - \mathbf{Z}_{ip}^{0,1,2} \mathbf{Y}_F^{0,1,2} (\mathbf{U} + \mathbf{Z}_{pp}^{0,1,2} \mathbf{Y}_F^{0,1,2})^{-1} \mathbf{E}_{p(0)}^{0,1,2} \quad \text{para } i \neq j \quad (2.22)$$

Por fim, as correntes de curto-circuito que percorrem os componentes do sistema podem ser calculadas a partir das equações 2.19 e 2.21 ou 2.20 e 2.22. Assim, a corrente trifásica no elemento $i - j$ é calculada por:

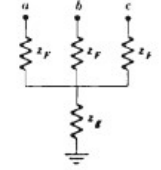
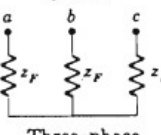
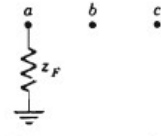
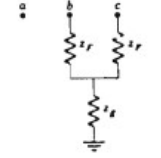
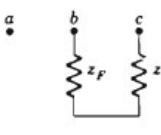
$$\mathbf{i}_{ij(F)}^{0,1,2} = \mathbf{y}_{ij,\rho\sigma}^{0,1,2} \mathbf{v}_{\rho\sigma(F)}^{0,1,2} \quad (2.23)$$

Onde, $\rho\sigma$ refere-se aos elementos $i - j$ e mutuamente acoplados. Então:

$$\mathbf{i}_{ij(F)}^{0,1,2} = \mathbf{y}_{ij,\rho\sigma}^{0,1,2} (\mathbf{E}_{\rho(F)}^{0,1,2} - \mathbf{E}_{\sigma(F)}^{0,1,2}) \quad (2.24)$$

Como mostrado anteriormente, para o cálculo das correntes e tensões de curto-circuito, é necessário que se tenha as matrizes de impedâncias ou admitâncias de falhas para cada tipo de curto-circuito. Neste trabalho, os cálculos no algoritmo foram feitos utilizando as matrizes de admitâncias de falhas mostradas na Figura 2.14 para os respectivos casos de curto-circuito:

Figura 2.14 Representação das matrizes de admitância de falha para cada tipo de curto

Type of fault	Symmetrical components		
	$Y_F^{0,1,2}$		
 <p>Three-phase-to-ground</p>	$ \begin{bmatrix} y_0 & 0 & 0 \\ 0 & y_F & 0 \\ 0 & 0 & y_F \end{bmatrix} $ <p>where $y_0 = \frac{1}{z_f + 3z_g}$</p>		
 <p>Three-phase</p>	$ y_F \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $		
 <p>Line-to-ground</p>	$ \frac{y_F}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} $		
 <p>Line-to-line-to-ground</p>	$ \frac{1}{3(z_f^2 + 2z_f z_g)} \begin{bmatrix} 2z_f & -z_f & -z_f \\ -z_f & 2z_f + 3z_g & -(z_f + 3z_g) \\ -z_f & -(z_f + 3z_g) & 2z_f + 3z_g \end{bmatrix} $		
 <p>Line-to-line</p>	$ \frac{y_F}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} $		

Fonte: STAGG,EL-ABIAD, 1979, p177.

Após a apresentação de toda a revisão dos conceitos aplicados no cálculo de curto-circuito feita neste capítulo, no Capítulo 3 será apresentada a implementação do algoritmo utilizando todos estes conceitos abordados.

Capítulo 3

IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a implementação feita em MATLAB utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 2.

3.1 Considerações Iniciais

Para que se faça a coleta dos dados do Sistema Elétrico de Potência a ser analisado no algoritmo, são necessárias algumas considerações e definições iniciais. Nesta seção define-se então como será feita a descrição dos TIPOS dos elementos e a descrição das suas impedâncias de aterramento.

3.1.1 Descrição dos elementos do Sistema Elétrico de Potência

Para possibilitar o cálculo da matriz incidência reduzida de sequência zero e das correntes de falta nos ramos do sistema, faz-se necessária a discriminação dos TIPOS de todos os elementos do Sistema Elétrico de Potência. Assim, foram criados os códigos para identificação dos elementos nas linhas de programação mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 Códigos para a representação dos elementos da rede

Código	Elemento da Rede (TIPO)
0	Linhas
1	Transformador Y_{at}/Δ
2	Transformador Y_{at}/Y
3	Transformador Y_{at}/Y_{at}
4	Transformador Δ/Δ
5	Transformador Δ/Y_{at}
6	Transformador Δ/Y
7	Transformador Y/Y
8	Transformador Y/Y_{at}
9	Transformador Y/Δ
10	Motor/Gerador síncrono Y_{at}
11	Motor/Gerador síncrono Y
12	Motor de Indução

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.1.2 Impedância de Aterramento dos Elementos da Rede

Elementos com impedância de aterramento $Z_{n(Aterramento)}$ infinita, ou seja, elementos sem aterramento, deve ser informado no banco de dados um valor consideravelmente grande porém finito. Como sugestão, pode-se considerar o valor de $1 \times 10^9 j$ para impedância infinita. O motivo dessa consideração se deve ao fato de que para calcular as matrizes Z_{barra} , o MATLAB inverte as matrizes $Z_{primitivas}$ e sendo esses elementos infinitos, a resposta seria indeterminada. Com a consideração de um elemento finito de valor relativo grande, os cálculos são feitos corretamente sem erros relevantes de aproximação.

3.1.3 Tipos de Curto-circuito

Outra consideração essencial precisa ser feita quanto aos tipos de curto-circuito. Assim, a Tabela 2 mostra os códigos designados para cada tipo de curto-circuito a ser analisado. As siglas BC, BCT e AT significam respectivamente: curto entre as fases “B” e “C”, curto entre as fases “B” e “C” com ligação para terra e curto entre a fase “A” e a terra do sistema.

Tabela 2 Códigos para os tipos de curto-circuito

Código	Curto-circuito
0	Trifásico-terra
1	Trifásico
2	Bifásico BC
3	Bifásico-terra BCT
4	Monofásico AT

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2 Banco de Dados

A coleta das informações da rede é feita a partir de um arquivo .xlsx (arquivo Excel). Nesse arquivo devem conter as seguintes informações:

- Quais são as barras a que um determinado componente do sistema está conectado, ou seja, as barras DE e barras PARA. Caso o elemento seja um motor ou gerador, as barras DE e PARA devem ser as mesmas, visto que estes são terminais e nunca se encontram entre duas barras distintas.
- Quais são os tipos dos componentes, seguindo os códigos da Tabela 1.

- Quais são as impedâncias próprias de sequência positiva, negativa e zero dos componentes do sistema, dados em pu.
- Quais são as impedâncias mútuas entre os elementos do sistema. Deve ser descrito entre quais ramos estão as impedâncias mútuas seguido do valor da mesma.

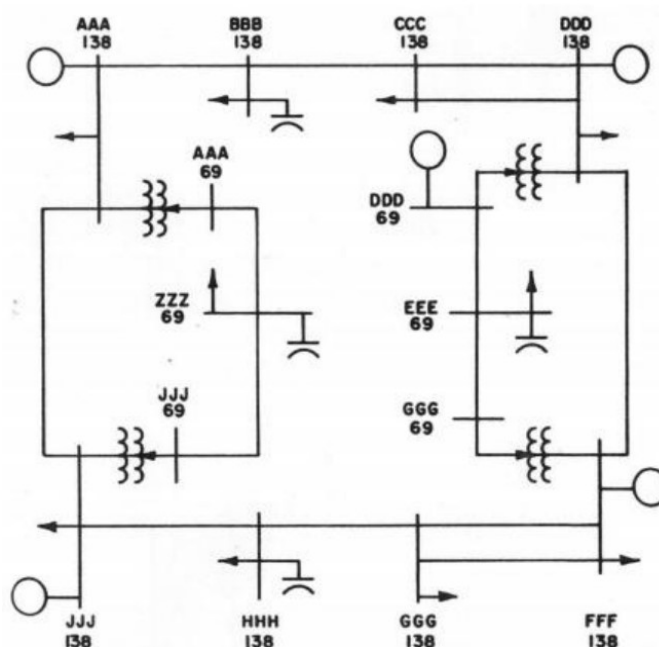
Para exemplificar, a Tabela 3 mostra o banco de dados do Sistema de Potência, (ANDERSON,1995) que será utilizado para várias simulações e cálculos de curto-circuito. É a partir deste sistema que serão apresentados alguns dos resultados e conclusões do presente trabalho. O Sistema é mostrado na Figura 3.1. A Tabela 4 mostra a relação adotada entre os códigos da Figura 3.1 e as barras adotadas.

Tabela 3 Banco de dados Sistema 14 barras

DE	PARA	TIPO	Banco de dados						Mútuas			
			Zpos		Zneg		Zzero+3Zat		Nº Ramo	Nº Ramo	Zm	
			R	X	R	X	R	X			R	X
1	1	10	0	0,01	0	0,01	0,001	0,06	6	7	0	0,2
1	9	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,134	0,6	14	15	0	0,22
1	2	5	0	0,12	0	0,12	0	0,12	0	0	0	0
1	7	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,135	0,65	0	0	0	0
2	11	0	0,35	0,42	0,35	0,42	0,134	0,6	0	0	0	0
3	10	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,15	0,7	0	0	0	0
3	10	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,15	0,7	0	0	0	0
3	4	5	0	0,12	0	0,12	0,01	0,3	0	0	0	0
3	5	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,17	0,6	0	0	0	0
3	3	10	0	0,01	0	0,01	0,001	0,07	0	0	0	0
4	12	0	0,35	0,42	0,35	0,42	0,7	1,2	0	0	0	0
5	5	10	0	0,01	0	0,01	0,001	0,05	0	0	0	0
5	6	5	0	0,12	0	0,12	0,015	0,35	0	0	0	0
5	14	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,15	0,65	0	0	0	0
5	14	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,175	0,7	0	0	0	0
6	12	0	0,35	0,42	0,35	0,42	0,75	1,2	0	0	0	0
7	7	12	0,002	0,1	0,002	0,1	1,00E+09	1,00E+09	0	0	0	0
7	13	0	0,067	0,2	0,067	0,2	0,15	0,655	0	0	0	0
7	8	5	0	0,12	0	0,12	0	0,12	0	0	0	0
8	11	0	0,35	0,42	0,35	0,42	0,7	1,25	0	0	0	0
9	10	0	0,034	0,1	0,034	0,1	0,085	0,35	0	0	0	0
13	14	0	0,034	0,1	0,034	0,1	0,075	0,3	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 3.1 Sistema de Potência de 14 barras



Fonte: ANDESSON, 1995.

Tabela 4 Códigos das barras representadas

Código	Barra
AAA138	1
AAA69	2
DDD138	3
DDD69	4
FFF138	5
GGG69	6
JJJ138	7
JJJ69	8
BBB138	9
CCC138	10
ZZZ69	11
EEE69	12
HHH138	13
GGG138	14

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No MATLAB, com o arquivo do banco de dados devidamente preenchido, faz-se a importação deste do Excel e o armazenamento dos dados em vetores dados na Figura 3.2.

Figura 3.2 Importação dos dados e armazenamento das informações

```
%% Importando o Banco de Dados do Excel:
DADOS= xlsread('Banco_de_Dados_Eletrica');

%% Armazenando os dados em vetores:
DE      = DADOS(:,1);
PARA    = DADOS(:,2);
TIPO    = DADOS(:,3);
Zpos_pu = DADOS(:,4)+j*DADOS(:,5);
Zneg_pu = DADOS(:,6)+j*DADOS(:,7);
Zzero_pu = DADOS(:,8)+j*DADOS(:,9);
Elem1   = DADOS(:,10);
Elem2   = DADOS(:,11);
Zmutuas = DADOS(:,12)+j*DADOS(:,13);
```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2.1 Entrada de dados do usuário

Além do banco de dados com os dados do sistema de potência, o usuário precisa entrar também com os dados do tipo de curto-circuito a ser analisado, de acordo com a Tabela 2, a barra do sistema que se quer analisar o curto-circuito e as impedâncias de curto-circuito Z_g e Z_f que serão necessárias para utilização das matrizes de admitâncias de falhas.

3.3 Montagem das Matrizes de Incidência Reduzida

A montagem da matriz de Incidência Reduzida é bastante trivial para os componentes de sequência positiva e negativa. Por definição, temos que estas são iguais. Assim, essas matrizes podem ser montadas a partir de um loop no algoritmo mostrado na Figura 3.3, onde, inicialmente se inicializa a matriz de incidência positiva (A_{pos}) com as suas dimensões ($n_{barras} \times n_{ramos}$), como uma matriz de zeros e faz-se um loop varrendo todos os ramos e preenchendo por colunas os valores adequados de acordo com a regra apresentada na Equação 2.6. Calculada a matriz Incidência Reduzida de sequência positiva, apenas se iguala à matriz Incidência Reduzida de sequência negativa.

Para a montagem da matriz de sequência zero, além de se considerar os mesmos requisitos anteriores, faz-se necessário uma análise dos tipos dos componentes. De acordo com a análise do diagrama de impedâncias ou reatâncias de sequência zero dos componentes,

verifica-se diferentes configurações dependendo desses tipos. Assim, para cada um desses casos, deve-se analisar se existe ou não caminho para as correntes entre as duas barras em análise ou se existe caminho para as correntes entre as barras DE ou PARA para a referência. O cálculo da matriz Incidência Reduzida de sequência zero também é mostrado na figura 3.3.

Figura 3.3 Montagem das matrizes de Incidência Reduzida

```

%% Montagem das matrizes incidências reduzidas:

% Sequências positiva e negativa:
Apos = zeros(n_barras,n_ramos);
for i=1:1:n_ramos
    k = DE(i);
    m = PARA(i);
    if (k == m)
        Apos(m,i) = 1;
    elseif (k ~= m)
        Apos(k,i) = -1;
        Apos(m,i) = 1;
    end
end
Aneg = Apos;

% Sequência Zero:
Azero = zeros(n_barras,n_ramos);
for i=1:1:n_ramos
    k = DE(i);
    m = PARA(i);
    if (TIPO(i)==1)
        Azero(k,i) = -1;
    elseif (TIPO(i)==3 || TIPO(i)==0)
        Azero(k,i) = -1;
        Azero(m,i) = 1;
    elseif (TIPO(i)==5 || TIPO(i)==10)
        Azero(m,i) = 1;
    end
end
end

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4 Montagem das Matrizes de Impedância Primitiva

Primeiramente, inicializa-se as matrizes de impedâncias primitivas de sequências positiva, negativa e zero com as posições zeradas e suas dimensões definidas, ou seja, ($n_{ramos} \times n_{ramos}$). No seguinte passo, para as três sequências, pega-se as informações das impedâncias armazenadas nos vetores obtidos na seção 3.1 e coloca-se as impedâncias próprias nas posições da diagonal principal das matrizes zeradas. Para as impedâncias mútuas, por definição tem-se que apenas em componentes de sequência zero estas são representadas. Assim, nas posições da matriz de impedâncias primitivas de sequência zero referentes aos *ramos* que possuem impedâncias mútuas, coloca-se o valor da impedância também armazenada em um

vetor específico mostrado na seção 3.1. Todo esse procedimento pode ser exemplificado pela Figura 3.4.

Figura 3.4 Montagem das matrizes de Impedância Primitiva

```

%% Obtenção das Matrizes de Impedâncias Primitivas

Zprim0 = zeros(n_ramos,n_ramos);
Zprim1 = zeros(n_ramos,n_ramos);
Zprim2 = zeros(n_ramos,n_ramos);

% Matrizes de sequência positiva, negativa e Zero:
for i=1:1:n_ramos
    Zprim1(i,i) = Zpos_pu(i);
    Zprim2(i,i) = Zneg_pu(i);
    Zprim0(i,i) = Zzero_pu(i);
end
% Obtenção das mútuas:
if any(Zmutuas) == 1
    for i=1:1:n_ramos
        k = Elem1(i);
        m = Elem2(i);
        if (k~=m && m~=0)
            Zprim0(k,m) = Zmutuas(i);
            Zprim0(m,k) = Zprim0(k,m);
        end
    end
end
end

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.5 Cálculo da Matriz Y_{barra}

Após a montagem das matrizes de Incidência Reduzida e das matrizes de Impedância Primitiva, faz-se diretamente o cálculo das matrizes Y_{barra} de acordo com a Equação 2.7. A montagem no MATLAB é representada pela Figura 3.5.

Figura 3.5 Cálculo de Y_{barra}

```

%% Calculando as Matrizes Ybarra para cada sequência:
% Seq. Positiva:
Yprim1 = Zprim1^-1;
Ybarra1 = Apos*(Yprim1)*Apos';
% Seq. Negativa:
Yprim2 = Zprim2^-1;
Ybarra2 = Aneg*(Yprim2)*Aneg';
% Seq. Zero:
Yprim0 = Zprim0^-1;
Ybarra0 = Azero*(Yprim0)*Azero';

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.6 Vetor de Z_{barra} correspondente à barra de curto-circuito

Para que se obtenha o vetor de interesse, que no algoritmo foi denominado de $V_{Z_{barra}}$ para cada componente de sequência, será utilizado o Método do Vetor Esparso apresentado no Capítulo 2 seção 2.3. Após a aplicação dessa técnica, serão obtidos três vetores (coluna ou linha, visto que a matriz Z_{barra} é simétrica) da matriz Z_{barra} correspondentes à barra que se deseja calcular o curto-circuito, lembrando que esta informação foi dada pelo usuário no banco de dados inicial. A aplicação do método pode ser verificada pela Figura 3.6. Para as sequências positiva e negativa o método é aplicado diretamente, porém para a sequência zero faz-se necessária a utilização de um artifício para eliminar as possíveis linhas e colunas totalmente nulas da matriz Y_{barra} . Esse procedimento é fundamental pois as linhas ou colunas nulas na matriz Y_{barra} fazem com que o sistema linear se torne indeterminado, visto que estas se tornam linearmente dependentes. Assim, após a retirada dessas linhas ou colunas nulas o método do vetor esparso é aplicado normalmente e com o vetor $V_{Z_{barra}}$ de sequência zero calculado, retorna-se com as posições que foram retiradas para que não se perca a ordem e o posicionamento correto das barras do sistema analisado. A Figura 3.7 mostra o procedimento para o cálculo do vetor $V_{Z_{barra}}$ de sequência zero.

Figura 3.6 Cálculo de $V_{Z_{barra}}$ para sequência positiva e negativa

```
%% Fatoração das matrizes Ybarra pela eliminação de gauss e decomposição LU:
% O método utilizado: Decomposição de Gauss e decomposição LU para técnica
% do vetor esparso.
% Seq. Positiva:
[L,U]=lu(Ybarra1); % Fatoração por decomp. Gauss.
y = L\B; %Solução do sistema por substituição direta
Vzbarra1 = U\y; % Substituição inversa
% Seq. Negativa:
if (Ybarra1 == Ybarra2)
    Vzbarra2 = Vzbarra1;
else
    [L,U]=lu(Ybarra2);
    y = L\B; %Solução do sistema por substituição direta
    Vzbarra2 = U\y; % Substituição inversa
end
```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 3.7 Cálculo de $V_{Z_{barra}}$ para sequência zero

```

%% Seq. Zero: Exclusão das Linhas/Colunas zeradas:
% (É necessário artifício para eliminar as linhas e colunas
% zeradas da matriz Ybarra0 para que seja possível a solução do sistema).
Exclu = []; % Vetor que contém as linhas e colunas zeradas da matriz Ybarra
ret = [];
for i=1:1:n_barras
    if (Ybarra0(i,i) == 0)
        Exclu = [Exclu i];
        ret = [ret i];
    end
end
for i=1:1: numel(Exclu)
    a = Exclu(i);
    t = size(Ybarra0);
    if a == 1
        Ybarra0 = Ybarra0(2:t(1),2:t(1)); % Excluindo a linha/coluna 1
        B = B(2:t(1));
    else
        Ybarra0 = [Ybarra0(1:a-1,1:a-1)      Ybarra0(1:a-1,a+1:t(1)) ;
                  Ybarra0(a+1:t(1),1:a-1) Ybarra0(a+1:t(1),a+1:t(1))];
        B = [B(1:a-1); B(a+1:t(1))];
    end
    for k=1: numel(Exclu)
        if k < numel(Exclu)
            Exclu(k+1) = Exclu(k+1) - 1;
        end
    end
end
[L,U]=lu(Ybarra0);
y = L\B; % Solução do sistema por substituição direta
Vzbarra0 = U\y; % Substituição inversa

%% Retornando com a linha/coluna retirada:
for i=1: numel(Exclu)
    t = size(Vzbarra0);
    b = ret(i);
    if b == 1
        Vzbarra0 = [0; Vzbarra0];
    else
        Vzbarra0 = [Vzbarra0(1:b-1); 0; Vzbarra0(b:t(1))];
    end
end
end

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.7 Funções para os cálculos de curto-circuito

Com os vetores da matriz Z_{barra} calculados, parte-se para o cálculo direto das condições no ponto do defeito (correntes e tensões nas barras em curto-circuito) e tensões em todas as barras do sistema analisado. Para isso, foram criadas funções no MATLAB para analisar cada tipo de curto-circuito. Utilizando as Equações apresentadas na Seção 2.4 do Capítulo 2, os

cálculos para o curto-circuito monofásico podem ser analisados na Figura 3.8. Para todos os outros tipos de curto-circuito os cálculos são semelhantes, altera-se apenas a matriz de admitância de falhas e as impedâncias de curto-circuito Z_f e Z_g conforme disposto na Figura 2.14.

Figura 3.8 Cálculo das correntes e tensões de curto-circuito monofásico

```

%% Cálculo da corrente de falta no ponto de curto:
% Correntes de falta em pu:
if zf == 0
    yf = 1e9;
else
    yf = 1/zf;
end
U    = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
Yf   = (yf/3)*[1 1 1; 1 1 1; 1 1 1];
Zff  = [Vzbarra0(B_curto) 0 0; 0 Vzbarra1(B_curto) 0; 0 0 Vzbarra2(B_curto)];
V0   = [0; 1; 0];
If012 = Yf*((U+Zff*Yf)^-1)*V0;
%% Cálculo das tensões de falta nas barras do sistema:
Zif = [Vzbarra0(1) 0 0; 0 Vzbarra1(1) 0; 0 0 Vzbarra2(1)];
Vf_barras = V0 -Zif*Yf*((U+Zff*Yf)^-1)*V0;
for n=2:1:n_barras
    Zif      = [Vzbarra0(n) 0 0; 0 Vzbarra1(n) 0; 0 0 Vzbarra2(n)];
    V012     = V0 -Zif*Yf*((U+Zff*Yf)^-1)*V0;
    Vf_barras = [Vf_barras V012];
end

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após os cálculos, utiliza-se a matriz T apresentada pela Equação B.9 do Apêndice B para conversão dos valores em componentes simétricos para abc e posteriormente faz-se os cálculos das correntes de curto em todo o sistema para a barra de falta analisada como apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 Cálculo das correntes nos ramos para ocorrências de curto monofásico

```

%% Cálculo das correntes de falta nos ramos do sistema:
Eramos0 = zeros(n_ramos,1);
Eramos1 = zeros(n_ramos,1);
Eramos2 = zeros(n_ramos,1);
for n=1:1:n_ramos
    k = DE(n);
    m = PARA(n);
    if ( k==m && TIPO(n)~=11 )
        Eramos0(n) = 0-Vf_barras(1,k);
        Eramos1(n) = 1-Vf_barras(2,k);
        Eramos2(n) = 0-Vf_barras(3,k);
    elseif (TIPO(n)==11)
        Eramos0(n) = 0;
        Eramos1(n) = 1-Vf_barras(2,k);
        Eramos2(n) = 0-Vf_barras(3,k);
    elseif (TIPO(n)==2 || TIPO(n)==4 || TIPO(n)==6 || TIPO(n)==7 || TIPO(n)==8 || TIPO(n)==9)
        Eramos0(n) = 0;
        Eramos1(n) = Vf_barras(2,m)-Vf_barras(2,k);
        Eramos2(n) = Vf_barras(3,m)-Vf_barras(3,k);
    elseif (TIPO(n)==1 || TIPO(n)==3 || TIPO(n)==5 || TIPO(n)==0)
        Eramos0(n) = (Vf_barras(1,m)-Vf_barras(1,k));
        Eramos1(n) = (Vf_barras(2,m)-Vf_barras(2,k));
        Eramos2(n) = (Vf_barras(3,m)-Vf_barras(3,k));
    end
end
end
If0 = -Yprim0*Eramos0;
If1 = -Yprim1*Eramos1;
If2 = -Yprim2*Eramos2;
If_ramos = [If0';If1';If2'];

%% Transformando de 012 para ABC:
I_abc = T*If_ramos;

```

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As correntes nos ramos do sistema podem ser calculadas a partir da Equação 2.24 apresentada no capítulo 2 para sistemas com e sem a presença de impedâncias mútuas entre seus ramos.

Capítulo 4

RESULTADOS

Neste Capítulo, serão apresentados alguns resultados obtidos a partir de simulações realizadas com o Sistema de Potência exemplo ANDERSON (1995). Todas as simulações foram realizadas utilizando a implementação apresentada no Capítulo 3. Os estudos consideraram que o sistema opera inicialmente sem cargas, isto é, tensão em todas as barras iguais a $1\angle 0^\circ$. Caso fosse considerado o resultado de um fluxo de potência $I_{total} = I_{antes,cc} + I_{cc}$. Como $I_{antes,cc} = 0$, $I_{total} = I_{cc}$.

4.1 Curto-circuito Monofásico

Para um *curto-circuito monofásico* na fase “a” com impedância de aterramento $Z_f = j0,5$ pu, a Tabela 5 apresenta os resultados das correntes simuladas em cada barra. Considerando o curto monofásico na fase “a”, as correntes nas fases “b” e “c” são nulas. Assim, uma variação de + ou – 20% na impedância de aterramento Z_f , ou seja, $Z_f = j0,4$ e $Z_f = j0,6$, tem-se uma variação nas correntes de curto que permite analisar quais as barras mais ou menos sensíveis do sistema.

Tabela 5 Correntes de curto-circuito monofásico

Barra de Falta	Módulo de Ia $Z_f=0,4j$	Módulo de Ia $Z_f=0,5j$	Módulo de Ia $Z_f=0,6j$	Varição percentual da corrente para variação de + ou -20% de Z_f
1	2,35274	1,90463	1,59990	0,470554
2	1,93219	1,61932	1,39364	0,386434
3	2,34449	1,89922	1,59608	0,468905
4	1,75147	1,49046	1,29715	0,350245
5	2,37266	1,91766	1,60909	0,474535
6	1,71050	1,46071	1,27456	0,342032
7	1,67313	1,43366	1,25409	0,334139
8	1,83881	1,55326	1,34447	0,367684
9	1,67707	1,43676	1,25658	0,334631
10	1,75851	1,49592	1,30148	0,351162
11	1,29841	1,15187	1,03461	0,254975
12	1,14816	1,03360	0,93926	0,222409

13	1,54339	1,33765	1,18020	0,307736
14	1,71092	1,46139	1,27529	0,341593

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Obtém-se em destaque a barra 5 que apresenta a maior variação de corrente, dada a variação da impedância de falta. Em contrapartida, tem-se a barra 12 apresentando a menor variação.

Uma ferramenta interessante que pode ser aplicada para o cálculo de curto-circuito é a Matemática Intervalar. A técnica baseia-se em manipular dados e parâmetros iniciais como intervalos, levando um indicativo do erro presente nos valores a fim de evitar que estes sejam propagados em computador. Uma comparação entre os resultados determinísticos das correntes de curto-circuito monofásico encontrados neste trabalho (considerando a impedância completa e desprezando as resistências dos elementos) e a utilização do método da Matemática Intervalar apresentado por RUBACK (2016), é feita na Tabela 6 para a impedância de curto $Z_f=0,5j$. Pode-se observar que para certas barras, os valores de correntes determinísticas obtidas neste trabalho estão dentro dos intervalos dos limites inferiores e superiores encontrados utilizando a Matemática Intervalar. Para outras barras, observa-se que os valores determinísticos estão fora dos limites intervalares apresentados. Essa situação ocorre devido a algumas condições iniciais distintas adotadas em cada trabalho. Uma delas é a tensão pré-falta, que neste trabalho foi considerada $1\angle 0^\circ$ em todas as barras e para os resultados apresentados por RUBACK (2016) fez-se a análise do fluxo de potência. Outra condição distinta foi na consideração das impedâncias dos elementos. Este trabalho considera também a parte real das impedâncias dos elementos da rede ($R \neq 0$), enquanto no cálculo apresentado por RUBACK (2016), as partes reais das impedâncias dos elementos da rede foram desprezadas. Assim, conclui-se que para determinadas barras do sistema essas condições iniciais não influenciaram nos resultados, enquanto que em outras verifica-se grande influência, uma vez que ambos os resultados foram verificados. Apesar da Matemática Intervalar se aplicar aos estudos de curto no SEP, é preciso atenção especial com as barras mais sensíveis a essas condições, visando um projeto de proteção eficaz para o sistema.

Tabela 6 Comparação entre as correntes determinísticas e a utilização da matemática intervalar

Barra de Falta	Módulo de Ia Determinístico para $R \neq 0$	Módulo de Ia Determinístico para $R=0$	Módulo de Ia Intervalar
1	1,90463	1,90489	[1,8895 ; 1,9297]

2	1,61932	1,62703	[1,6057 ; 1,6486]
3	1,89922	1,89984	[1,8822 ; 1,9223]
4	1,49046	1,50084	[1,4416 ; 1,4885]
5	1,91766	1,91806	[1,9000 ; 1,9401]
6	1,46071	1,47184	[1,4225 ; 1,4700]
7	1,43366	1,43795	[1,8259 ; 1,8662]
8	1,55326	1,56621	[1,5339 ; 1,5781]
9	1,43676	1,44016	[1,4850 ; 1,5307]
10	1,49592	1,49857	[1,6602 ; 1,7024]
11	1,15187	1,17767	[1,1507 ; 1,2033]
12	1,03360	1,06683	[1,0308 ; 1,0818]
13	1,33765	1,34220	[1,4810 ; 1,5268]
14	1,46139	1,46424	[1,6625 ; 1,7046]

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos em relação às tensões de curto-circuito para cada barra do sistema.

Tabela 7 Tensões de curto-circuito monofásico

Barra de Falta	Módulo de Va			Módulo de Vb			Módulo de Vc		
	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j
-									
1	0,94109	0,95231	0,95994	1,01792	1,01442	1,01206	1,01975	1,01592	1,01334
2	0,77287	0,80966	0,83618	1,00051	1,00043	1,00037	0,99612	0,99674	0,99719
3	0,93779	0,94961	0,95765	1,01922	1,01546	1,01293	1,02230	1,01790	1,01508
4	0,70058	0,74523	0,77829	1,04409	1,03692	1,03174	1,05358	1,04544	1,03944
5	0,94906	0,95883	0,96545	1,01365	1,01098	1,00918	1,01570	1,01265	1,01059
6	0,68420	0,73035	0,76474	1,05343	1,04474	1,03846	1,06851	1,05828	1,05071
7	0,66925	0,71683	0,75245	1,11150	1,09149	1,07730	1,16191	1,13836	1,12076
8	0,73552	0,77663	0,80668	0,99468	0,99555	0,99617	0,97844	0,98170	0,98411
9	0,67083	0,71838	0,75395	1,07538	1,06231	1,05299	1,09222	1,07931	1,06956
10	0,70340	0,74796	0,78088	1,07682	1,06324	1,05362	1,09268	1,07892	1,06872
11	0,51936	0,57593	0,62077	1,07041	1,06131	1,05420	1,01253	1,01258	1,01235
12	0,45926	0,51680	0,56355	1,09800	1,08262	1,07078	1,12887	1,11876	1,10994

13	0,61735	0,66882	0,70812	1,10106	1,08426	1,07204	1,12609	1,10954	1,09682
14	0,68437	0,73069	0,76517	1,08530	1,07037	1,05974	1,10503	1,08977	1,07837

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Através do algoritmo proposto, torna-se possível também o cálculo das correntes em todos os ramos e tensões em todas as barras do sistema analisado. Considerando o curto-circuito monofásico na barra 5, a Tabela 8 mostra as correntes em todos os ramos do sistema. A Tabela 9 apresenta as tensões em todas as barras após a ocorrência do curto.

Tabela 8 Correntes de curto-circuito monofásico na barra 5

Ramo	DE - PARA	Módulo de Ia Zf=0,5j	Módulo de Ib Zf=0,5j	Módulo de Ic Zf=0,5j
1	1-1	0,02428	0,01035	0,01035
2	1-9	0,00260	0,00079	0,00079
3	1-2	0,00642	0,00795	0,00795
4	1-7	0,02063	0,01005	0,01005
5	2-11	0,00119	0,00059	0,00059
6	3-10	0,00130	0,00039	0,00039
7	3-10	0,00130	0,00039	0,00039
8	3-4	0,00293	0,01384	0,01384
9	3-5	0,09629	0,01561	0,01561
10	3-3	0,10227	0,01103	0,01103
11	4-12	0,00884	0,00442	0,00442
12	5-5	1,78027	0,01342	0,01342
13	5-6	0,09117	0,07966	0,07966
14	5-14	0,01937	0,00127	0,00127
15	5-14	0,01861	0,00068	0,00068
16	6-12	0,00884	0,00442	0,00442
17	7-7	0,01632	0,00816	0,00816
18	7-13	0,03799	0,00188	0,00188
19	7-8	0,08295	0,08159	0,08159
20	8-11	0,00119	0,00059	0,00059
21	9-10	0,00260	0,00079	0,00079
22	13-14	0,03799	0,00188	0,00188

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 9 Tensões nas barras do sistema para curto monofásico na barra 5

Barra de Falta	Módulo de Va $Z_f=0,5j$	Módulo de Vb $Z_f=0,5j$	Módulo de Vc $Z_f=0,5j$
1	0,99903	1,00053	1,00030
2	0,99980	0,99989	1,00001
3	0,99659	1,00166	1,00087
4	0,99850	0,99930	0,99994
5	0,95883	1,01098	1,01265
6	0,98895	0,99759	0,99690
7	0,98854	1,00428	1,00481
8	0,99849	0,99955	0,99968
9	0,99795	1,00099	1,00055
10	0,99733	1,00126	1,00071
11	0,99914	0,99972	0,99985
12	0,99373	0,99844	0,99842
13	0,97430	1,00723	1,00845
14	0,96755	1,00849	1,01015

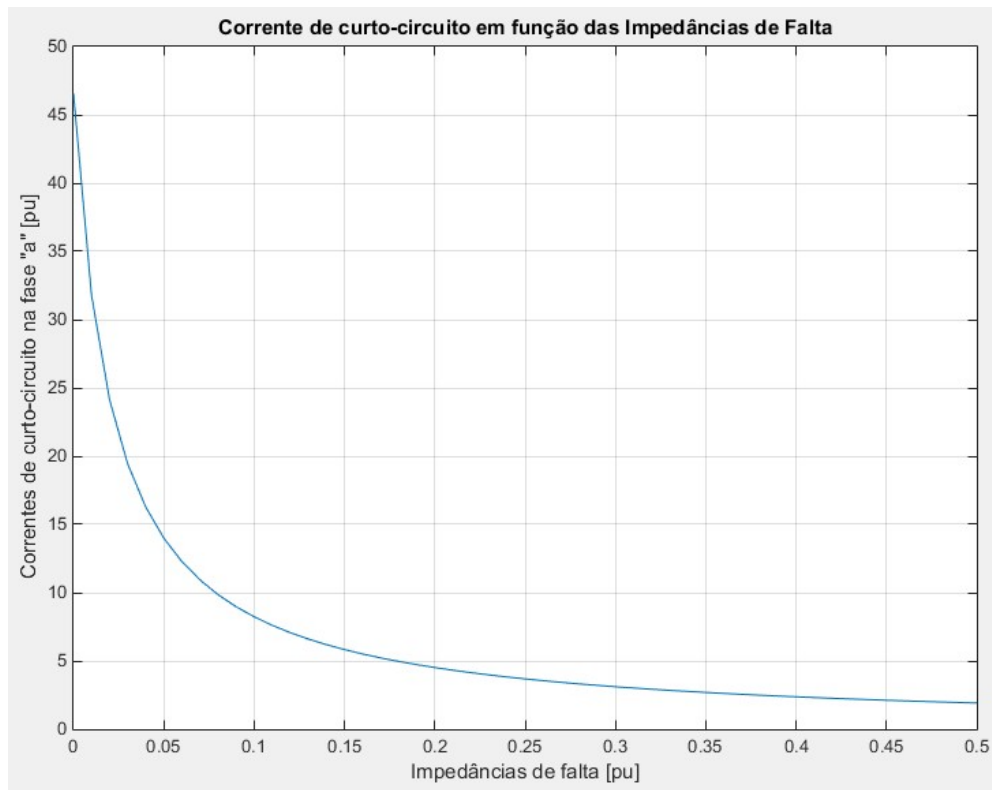
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando graficamente o comportamento das correntes de curto para as barras com maior e menor sensibilidade, barra 5 e barra 12 respectivamente, para variações da impedância de falta de zero a $j0,5$ pu, os resultados são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

Como esperado, para a barra 5 ocorre a maior variação da corrente para valores da impedância de curto de 0 a $j0,5$ pu. A curva decresce exponencialmente com o aumento da impedância de curto e os valores são de $|I_a|=1,91766$ pu para $Z_f=0,5j$ pu e $|I_a|=46,55744$ pu para $Z_f=0$. Tal resultado evidencia a importância de se determinar um valor quanto mais preciso possível da impedância de curto dada a grande variação apresentada pela corrente de curto-circuito.

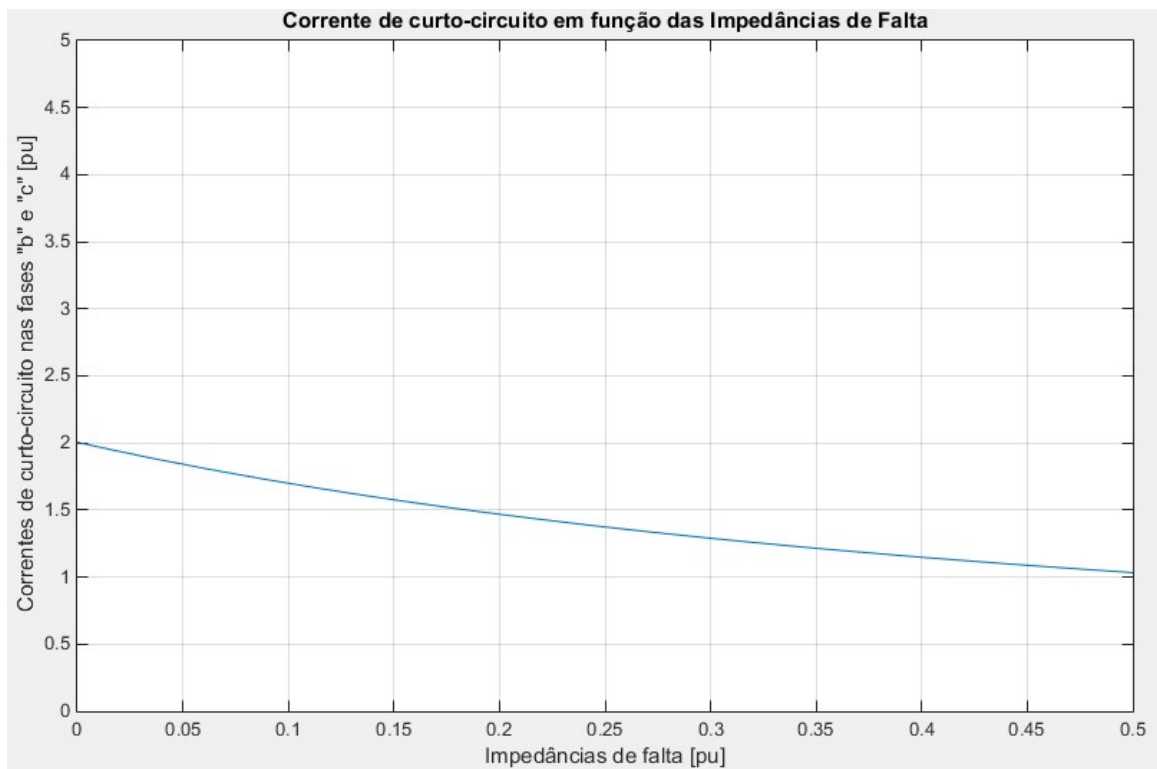
Para a barra 12 ocorre a menor variação da corrente para valores da impedância de curto de 0 a $j0,5$ pu. A curva também decresce exponencialmente, porém de maneira muito mais suave em relação à da barra 5. Os valores da corrente são de $|I_a|=1,03360$ pu para $Z_f=0,5j$ e $|I_a|=2,00540$ para $Z_f=0$. Assim, verifica-se um aumento de aproximadamente duas vezes no valor da corrente de curto para as duas condições de Z_f .

Figura 4.1 Módulo das correntes na fase ‘a’ para curto na barra 5



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.2 Módulo das correntes na fase ‘a’ para curto na barra 12



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 Curto-circuito Trifásico ou Trifásico-terra

Para um *curto-circuito trifásico* ou *trifásico-terra*, as simulações de correntes e tensões nas barras são apresentadas nas Tabelas 10 e 11 respectivamente. Vale lembrar que de acordo com a Figura 2.14, para o modelo de curto-circuito Trifásico, considera-se apenas $Z_f = j0,5 \pm 20\%$ e no caso do curto-circuito Trifásico-Terra, a impedância $Z_g = j0,5 \pm 20\%$ também deve ser considerada. Para esses curtos, as correntes e tensões possuem módulos iguais para as três fases.

Tabela 10 Correntes de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra

Barra de Falta	Módulo de $I_a=I_b=I_c$ $Z_f=0,4j$	Módulo de $I_a=I_b=I_c$ $Z_f=0,5j$	Módulo de $I_a=I_b=I_c$ $Z_f=0,6j$	Varição percentual da corrente para variação de + ou -20% de Z_f
1	2,44235	1,96293	1,64084	0,48848
2	1,92568	1,61476	1,39027	0,38511
3	2,44302	1,96337	1,64114	0,48861
4	1,92815	1,61649	1,39156	0,38560
5	2,44289	1,96328	1,64109	0,48858
6	1,92808	1,61644	1,39152	0,38559
7	2,18782	1,79514	1,52195	0,43751
8	1,78960	1,51806	1,31803	0,35778
9	1,97660	1,65089	1,41723	0,39469
10	2,07650	1,71979	1,46760	0,41490
11	1,40753	1,23809	1,10432	0,27457
12	1,43425	1,25877	1,12078	0,27969
13	1,92878	1,61744	1,39253	0,38509
14	2,06194	1,70980	1,46032	0,41198

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 11 Tensões de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra

Barra de Falta	Módulo de $V_a=V_b=V_c$		
	$Z_f=0,4j$	$Z_f=0,5j$	$Z_f=0,6j$
-			
1	0,97694	0,98147	0,98450
2	0,77027	0,80738	0,83416

3	0,97720	0,98168	0,98468
4	0,77126	0,80825	0,83493
5	0,97715	0,98164	0,98465
6	0,77123	0,80822	0,83491
7	0,87513	0,89757	0,91317
8	0,71584	0,75903	0,79082
9	0,79064	0,82545	0,85034
10	0,83060	0,85989	0,88056
11	0,56301	0,61905	0,66259
12	0,57370	0,62938	0,67246
13	0,77151	0,80872	0,83552
14	0,82477	0,85490	0,87619

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A barra com maior sensibilidade à variação da impedância de curto foi a barra 3 e a menor foi observada na barra 11. Assim, as correntes nos ramos do sistema para curto trifásico ou trifásico-terra na barra 3, onde ocorreu a maior variação são apresentadas na Tabela 12 e as tensões nas outras barras na Tabela 13.

Tabela 12 Correntes de curto-circuito Trifásico ou Trifásico-Terra na barra 3

Ramo	DE - PARA	Módulo de $I_a=I_b=I_c$ $Z_f=0,5j$
1	1-1	0,04154
2	1-9	0,04248
3	1-2	0,00013
4	1-7	0,00080
5	2-11	0,00013
6	3-10	0,02124
7	3-10	0,02124
8	3-4	0,01354
9	3-5	0,08265
10	3-3	1,83215
11	4-12	0,01354
12	5-5	0,09425
13	5-6	0,01354
14	5-14	0,00081

15	5-14	0,00081
16	6-12	0,01354
17	7-7	0,00256
18	7-13	0,00163
19	7-8	0,00013
20	8-11	0,00013
21	9-10	0,04248
22	13-14	0,00163

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 13 Tensões nas barras do sistema para curto Trifásico Trifásico-Terra na barra 3

Barra de Falta	Módulo de $V_a=V_b=V_c$
1	0,99960
2	0,99961
3	0,98168
4	0,98308
5	0,99910
6	0,99770
7	0,99977
8	0,99975
9	0,99064
10	0,98616
11	0,99968
12	0,99039
13	0,99943
14	0,99927

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

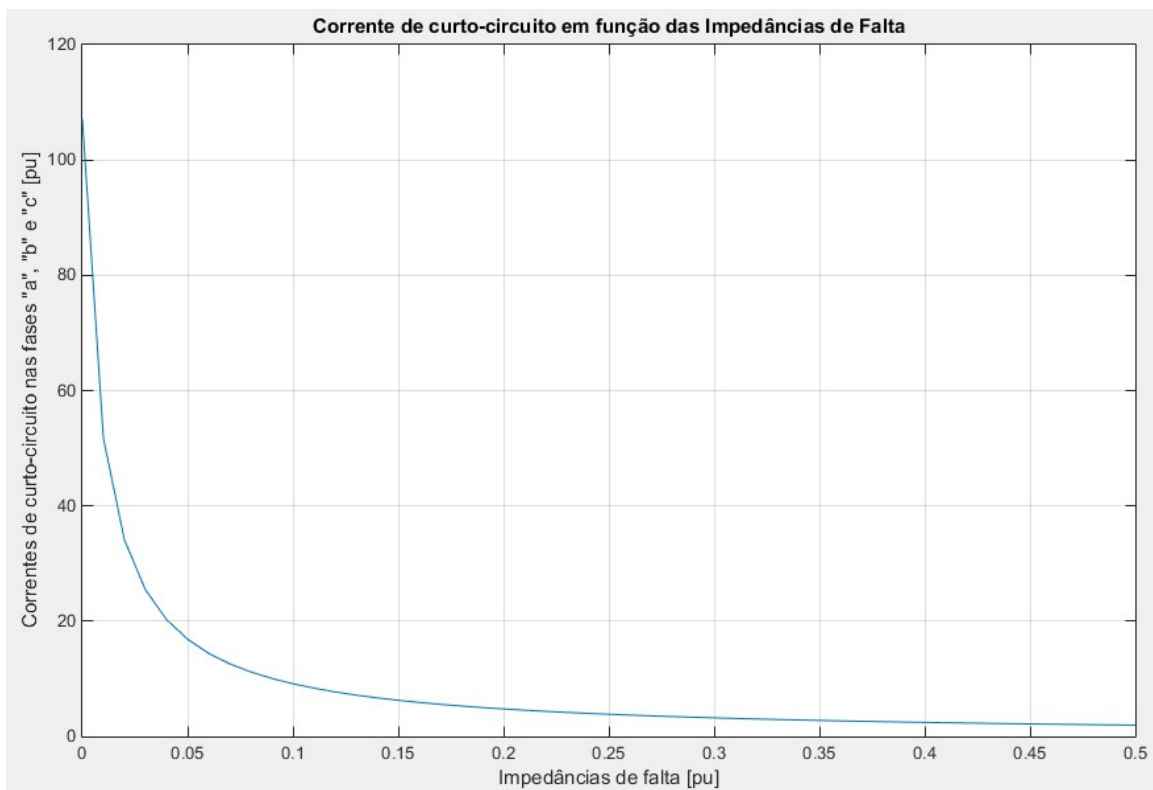
A análise gráfica do comportamento da corrente para os curtos na barra 3 e na barra 11, são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

Para o curto trifásico, na barra 3 ocorre a maior variação da corrente para valores da impedância de curto entre 0 e $j0,5$ pu. Assim, pela análise gráfica verifica-se novamente a exponencial decrescente com grande variação da corrente de curto para valores pequenos (próximos de zero) de Z_f . Os valores da corrente são de $|I_a|=|I_b|=|I_c|=1,96337$ pu para $Z_f=0,5j$ e

$|I_a|=|I_b|=|I_c|=107,16169\text{pu}$ para $Z_f=0$. Este é o maior valor de corrente encontrado em todas as simulações realizadas, de acordo com o esperado, visto que as correntes de curto-circuito trifásicos são maiores em relação aos outros tipos.

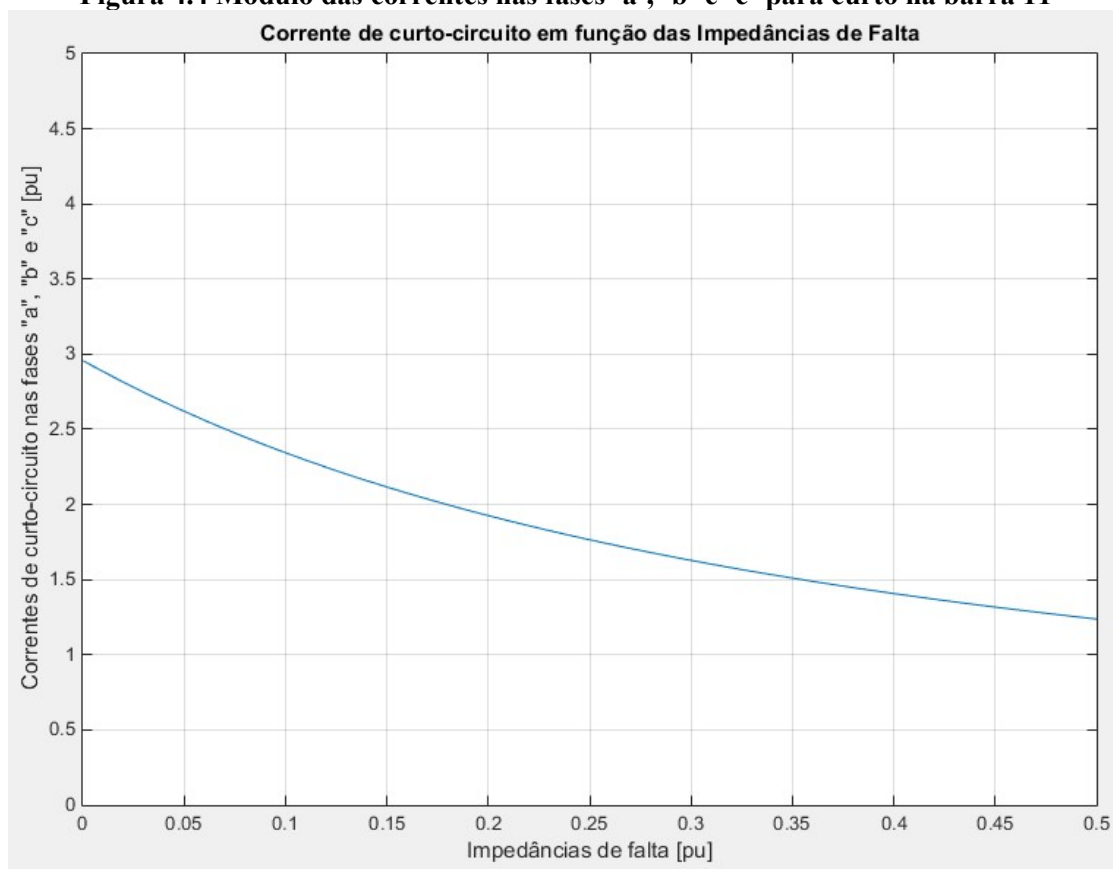
Para a barra 11 onde ocorreu a menor variação, as correntes de curto-circuito foram $|I_a|=|I_b|=|I_c|=1,23809\text{pu}$ para $Z_f=0,5j$ e $|I_a|=|I_b|=|I_c|=2.95776\text{pu}$ para $Z_f=0$. Uma diferença de aproximadamente duas vezes e meia entre os valores obtidos.

Figura 4.3 Módulo das correntes nas fases ‘a’, ‘b’ e ‘c’ para curto na barra 3



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.4 Módulo das correntes nas fases ‘a’, ‘b’ e ‘c’ para curto na barra 11



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3 Curto-circuito Bifásico

Para um *curto-circuito bifásico* nas fases “b” e “c” do sistema, considerando as mesmas condições anteriores para impedâncias de curto-circuito e variação percentual, tem-se os resultados para as correntes na Tabela 14 e tensões na Tabela 15. Nesse curto, as correntes na fase “a” são nulas e as tensões da fase “a” iguais a 1 pu.

Tabela 14 Correntes de curto-circuito Bifásico

Barra de Falta	Módulo de $I_b=I_c$	Módulo de $I_b=I_c$	Módulo de $I_b=I_c$	Variação percentual da corrente para variação de + ou -20% de Z_f
	$Z_f=0,4j$	$Z_f=0,5j$	$Z_f=0,6j$	
1	2,11513	1,69995	1,42101	0,24423
2	1,66769	1,39842	1,20401	0,19255
3	2,11571	1,70032	1,42127	0,24430
4	1,66982	1,39992	1,20512	0,19280
5	2,11560	1,70025	1,42122	0,24429

6	1,66976	1,39988	1,20509	0,19279
7	1,89471	1,55464	1,31805	0,21875
8	1,54983	1,31468	1,14145	0,17886
9	1,71179	1,42972	1,22736	0,19729
10	1,79830	1,48939	1,27098	0,20741
11	1,21896	1,07222	0,95637	0,13686
12	1,24210	1,09013	0,97062	0,13941
13	1,67037	1,40075	1,20596	0,19248
14	1,78569	1,48073	1,26467	0,20595

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a análise feita em relação ao curto bifásico, temos que a barra com maior variação de corrente foi a barra 3 e a menor sensibilidade foi obtida na barra 11.

Tabela 15 Tensões de curto-circuito Bifásico

Barra de Falta	Vb			Vc		
	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j
-						
1	0,98259	0,98600	0,98829	0,98292	0,98626	0,98851
2	0,82875	0,85541	0,87492	0,83854	0,86375	0,88218
3	0,98272	0,98611	0,98838	0,98318	0,98647	0,98869
4	0,82892	0,85558	0,87509	0,83973	0,86479	0,88311
5	0,98270	0,98609	0,98836	0,98313	0,98644	0,98865
6	0,82890	0,85557	0,87508	0,83971	0,86477	0,88309
7	0,89980	0,91750	0,92989	0,91604	0,93093	0,94133
8	0,78341	0,81461	0,83804	0,80925	0,83702	0,85778
9	0,82051	0,84927	0,87014	0,87431	0,89486	0,90965
10	0,85421	0,87875	0,89624	0,89731	0,91483	0,92726
11	0,60519	0,64802	0,68345	0,78052	0,80926	0,83152
12	0,61001	0,65345	0,68914	0,78840	0,81681	0,83869
13	0,80637	0,83662	0,85875	0,86174	0,88381	0,89982
14	0,84986	0,87495	0,89288	0,89337	0,91145	0,92429

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As tabelas 16 e 17 trazem respectivamente os valores das correntes nos ramos e tensões nas barras do sistema para o curto-circuito na barra 3.

Tabela 16 Correntes de curto-circuito bifásico na barra 3

Ramo	DE - PARA	Módulo de Ia Zf=0,5j	Módulo de Ib Zf=0,5j	Módulo de Ic Zf=0,5j
1	1-1	0	0,03598	0,03598
2	1-9	0	0,03678	0,03678
3	1-2	0	0,00011	0,00011
4	1-7	0	0,00070	0,00070
5	2-11	0	0,00011	0,00011
6	3-10	0	0,01839	0,01839
7	3-10	0	0,01839	0,01839
8	3-4	0	0,01173	0,01173
9	3-5	0	0,07158	0,07158
10	3-3	0	1,58669	1,58669
11	4-12	0	0,01173	0,01173
12	5-5	0	0,08162	0,08162
13	5-6	0	0,01173	0,01173
14	5-14	0	0,00070	0,00070
15	5-14	0	0,00070	0,00070
16	6-12	0	0,01173	0,01173
17	7-7	0	0,00221	0,00221
18	7-13	0	0,00141	0,00141
19	7-8	0	0,00011	0,00011
20	8-11	0	0,00011	0,00011
21	9-10	0	0,03678	0,03678
22	13-14	0	0,00141	0,00141

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 17 Tensões nas barras do sistema para curto bifásico na barra 3

Barra	Módulo de Va	Módulo de Vb	Módulo de Vc
	Zf=0,5j	Zf=0,5j	Zf=0,5j
1	1,00000	0,99975	0,99964
2	1,00000	0,99975	0,99966
3	1,00000	0,98611	0,98647
4	1,00000	0,98679	0,98788
5	1,00000	0,99945	0,99920
6	1,00000	0,99876	0,99779
7	1,00000	0,99988	0,99977
8	1,00000	0,99987	0,99976
9	1,00000	0,99293	0,99305
10	1,00000	0,98951	0,98976
11	1,00000	0,99981	0,99971
12	1,00000	0,99277	0,99283
13	1,00000	0,99966	0,99948
14	1,00000	0,99956	0,99934

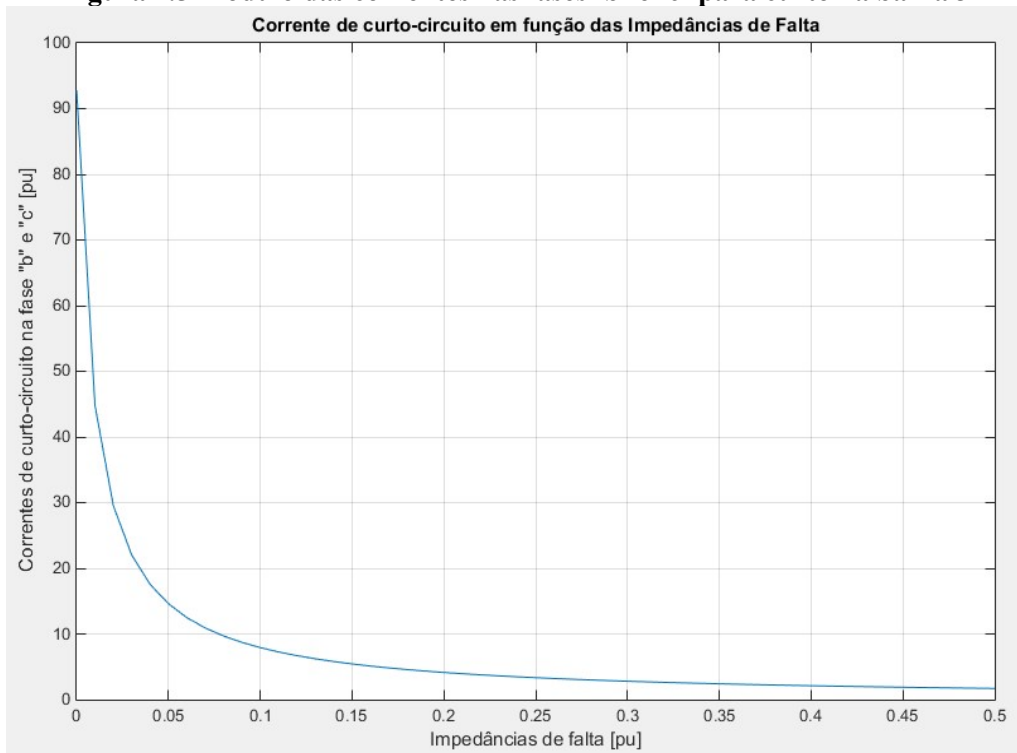
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A análise gráfica do comportamento da corrente para os curtos na barra 3 e na barra 11, são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.6.

Para a barra 3 onde ocorre a maior variação, as correntes de curto são $|I_b|=|I_c|=1,70032\text{pu}$ para $Z_f=0,5j$ e $|I_b|=|I_c|=92,80475\text{pu}$ para $Z_f=0$. Nesse caso a exponencial também apresentou grande variação para valores pequenos de Z_f .

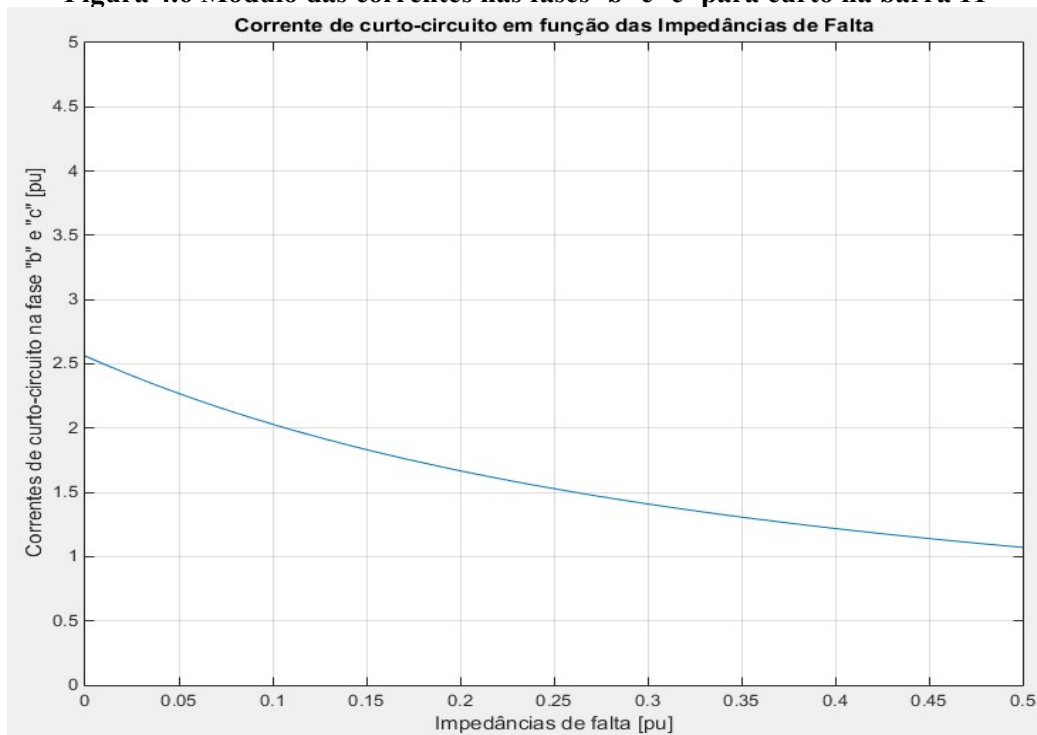
Na barra com menor variação, barra 11 para o curto bifásico, as correntes de curto foram $|I_b|=|I_c|=1,07222\text{pu}$ para $Z_f=0,5j$ e $|I_b|=|I_c|=2,56149\text{pu}$ para $Z_f=0$. Novamente a diferença entre as correntes fica em torno de duas vezes e meia uma da outra.

Figura 4.5 Módulo das correntes nas fases ‘b’ e ‘c’ para curto na barra 3



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.6 Módulo das correntes nas fases ‘b’ e ‘c’ para curto na barra 11



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.4 Curto-circuito Bifásico-terra

Finalmente, fazendo as análises para um *curto-circuito bifásico-terra* nas fases “b” e “c” do sistema e considerando as mesmas condições, tem-se os resultados para as correntes na Tabela 18 e tensões na Tabela 19 para $Z_f = Z_g = j0,5 \pm 20\%$. Para o curto bifásico-terra nas fases “b” e “c” a corrente na fase “a” é nula.

Tabela 18 Correntes de curto-circuito bifásico-terra

Barra de Falta	Módulo de Ib			Módulo de Ic			Variação percentual da corrente para variação de + ou -20% de Zf
	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	
-							Ib
1	2,15339	173079	1,44684	2,15298	1,73052	1,44665	0,48834
2	1,70694	1,42983	1,23021	1,71392	1,43465	1,23373	0,38752
3	2,15395	1,73114	1,44709	2,15319	1,73065	1,44674	0,48847
4	1,70552	1,42904	1,22971	1,70725	1,43031	1,23069	0,38693
5	2,15429	1,73136	1,44724	2,15387	1,73109	1,44705	0,48855
6	1,70529	1,42890	1,22963	1,70466	1,42854	1,22940	0,38683
7	1,92994	1,58363	1,34265	1,91487	1,57291	1,33465	0,43741
8	1,58482	1,34302	1,16534	1,60482	1,35700	1,17566	0,35996
9	1,73600	1,45090	1,24615	1,75311	1,46286	1,25497	0,39309
10	1,82419	1,51184	1,29075	1,83748	1,52094	1,29737	0,41328
11	1,20900	1,06674	0,95387	1,30369	1,13867	1,01029	0,26747
12	1,24863	1,09712	0,97784	1,29484	1,13321	1,00672	0,27693
13	1,69446	1,42184	1,22468	1,70603	1,42994	1,23067	0,38359
14	1,81167	1,50324	1,28448	1,82280	1,51086	1,29003	0,41043

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 19 Tensões de curto-circuito bifásico-terra

Barra de Falta	Módulo de Va			Módulo de Vb			Módulo de Vc		
	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j	Zf=0,4j	Zf=0,5j	Zf=0,6j
-									
1	1,01256	1,01012	1,00847	0,97474	0,97969	0,98301	0,97430	0,97934	0,98271
2	0,99868	0,99892	0,99909	0,80448	0,83616	0,85899	0,81157	0,84232	0,86443

3	1,01383	1,01114	1,00933	0,97453	0,97951	0,98286	0,97372	0,97886	0,98231
4	1,03674	1,03034	1,02584	0,78895	0,82341	0,84819	0,79075	0,82507	0,84972
5	1,00982	1,00790	1,00660	0,97628	0,98093	0,98406	0,97584	0,98058	0,98376
6	1,04547	1,03767	1,03215	0,78596	0,82090	0,84603	0,78529	0,82043	0,84567
7	1,09155	1,07652	1,06572	0,86058	0,88519	0,90241	0,84426	0,87073	0,88949
8	0,98884	0,99089	0,99231	0,75688	0,79368	0,82079	0,77684	0,81132	0,83654
9	1,06067	1,05044	1,04316	0,78594	0,82127	0,84660	0,80395	0,83702	0,86056
10	1,05974	1,04950	1,04226	0,82209	0,85258	0,87416	0,83617	0,86464	0,88469
11	1,03887	1,03295	1,02859	0,56313	0,61646	0,65838	0,65675	0,70641	0,74373
12	1,09383	1,08031	1,07013	0,57156	0,62598	0,66830	0,61895	0,67248	0,71311
13	1,08196	1,06879	1,05926	0,76290	0,80114	0,82877	0,77518	0,81188	0,83830
14	1,06696	1,05566	1,04762	0,81497	0,84647	0,86880	0,82680	0,85658	0,87763

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A barra com maior sensibilidade quanto à variação da impedância de curto-circuito foi a barra 5 e a menor a barra 11. A análise das correntes nos ramos e tensões nas barras para curto na barra 5 são apresentadas nas tabelas 20 e 21 respectivamente.

Tabela 20 Correntes de curto-circuito bifásico-terra na barra 5

Ramo	DE - PARA	Módulo de Ia	Módulo de Ib	Módulo de Ic
		Zf=0,5j	Zf=0,5j	Zf=0,5j
1	1-1	0,00352	0,01550	0,01267
2	1-9	0,00026	0,00181	0,00164
3	1-2	0,00270	0,00210	0,00354
4	1-7	0,00341	0,01210	0,00982
5	2-11	0,00020	0,00159	0,00159
6	3-10	0,00013	0,00090	0,00082
7	3-10	0,00013	0,00090	0,00082
8	3-4	0,00470	0,01101	0,01296
9	3-5	0,00530	0,07520	0,07323
10	3-3	0,00375	0,08527	0,08237
11	4-12	0,00150	0,01178	0,01178
12	5-5	0,00456	1,61768	1,61906
13	5-6	0,02708	0,03631	0,02535
14	5-14	0,00043	0,01694	0,01639
15	5-14	0,00023	0,01683	0,01640

16	6-12	0,00150	0,01178	0,01178
17	7-7	0,00277	0,02176	0,02176
18	7-13	0,00064	0,03378	0,03280
19	7-8	0,02774	0,02904	0,02695
20	8-11	0,00020	0,00159	0,00159
21	9-10	0,00026	0,00181	0,00164
22	13-14	0,00064	0,03378	0,03280

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 21 Tensões nas barras do sistema para curto bifásico-terra na barra 5

Barra	Módulo de Va	Módulo de Vb	Módulo de Vc
	Zf=0,5j	Zf=0,5j	Zf=0,5j
1	1,00028	0,99973	0,99976
2	0,99996	0,99984	0,99968
3	1,00085	0,99877	0,99887
4	0,99974	0,99864	0,99778
5	1,00790	0,98093	0,98058
6	0,99812	0,98635	0,98731
7	1,00307	0,99659	0,99620
8	0,99974	0,99829	0,99811
9	1,00052	0,99928	0,99933
10	1,00067	0,99905	0,99910
11	0,99985	0,99906	0,99889
12	0,99893	0,99249	0,99254
13	1,00527	0,98889	0,98847
14	1,00625	0,98511	0,98465

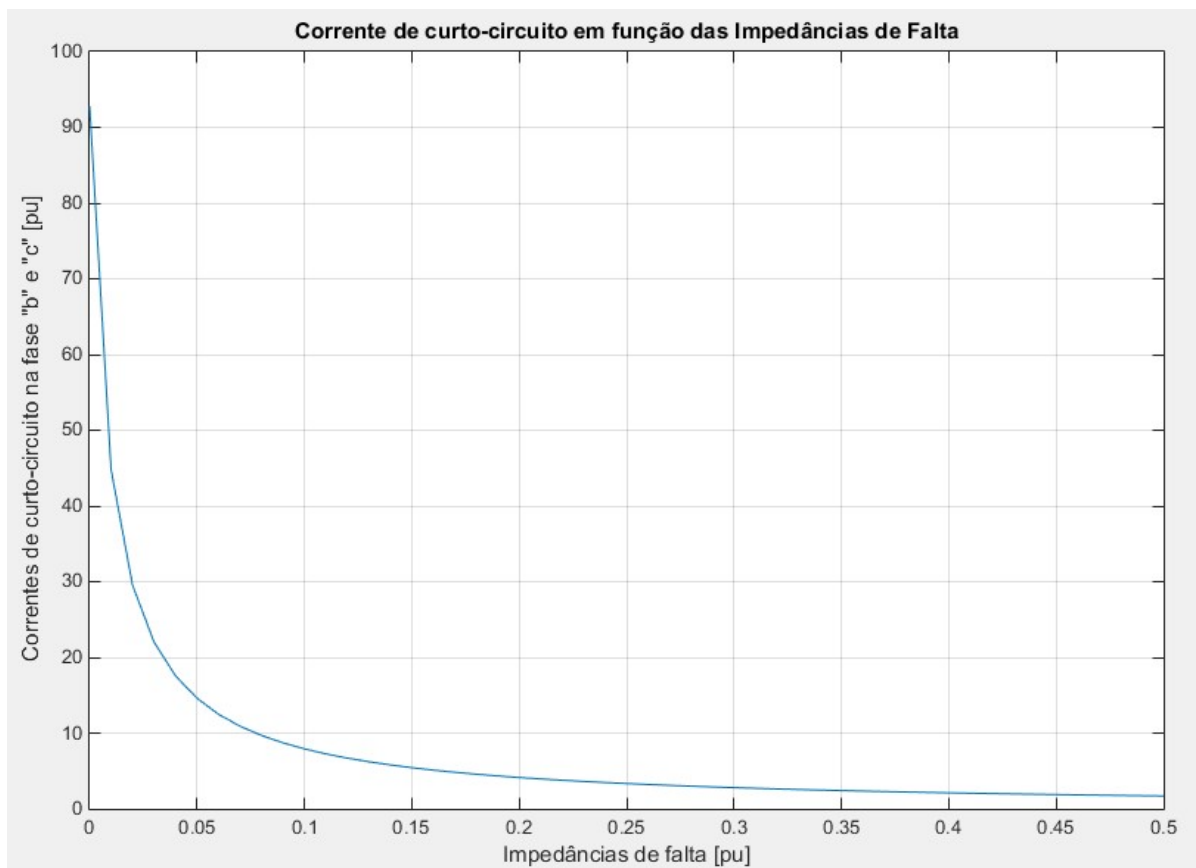
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As representações gráficas das correntes em função das impedâncias de curto-circuito são apresentadas nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Por questões de escala, para a barra 5, as curvas das correntes das fases “b” e “c” são muito próximas sendo então representadas na mesma Figura 4.7. Já para a barra 3, devido a menor escala no eixo y, observa-se uma pequena diferença no gráfico de cada fase. Assim, a fase “b” é representada na Figura 4.8 e a fase “c” na Figura 4.9.

Para a maior variação da corrente de curto, observada na barra 5, as correntes encontradas são $|I_b|=1,73136\text{pu}$, $|I_c|=1,73109\text{pu}$ para $Z_f=0,5j$ de acordo com a Tabela 17 e $|I_b|=94,00883\text{pu}$, $|I_c|=93,55269\text{pu}$ para $Z_f=0$.

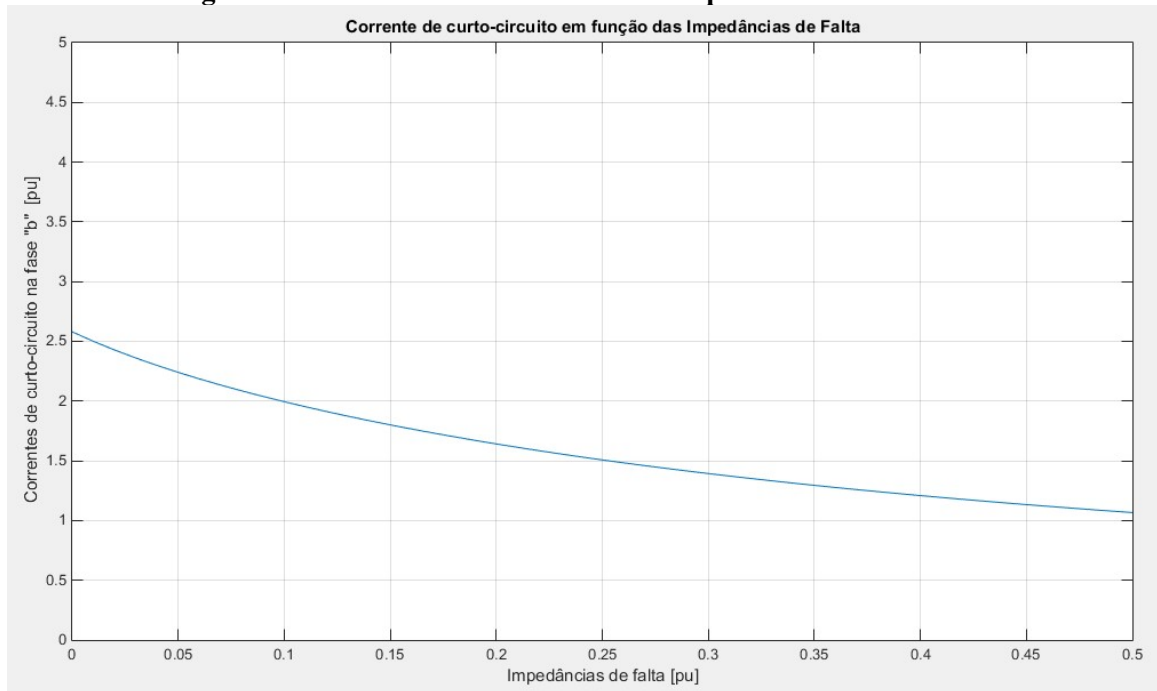
Na barra de menor variação, barra 11, as correntes encontradas são $|I_b|=1,06674\text{pu}$, $|I_c|=1,13867\text{pu}$ para $Z_f=0,5j$ de acordo com a Tabela 17 e $|I_b|=2,57970\text{pu}$, $|I_c|=3,00190\text{pu}$ para $Z_f=0$.

Figura 4.7 Módulo das correntes nas fases ‘b’ e ‘c’ para curto na barra 3



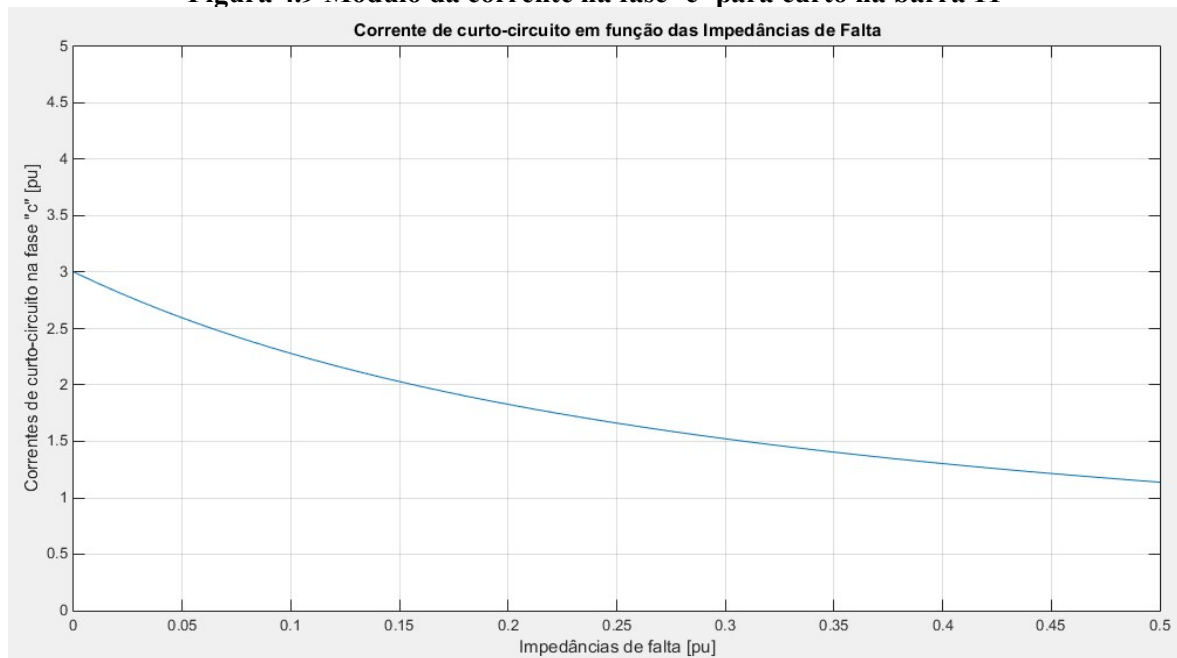
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.8 Módulo da corrente na fase ‘b’ para curto na barra 11



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 4.9 Módulo da corrente na fase ‘c’ para curto na barra 11



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir de todas as simulações realizadas para todos os tipos de curto, pode-se concluir que as barras do sistema possuem sensibilidades diferentes quanto a variação da tensão pré-falta e impedância primitiva (analisado na comparação com os resultados obtidos por RUBACK,2016) e quanto a variação da impedância de falta (analisado nas simulações gráficas).

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Após a revisão de toda a base teórica e o desenvolvimento do algoritmo para o cálculo de curto-circuito, verificou-se que os resultados esperados foram alcançados. O objetivo de construir um algoritmo simples e eficaz que auxiliasse principalmente os estudantes e interessados a fazer qualquer tipo de cálculo de correntes e tensões de curto-circuito para sistemas de pequeno, médio e até grande porte foi satisfatório.

Quando se comparou os resultados determinísticos das correntes apresentadas por este trabalho com os obtidos por RUBACK (2016), através da matemática intervalar, verificou-se que a maioria das barras não foram sensíveis à adoção das condições iniciais distintas de tensão inicial e simplificações ou não das impedâncias dos elementos da rede, visto que os resultados determinísticos ficaram dentro dos limites estipulados pela matemática intervalar. Ao todo, 9 das 14 barras tiveram seus resultados determinísticos dentro dos limites propostos pela matemática intervalar. Outras 4 barras, são elas: 9, 10, 13 e 14, tiveram resultados de correntes menores (a maior diferença do grupo foi na barra 14 com a corrente obtida cerca de 15% menor) que o limite inferior obtido na matemática intervalar. Por fim, a barra onde ocorreu a maior diferença nos resultados da comparação foi a barra 7. Nessa barra, a diferença entre o cálculo determinístico ($I=1,43366\text{pu}$) foi cerca de 21,5% menor que o limite inferior obtido por RUBACK (2016) ($I=1,8259\text{pu}$).

A partir de todas as análises e simulações apresentadas, pode-se observar também, como algumas barras são muito mais sensíveis que outras em relação a uma grande variação da impedância de curto-circuito. Assim, para o projeto de um sistema de proteção eficaz, essas barras devem receber atenção especial, visto que os valores de corrente alcançados podem atingir patamares elevados para os elementos que compõe o sistema e esses podem ser severamente danificados.

5.1 Sugestões Para Estudos Futuros

Dando continuidade a este trabalho, outros tópicos importantes para esse estudo podem ser explorados. Dentre esses destacam-se:

- Análise de faltas simultâneas;
- Projeto de sistemas de proteção a partir dos dados simulados;

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W. G. e FREITAS, F. D. **Circuitos Polifásicos: teorias e ensaios**. Brasília, D. F. FINATEC , 1995.

ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. New York: IEEE Press, 1973.

KINDERMANN, G. **Curto Circuito**, 2ªEd. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

PINTO, P. D., CAMPAGNOLO, J. M. **Métodos de Solução de Sistemas de Equações Lineares Esparsas Aplicados a Sistemas de Potência**, COPPE UFRJ, dezembro 1990.

Relatórios Anteriores. Disponível em: <http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/energetica_anteriores.aspx > Acesso em 15/09/2016.

RUBACK, R. O. **Análise de faltas em sistemas elétricos de potência considerando dados incertos**. Tese de Mestrado, Engenharia Elétrica, UFJF, Juiz de Fora, agosto 2016.

STAGG, G. W; EL-ABIAD, A. H. **Computer Methods in Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979.

STEVENSON, W. D; **Elements of Power System Analysis**, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 1982.

GRAINGER, L. J. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1994.

Apêndice A

REVISÃO SISTEMAS POR UNIDADE

Neste Apêndice é feita uma revisão da teoria dos sistemas por unidade utilizados na representação das grandezas elétricas dos sistemas analisados através do algoritmo em MATLAB.

A.1 Sistemas Por Unidade

O Sistema por unidade (pu) baseia-se na definição de bases das principais grandezas elétricas do sistema em análise, ou seja, definição de bases de Potência, Tensão, Corrente e Impedância e substituição das grandezas dadas no Sistema Internacional de Unidades pelas grandezas de base predefinidas.

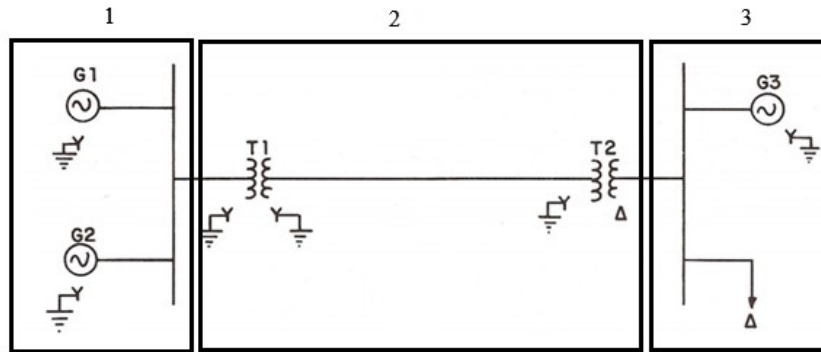
São muitas as vantagens de se utilizar o sistema por unidade (pu). Dentre estas, pode-se destacar:

- Elementos com impedâncias muito distintas nos valores nominais, geralmente diferem muito pouco nos valores em pu.
- Os fabricantes geralmente disponibilizam os dados de placa dos equipamentos em valores percentuais ou pu nas bases dos seus valores nominais.
- Elimina o efeito particionador dos transformadores.
- Torna-se mais evidente uma análise crítica dos resultados obtidos em um problema.
- Elimina diferentes níveis de tensão ao longo do sistema.

O procedimento consiste em *escolher* os valores de base de duas das quatro grandezas elétricas, em geral as bases para Potência e Tensão, e posteriormente é feito o *cálculo* das outras duas, normalmente as bases de Corrente e Impedância.

Inicialmente, demarca-se as *regiões* de mesma tensão do sistema em análise. Tais regiões são delimitadas pelos transformadores, que podem fazer parte de qualquer uma das

Figura A.1 Delimitação das regiões de mesma tensão de um SEP



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

regiões que está limitando. Um exemplo dessa demarcação é mostrado na Figura A.1.

A potência aparente trifásica de base é escolhida em uma dessas regiões e permanece a mesma para todas as outras, visto que a potência não varia com a alteração dos níveis de tensão. Vale lembrar que a potência aparente de base trifásica é a soma das potências aparentes de base de cada fase. Já em relação à tensão de base, é feita a escolha em uma das regiões, normalmente a tensão de linha nominal, e utiliza-se a relação de transformação dos transformadores na equação A.1 para determinar as tensões de base das regiões seguintes.

$$\frac{V_{base1}}{V_{base2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (A.1)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{L,base}^2}{S_{3\phi,base}} \quad (A.2)$$

$$I_{L,base} = \frac{S_{3\phi,base}}{\sqrt{3}V_{L,base}} \quad (A.3)$$

$$S_{pu} = \frac{S_{3\phi}}{S_{3\phi,base}} \quad (A.4)$$

$$V_{pu} = \frac{V_L}{V_{L,base}} \quad (A.5)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad (A.6)$$

$$I_{pu} = \frac{I_L}{I_{L,base}} \quad (A.7)$$

Assim, o cálculo das impedâncias e correntes de base são feitos utilizando-se as equações A.2 e A.3 respectivamente.

Com os valores bases de todos os elementos do sistema, os valores em pu podem ser calculados pelas equações A.4, A.5, A.6 e A.7.

Os fabricantes de transformadores, motores e geradores fornecem muitas das vezes os dados de placa (impedâncias, tensões, correntes e potências) desses elementos em por unidade referenciados aos valores nominais de potência e tensão do equipamento. Assim, geralmente faz-se necessário uma mudança de base, com o intuito de inserir tal elemento a um sistema e adequar as bases desse elemento às bases do sistema. Para mudança de base de impedância, isola-se a impedância dada em ohms da equação 2.6, substitui-se Z_{base} pela equação dada em A.2 e sabendo que a impedância dada em ohms é equivalente à impedância em ohms da base nova (Equação A.8), basta isolar $Z_{pu,nova}$ para o cálculo. Assim:

$$Z_{pu,nova} Z_{base,nova} = Z_{pu} Z_{base} \quad (A.8)$$

$$Z_{pu,nova} \frac{V_{base,nova}^2}{S_{base,nova}} = Z_{pu} \frac{V_{L,base}^2}{S_{3\phi,base}} \quad (A.9)$$

$$Z_{pu,nova} = Z_{pu} \left(\frac{V_{L,base}}{V_{base,nova}} \right)^2 \frac{S_{base,nova}}{S_{3\phi,base}} \quad (A.10)$$

De forma análoga, para mudança de base de potência e tensão temos:

$$S_{pu,nova} = S_{pu} \frac{S_{3\phi,base}}{S_{base,nova}} \quad (A.11)$$

$$V_{pu,nova} = V_{pu} \frac{V_{L,base}}{V_{base,nova}} \quad (A.12)$$

Apêndice B

REVISÃO COMPONENTES SIMÉTRICOS

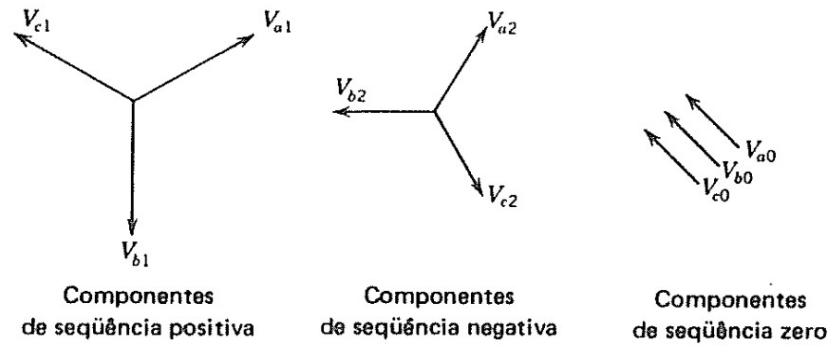
Neste Apêndice é feita uma revisão da teoria de Componentes Simétricos utilizados para representação dos fasores desequilibrados dos sistemas analisados pelo algoritmo em MATLAB.

B.1 Componentes Simétricos

Para o estudo de curtos-circuitos desequilibrados, ou seja, os curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e bifásicos-terra, é fundamental a utilização do método de Componentes Simétricos ou Teorema de Fortescue. Segundo o Teorema de Fortescue, “qualquer sistema desequilibrado de n fasores correlacionados, podem ser decompostos em n sistemas de fasores equilibrados denominados *Componentes Simétricos* dos fasores originais” (Stevenson, p.295, 1986). Esse é o método aplicado em cima dos sistemas trifásicos usuais utilizados nos Sistemas Elétricos de Potência. Para tal, três fasores desequilibrados em um sistema trifásico “abc”, podem ser decompostos em três sistemas equilibrados de fasores “012”, ou seja, componentes de sequência zero “0”, componentes de sequência positiva “1” e componentes de sequência negativa “2”. Nessa representação, os componentes de sequência zero são formados por três fasores iguais em módulo e com defasagem nula. Os componentes de sequência positiva, possuem três fasores iguais em módulo com defasagem de 120° na mesma sequência de fase dos fasores originais. Já os componentes de sequência negativa, também possuem três fasores iguais em módulo com defasagem de 120° , porém na sequência de fase oposta à dos fasores originais.

Para exemplificar essa teoria, as Figuras B.1 e B.2 mostram como é feita a representação de fasores de tensão desequilibrados em componentes simétricos.

Figura B.1 Três conjuntos de fasores equilibrados que são componentes de três fasores desequilibrados



Fonte: STEVENSON,1986, p.296.

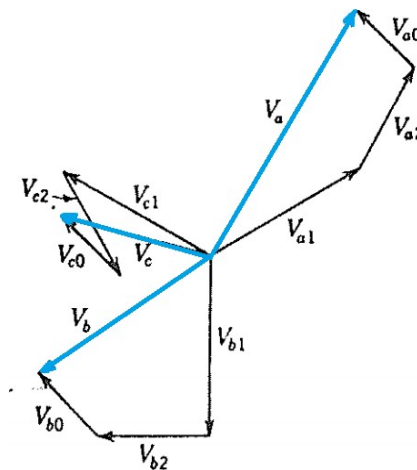
Sabendo que a soma dos fasores dos componentes de seqüência equilibrados resulta nos fasores originais desequilibrados temos:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \tag{B.3}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \tag{B.2}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \tag{B.3}$$

Figura B.2 Soma dos componentes de seqüência para obtenção dos fasores originais



Fonte: STEVENSON,1986, p.297.

A obtenção dos componentes simétricos a partir dos fasores desequilibrados é feita então partindo-se das Equações B.1, B.2 e B.3 e expressando cada componente de V_b e V_c em função de V_a , visto que eles possuem mesmo módulo e defasagem conhecida. Assim, expressando tais equações em função do operador “a” ($1\angle 120^\circ$) e “ a^2 ” ($1\angle 240^\circ$), obtém-se as seguintes equações:

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

Assim, substituindo as equações B.4 nas equações B.2 e B.3 tem-se:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (\text{B.5})$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (\text{B.6})$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (\text{B.7})$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

Onde,

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

T é a matriz de transformação. Multiplicando ambos os lados da Equação B.8 por T^{-1} temos as equações que permitem decompor três fasores assimétricos “abc” em fasores simétricos “012”, dadas em 2.22:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

Dessa forma, algumas conclusões importantes sobre os Componentes Simétricos são necessárias para os estudos a serem realizados. Por exemplo, se a soma dos fasores desequilibrados for zero, não existe componentes de sequência zero. As equações descritas para fasores de tensão também poderiam ter sido escritas para fasores de corrente, da mesma maneira. Para um sistema trifásico, a soma das correntes de linha é igual à corrente de neutro, logo, a corrente de neutro será três vezes a corrente de sequência zero, como evidenciado pelas equações B.11 e B.12. Caso não haja neutro, as correntes de linha não contêm componentes de sequência zero.

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (\text{B.11})$$

$$I_n = 3I_{a0} \quad (\text{B.12})$$

B.2 Componentes Simétricos – sistemas desacoplados

Para um sistema em abc tem-se:

$$V_{abc} = Z_{abc} I_{abc} \quad (\text{B.13})$$

De B.8 e seu análogo para a corrente tem-se que:

$$V_{abc} = TV_{012} \text{ e } I_{abc} = TI_{012} \quad (\text{B.13})$$

Reescrevendo a equação B.13 tem-se:

$$TV_{012} = Z_{abc} TI_{012} \quad (\text{B.13})$$

Multiplicando os dois membros por T^{-1} e sabendo que $Z^{012} = T^{-1}Z^{abc}T$, tem-se:

$$V_{012} = Z_{012} I_{012} \quad (\text{B.14})$$

Portanto, para matriz de impedância Z_{abc} equilibrada:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.15})$$

Dessa forma, verifica-se que o sistema é análogo às condições de se ter 3 sistemas monofásicos e desacoplados, ou seja, os cálculos realizados em cada componente de sequência podem ser realizados separadamente, sem interferência dos cálculos.