

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PABLO SUCUPIRA FERREIRA OLIVEIRA

SIMULADOR DE FALTAS PARA O SimSEP

Niterói

2017

PABLO SUCUPIRA FERREIRA OLIVEIRA

SIMULADOR DE FALTAS PARA O SimSEP

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadores: Marcio Andre Ribeiro Guimaraens, D.Sc.
Milon Pereira da Silva

Niterói

2017

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

O48 Oliveira, Pablo Sucupira Ferreira
 Simulador de faltas para o SimSEP / Pablo Sucupira Ferreira
 Oliveira. – Niterói, RJ : [s.n.], 2017.
 72 f.

 Projeto Final (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade
 Federal Fluminense, 2017.
 Orientadores: Marcio Andre Ribeiro Guimaraens, Milon Pereira
 da Silva.

 1. Sistemas de potência. 2. Curto circuito. 3. Simulação. 4.
 MATLAB (Programa de computador). I. Título.

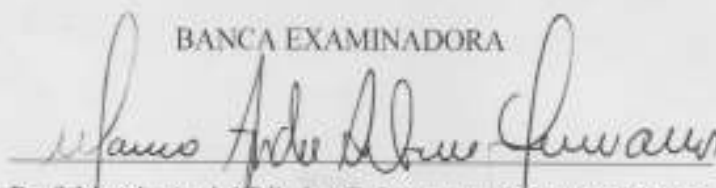
CDD 621.3191

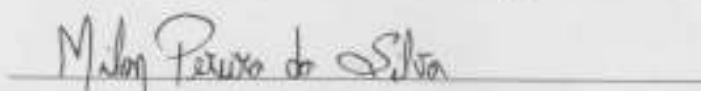
PABLO SUCUPIRA FERREIRA OLIVEIRA

SIMULADOR DE FALTAS PARA O SimSEP

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Marcio André Ribeiro Guimaraens, D.Sc. (orientador)


Milon Pereira da Silva, Eng. (co-orientador)


Prof. Rainer Zanghi, D.Sc.


Prof. André Abel Augusto, D.Sc.

Niterói

2017

*Aos meus pais, José e Lindalva, por todo apoio
e carinho durante todos esses anos.*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer imensamente a Deus, que me conforta e motiva a ser uma pessoa melhor todos os dias, sendo o meu melhor amigo e refúgio. Agradeço em especial a minha família, meu pai José pelos melhores conselhos e grande dedicação em orientar minha caminhada, sempre com todo o amor possível. A minha mãe Lindalva por todo carinho e preocupação, pois foram fundamentais em todos os momentos. A minha irmã Natasha pela motivação e presença durante todos os momentos do percurso.

Aos meus irmãos de sangue Raul e Milon, que me carregaram e tiveram uma paciência incansável para me ajudar quando eu mesmo não acreditava em conseguir. Ao “tio Jalmyr” que se tornou um exemplo para a minha vida, e a família Pereira que me recebeu como um filho. As minhas amigas do coração Aline e Jéssica eu deixo um “salve” e agradeço pela motivação, consultas e paciência para esperar-me falar. Aos grandes amigos Bento, Chico, Fernanda, Vavão, Andressa, Juliana, Tiago, Bruno, Pinda, Mauro, Luciana, Renata, Felipe, Priscila, Gustavo, Hernani, Luis, Deco, Michimoto e Thomas; que além de oferecer cerveja, me ajudaram durante toda a caminhada.

Agradeço a amiga fofa Gabriela pela participação, paciência e incentivo durante os momentos difíceis da minha estrada acadêmica “Prog, Vs, Entrevistas, Trabalhos ...”; além de todo o carinho e sentimento depositado em mim, pois foi fundamental para essa vitória.

Aos meus tutores profissionais Ricardo, Mauricio e Adyr, além de toda a equipe de manutenção do Hospital Universitário Antônio Pedro, estes me ensinaram absolutamente tudo relacionado a engenharia elétrica: Dimensionamento, Manutenção, Projetos, Fiscalização, Instalações Elétricas e o principal, “Trabalho em Equipe e Preocupação com as Pessoas”. Realmente devo grande parte da minha formação profissional a vocês.

Agradeço ao meu orientador Márcio André Ribeiro Guimaraens por todo o incentivo que me propiciou, juntamente com confiança em depositar um trabalho complexo em minhas mãos. Dedicando seu tempo, em que foram primordiais para a conclusão deste trabalho. Agradeço em especial aos professores André Abel Augusto e Rainer Zanghi que aceitaram participar da minha banca examinadora.

Ao Vasco da Gama, eu agradeço cantando: *“Vasco minha vida, minha história, meu primeiro amigo / Eu levo a cruz de malta no meu peito desde que nasci...”*.

Você não sabe o quanto eu caminhei
Pra chegar até aqui
Percorri milhas e milhas antes de dormir
Eu nem cochilei
Os mais belos montes escalei
Nas noites escuras de frio chorei

A vida ensina e o tempo traz o tom
Pra nascer uma canção
Com a fé do dia a dia encontro a solução
Encontro a solução.
(Garrido, Toni)

Cidade Negra

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso visa retratar as generalizações relativas a implementação do Simulador de Faltas, que consiste em um programa criado em ambiente MATLAB para análise e cálculo de curtos circuitos em sistemas de potência. O programa em questão foi realizado como um módulo independente do Simulador de Sistemas Elétricos de Potência. A partir disto, foi incrementado a opção de análise e estudos de faltas. As informações do sistema de potência verificado foram feitas com base nas informações do IEEE14, que consiste em um sistema de 14 barras.

A metodologia matemática utilizada para a resolução dos cálculos de faltas, consiste em empregar o método dos componentes simétricos para resolução de problemas com a presença de fasores desequilibrados. Outros pontos importantes consistem no cálculo da matriz Zbarra e aplicação de noções em circuitos elétricos; com o objetivo de obter os valores de tensão e corrente de curto circuito.

A partir disto, os resultados obtidos foram analisados e comparados com simulações feitas no programa Análise de Faltas Simultâneas (ANAFAS). Assim, foram verificados a veracidade dos dados para curtos do tipo monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico.

Palavras-Chave: Sistemas de Potência, Componentes Simétricos, Zbarra, Análise de Curto Circuito, Análise de Faltas, Simulação.

ABSTRACT

The present Course Conclusion Paper aims to portray as an implementation version of Fault Simulator (SiF), which consists of a program created with MATLAB for simulations of short circuits in power systems. The program in question was carried out as an independent module of the Electric Power Simulator (SimSEP). Taking this into account, the option of analysis was included, assigning SimSEP functions closer to the realism of the Brazilian power system. The information about the verified power system, were made based on information from IEEE14, which consists of a file with several parameters related to a 14-bar system.

A mathematical methodology used to solve the fault calculations, consisting on utilizing the Symmetrical Component Method, which presents a very effective approach to solving problems with an unbalanced phasor presence. Another tool that was needed for the resolution, was the application of a bar, with a purpose of obtaining as impedances of the system, and consequently in the matrix Z-Bar.

Considering this, the results obtained were analyzed and compared with simulations at Simultaneous Fault Analysis (ANAFAS) program. Thus, the accuracy of the data for short of the type single-phase, biphasic, biphasic-earth and three-phase was verified.

Keywords: Power System, Symmetrical Components, ZBus, Short Circuit Analysis, Fault Analysis, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Exemplo de curto em um sistema com 4 Barras (MONTICELLI, 1983). | 17 |
| Figura 2.2 - Três conjuntos de fasores equilibrados que constituem os componentes simétricos (STEVENSON, 1978). | 19 |
| Figura 2.3 - Diagrama do circuito de um gerador em vazio através de uma impedância (STEVENSON, 1978). | 24 |
| Figura 2.4 - Modelo π equivalente de uma linha de transmissão (MONTICELLI, 1983). | 26 |
| Figura 2.5 - Transformador em fase (MONTICELLI, 1983). | 27 |
| Figura 2.6 - Circuito equivalente π transformadores em fase (MONTICELLI, 1983). | 28 |
| Figura 2.7 – Adicionando uma impedância de uma nova barra (p) a uma barra existente (k) (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012). | 31 |
| Figura 2.8 - Adição de uma impedância entre duas barras existentes (j) e (k) (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012). | 33 |
| Figura 2.9 - Curto circuito trifásico | 38 |
| Figura 2.10 - Modelo equivalente para curto trifásico | 39 |
| Figura 2.11 - Curto circuito monofásico | 41 |
| Figura 2.12 - Modelo equivalente para curto monofásico | 42 |
| Figura 2.13 - Curto circuito bifásico | 43 |
| Figura 2.14 - Modelo equivalente para curto bifásico | 45 |
| Figura 2.15 - Curto circuito bifásico terra | 45 |
| Figura 2.16 - Modelo equivalente para curto bifásico terra | 46 |
| Figura 3.1 - Fluxograma SimSEP (Fonte própria). | 50 |
| Figura 3.2 - Fluxograma SiF (Fonte própria). | 52 |
| Figura 3.3 - Fluxograma da Sub-Rotina "Cálculo das Grandezas Elétricas" (Fonte própria). | 53 |
| Figura 3.4 - Fluxograma da função "Cálculo de Zbarra" (Fonte própria). | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.5 - Fluxograma da Função "Cálculo da Corrente de Curto Circuito" (Fonte própria). | 56 |
| Figura 3.6 - Fluxograma da Função "Cálculo da Tensão de Falta" (Fonte própria). | 57 |
| Figura 3.7 - Fluxograma da Função "Cálculo da Tensão de Falta em Amperes" (Fonte própria). | 58 |
| Figura 3.8 - Fluxograma da Função "Cálculo da Corrente de Curto nos Ramos" (Fonte própria). | 59 |
| Figura 3.9 - Fluxograma da Função " Planilha CC" (Fonte própria). | 60 |
| Figura 3.10 - Fluxograma da Função "Cálculo CC" (Fonte própria). | 61 |
| Figura 4.1 - Modelo IEEE14 (IEEE). | 62 |
| Figura 4.2 - Modelagem do sistema 14 barras no ANAFAS (Fonte própria). | 64 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Probabilidade entre os Tipos de Faltas (Fonte própria). | 64 |
| Tabela 2 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto monofásico (Fonte própria). | 66 |
| Tabela 3 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto bifásico (Fonte própria). | 67 |
| Tabela 4 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto bifásico-terra (Fonte própria). | 68 |
| Tabela 5 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto trifásico (Fonte própria). | 69 |
| Tabela 6 - Ocorrências de Faltas no Módulo SimSEP (Fonte própria). | 70 |
| Tabela 7 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto monofásico às 21 horas (Fonte própria). | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| SimSEP | Simulador de Sistemas Elétricos de Potência |
| SiF | Simulador de Faltas |
| ANAFAS | Análise de Faltas Simultâneas |
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica |
| FEM | Força Eletromotriz |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Estruturação do Trabalho | 15 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 17 |
| 2.1 | Componentes simétricos | 17 |
| 2.1.1 | Análise por Componentes Simétricos..... | 17 |
| 2.1.2 | Operadores..... | 19 |
| 2.1.3 | Componentes Simétricos de Fasores Assimétricos | 20 |
| 2.1.4 | Potência em Termos de Componentes Simétricos..... | 22 |
| 2.1.5 | Circuitos de Sequência de Geradores em Vazio..... | 23 |
| 2.2 | Modelagem de Linha de Transmissão e Transformadores..... | 24 |
| 2.2.1 | Modelo π de Linha de Transmissão..... | 24 |
| 2.2.2 | Modelo de Transformador | 26 |
| 2.3 | Matriz Zbarra..... | 29 |
| 2.3.1 | Construção da Matriz Zbarra | 29 |
| 2.3.1.1 | Adição de impedância entre nova barra ao nó de referência | 30 |
| 2.3.1.2 | Adição de impedância entre nova barra a uma barra existente | 31 |
| 2.3.1.3 | Adição de impedância de uma barra existente ao nó de referência | 32 |
| 2.3.1.4 | Adição de impedância entre duas barras existentes..... | 33 |
| 2.3.1.5 | Redução de Kron de uma Matriz | 36 |
| 2.4 | Faltas | 38 |
| 2.4.1 | Faltas Simétricas | 38 |
| 2.4.1.1 | Falta Trifásica | 38 |
| 2.4.2 | Faltas Assimétricas | 40 |
| 2.4.2.1 | Falta Monofásica | 41 |
| 2.4.2.2 | Falta Bifásica | 43 |
| 2.4.2.3 | Falta Bifásica - Terra | 45 |
| 2.4.3 | Cálculo das tensões nodais | 47 |
| 2.4.4 | Corrente nos ramos | 48 |
| 3 | MÉTODOLOGIA UTILIZADA..... | 49 |
| 3.1 | SimSEP | 49 |
| 3.2 | Simulador de Faltas | 50 |
| 3.2.1 | Sub-Rotina "Cálculo das Grandezas Elétricas" | 53 |
| 3.2.2 | Função "Cálculo Zbarra" | 54 |
| 3.2.3 | Função "Cálculo da Corrente de Curto Circuito" | 55 |
| 3.2.4 | Função "Cálculo da Tensão de Falta" | 56 |
| 3.2.5 | Função "Cálculo da Tensão de Falta em Amperes" | 57 |
| 3.2.6 | Função "Cálculo da Corrente de Curto nos Ramos" | 58 |
| 3.2.7 | Função "Planilha CC" | 60 |
| 3.2.8 | Função "Cálculo CC" | 61 |
| 4 | RESULTADOS..... | 62 |
| 4.1 | IEEE 14 Barras..... | 63 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2 | Comparação com o ANAFAS..... | 63 |
| 4.3 | Probabilidade de falta..... | 64 |
| 4.3.1 | Falta Monofásica | 66 |
| 4.3.2 | Falta Bifásica | 67 |
| 4.3.3 | Falta Bifásica - Terra | 68 |
| 4.3.4 | Falta Trifásica | 69 |
| 4.3.5 | Falta no Módulo Completo do SimSEP..... | 70 |
| 5 | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS..... | 71 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |

1 INTRODUÇÃO

O estudo de faltas é de fundamental importância dentro da análise de sistemas de potência, pois viabiliza a obtenção de valores de tensão e corrente quando ocorrem falhas. Segundo (KINDERMANN, 1997), esses valores são de interesse para várias aplicações, sendo o dimensionamento das proteções uma delas. Atualmente, existe um grande conjunto de técnicas para realizar o estudo de curto circuito; com a utilização destas técnicas e aliando a modelos elétricos e matemáticos, podemos obter o estado do sistema durante e após a ocorrência de uma falta.

As faltas verificadas no sistema elétrico são: monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica. Para análises dessas faltas é empregado o método dos componentes simétricos. O método consiste em obter a partir de um sistema assimétrico de fasores, três sistemas desacoplados de fasores denominados sequência positiva, negativa e zero (STEVENSON, 1978),

A criação do modo SiF, visa elaborar uma ferramenta para a análise de faltas. Cujo objetivo é obter o estado do sistema para o caso de ocorrência de uma falta. Consistindo assim, na adição de um modelo ao SimSEP, este novo módulo pode atuar de forma concomitante ou não com o simulador. Sendo assim, a partição será responsável pela análise e resolução de faltas, obtendo como resultados os valores de tensão e correntes durante uma ocorrência de curto. Para isto, se faz necessário à implementação do método de componentes simétricos no programa, pois o mesmo é um grande facilitador para análise de sistemas com fasores; assim obtendo-se as respectivas grandezas de tensão nas barras e correntes que circulam nos ramos.

1.1 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 é dada uma breve introdução do assunto, sendo comentado sobre a importância da análise de faltas e funcionamento do SiF.
- Capítulo 2 são apresentados conceitos sobre componentes simétricos, criação da matriz Z_{barra} e formas de obtenção dos valores de potência, tensão e correntes durante as faltas, a partir da utilização dos componentes simétricos.
- Capítulo 3 é descrito o método de criação do modo SiF.
- Capítulo 4 são expostos os casos utilizados para testar a implementação, reunido com as comparações dos resultados.
- Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho acompanhado com sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise de curto circuito é importante para o dimensionamento das proteções do sistema, a partir do momento que conhecemos os valores de tensão e corrente durante falta, se torna possível fazer o dimensionamento dos dispositivos de proteção, alimentadores e barramentos, entre outros equipamentos que são necessários para a transmissão de energia elétrica. Os curtos circuitos que apresentam maiores incidências no sistema elétrico são: trifásico, monofásico, bifásico e bifásico-terra. A Figura 2.1 ilustra um exemplo de curto circuito no sistema elétrico de potência.

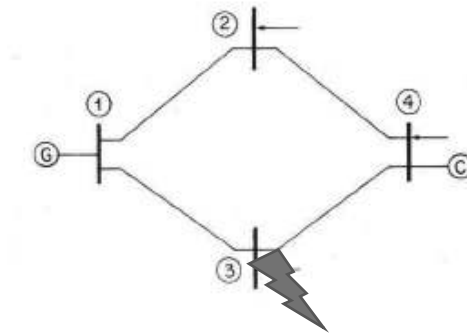


Figura 2.1 - Exemplo de curto em um sistema com 4 Barras (MONTICELLI, 1983).

2.1 COMPONENTES SIMÉTRICOS

2.1.1 Análise por Componentes Simétricos

A análise por componentes simétricos é amplamente utilizada no estudo de circuitos polifásicos desequilibrados, podendo ser aplicada para a análise de faltas assimétricas em sistemas de transmissão que podem consistir de curtos-circuitos, impedância entre linhas, impedância de uma ou duas linhas para a terra ou condutores abertos. O método consiste em obter um equivalente de n fasores desequilibrados em n sistemas de fasores equilibrados;

sendo n um número primo. Os n fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento e defasagem angular entre os fasores adjacentes do conjunto são iguais; como o sistema elétrico consiste de três fasores desequilibrados, a utilização do método de componentes simétricos criado por Fortescue se torna viável. Os conjuntos equilibrados de componentes segundo (STEVENSON, 1978), são:

- Componentes de sequência positiva, consistindo de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo a mesma sequência de fases que os fasores originais.
- Componentes de sequência negativa, consistindo de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si e tendo sequência de fases oposta à dos fasores originais.
- Componentes de sequência zero, consistindo de três fasores iguais em módulo e com defasagem zero entre si.

Normalmente durante o estudo de circuitos elétricos são utilizados os índices a , b e c , para referenciar respectivamente as três fases e correntes do sistema elétrico. Portanto, a sequência de fases dos componentes simétricos de sequência positiva dos fasores desequilibrados é abc e a sequência de fases dos componentes de sequência negativa é referenciada como acb .

Caso os fasores retratados sejam de tensão, eles são designados como V_a , V_b e V_c . Os três conjuntos de componentes simétricos recebem ainda os índices 1 para sequência positiva, 2 para sequência negativa e 0 para os de sequência zero. Deste modo, reproduzimos sistema de tensão desequilibrados nos conjuntos V_{a1} , V_{b1} e V_{c1} para a sequência positiva, V_{a2} , V_{b2} e V_{c2} para a sequência negativa e V_{a0} , V_{b0} e V_{c0} para a sequência zero; a representação pode ser observada na Figura 2.2. Para o caso de representação das correntes, são representados por I e utilizando os mesmos índices atribuídos. (STEVENSON, 1978).

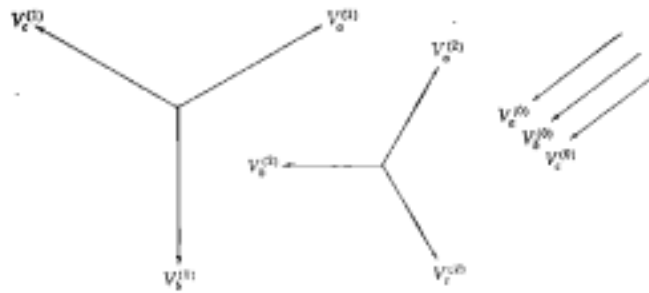


Figura 2.2 - Três conjuntos de fasores equilibrados que constituem os componentes simétricos (STEVENSON, 1978).

Para obter os valores originais do fasores desequilibrados, basta somar os valores de seus componentes simétricos, da seguinte forma:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.3)$$

2.1.2 Operadores

Devido as diferenças de fase dos componentes simétricos de tensões e correntes no sistema trifásico, é necessário utilizar artifícios que indiquem a rotação de um fasor em 120° . Convenientemente é utilizado o operador a para designar uma rotação de 120° no sentido anti-horário. Este operador é um número complexo de módulo unitário e fase 120° (BARIONI, 2017).

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866$$

2.1.3 Componentes Simétricos de Fasores Assimétricos

A decomposição de três fasores assimétricos em seus componentes simétricos é feita basicamente exprimindo cada componente de V_b e V_c como produto de alguma função do operador a e um componente de V_a . Obtendo as seguintes relações:

$$\begin{aligned}V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Substituindo nas equações (2.1), (2.2) e (2.3), teremos:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}\tag{2.5}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}\tag{2.6}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}\tag{2.7}$$

Caso seja colocado na forma matricial, obtemos

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}\tag{2.8}$$

Podemos utilizar a seguinte notação:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\tag{2.9}$$

Onde \mathbf{A} é a Matriz transformação.

Outro artifício importante durante os cálculos, será:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Onde A^{-1} é a matriz transformação inversa.

Multiplicando a equação (2.8) por A^{-1} , obtemos:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Assim conseguimos decompor três fasores assimétricos em seus componentes simétricos. Deste modo obtemos:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (2.12)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.13)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.14)$$

Com esta mesma base teórica consegue-se obter as expressões para V_{b0} , V_{b1} , V_{b2} , V_{c0} , V_{c1} e V_{c2} . Vale ressaltar que não existem componentes de sequência zero se a soma dos fasores desequilibrados for igual à zero. Assim as componentes de sequência zero jamais existirão caso tenhamos um sistema elétrico com fasores de tensão equilibrados.

Segundo (STEVENSON, 1978), o método dos componentes simétricos pode ser utilizado para qualquer conjunto de fasores, no caso do sistema elétrico é bastante utilizado para obter também as expressões para as correntes, obtendo:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (2.15)$$

$$I_b = a^2I_{a1} + aI_{a2} + I_{a0} \quad (2.16)$$

$$I_c = aI_{a1} + a^2I_{a2} + I_{a0} \quad (2.17)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (2.18)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.19)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c) \quad (2.20)$$

Para o sistema trifásico, sabe-se que a soma das correntes de linha é igual à corrente I_n , no caminho de retorno pelo neutro. Logo:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.21)$$

Comparando as equações (2.15), (2.16), (2.17) e (2.21) obtemos:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (2.22)$$

Outro fato importante consiste em observar caso não exista retorno pelo neutro em um sistema trifásico, I_n é zero e então as correntes de linhas não possuirão componentes de sequência zero. Caso esteja conectado uma carga em delta, não existirá retorno pelo neutro e portanto, as correntes que vão para esse tipo de carga não possuem componentes de sequência zero.

2.1.4 Potência em Termos de Componentes Simétricos

Caso seja conhecido os componentes simétricos de corrente e tensão, podemos obter a potência consumida num circuito trifásico. Sabendo que a potência complexa total de um circuito trifásico é calculada como:

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.23)$$

Colocando na forma matricial

$$S = [V_a \ V_b \ V_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = V_{abc}^t \times I_{abc}^* \quad (2.24)$$

Onde t indica a transposição.

Aplicando o modelo de componentes simétricos das tensões e correntes, conseguimos obter a seguinte expressão.

$$S = [AV_{012}]^t [A I_{012}]^* \quad (2.25)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad e \quad I = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Substituindo as equações (2.25) e (2.26), obtemos a expressão final da potência consumida em função das componentes simétricas.

$$S = 3[V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* \quad (2.27)$$

2.1.5 Circuitos de Sequência de Geradores em Vazio

A Figura 2.3 representa o modelo do gerador em vazio, aterrado através de um reator. Segundo (STEVENSON, 1978), caso ocorra uma falta, nos terminais do gerador circulam as correntes I_a , I_b e I_c . Se a falta envolve a terra, a corrente que circula no neutro do gerador é designada por I_n . Uma ou duas dessas correntes podem ser iguais a zero, porém as correntes podem ser decompostas em seus componentes simétricos independentemente de quanto estejam desequilibradas.

Fazendo a decomposição observa-se que o circuito de sequência positiva é composto de FEM em série com a impedância de sequência. Os circuitos de sequência negativa e zero não contêm FEMs, porém incluem as impedâncias do gerador para as correntes de sequência negativa e zero, respectivamente (STEVENSON, 1978).

Com base nestas condições, conseguimos as seguintes expressões:

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (2.28)$$

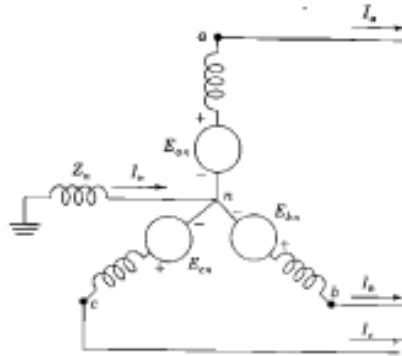


Figura 2.3 - Diagrama do circuito de um gerador em vazio através de uma impedância (STEVENSON, 1978).

Usualmente, os componentes da corrente e da tensão para a fase a são encontrados a partir das equações determinadas pelos circuitos de sequência.

2.2 MODELAGEM DE LINHA DE TRANSMISSÃO E TRANSFORMADORES

2.2.1 Modelo π de Linha de Transmissão

O modelo equivalente de uma linha de transmissão é representando com base em três parâmetros: a resistência série r_{km} ; a reatância série x_{km} ; e a susceptância shunt b_{km}^{sh} . Logo, a impedância do elemento série é dada por:

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.29)$$

A admitância série é:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{z_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.30)$$

Onde k significa a barra de saída e m a barra de chegada.

Portanto, a condutância série g_{km} e a susceptância série b_{km} são dadas, respectivamente, por

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad ; \quad b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.31)$$

Quando o modelo π representa uma linha de transmissão têm-se r_{km} e x_{km} positivos, o que implica g_{km} positivo e b_{km} negativo (tipo indutivo). Já o elemento b_{km}^{sh} é positivo, pois o shunt é do tipo capacitivo. (MONTICELLI, 1983).

A corrente I_{km}^{sh} é formada de uma componente série e uma componente shunt, e pode ser calculada a partir das tensões terminais E_k e E_m e dos parâmetros do modelo equivalente π :

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}E_k \quad (2.32)$$

Onde b_{km}^{sh} significa a susceptância shunt.

Analogamente

$$I_{mk} = y_{km}(E_m - E_k) + jb_{km}^{sh}E_m \quad (2.33)$$

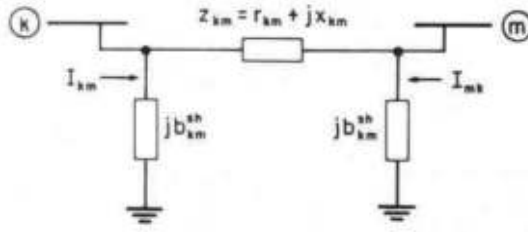


Figura 2.4 - Modelo π equivalente de uma linha de transmissão (MONTICELLI, 1983).

2.2.2 Modelo de Transformador

O modelo equivalente de transformador consiste basicamente em uma admitância série y_{km} e um auto-transformador ideal com relação de transformação $1:t$. Para o transformador em fase t é um número real ($t=a$) e, para o defasador, t é um número complexo ($t=ae^{j\varphi}$).

A Figura 2.5 mostra o modelo do transformador em fase, indicando a tensão do nó intermediário p. Para este tipo de transformador, a relação entre as magnitudes das tensões dos nós terminais k e p do transformador ideal é dada por:

$$a = \frac{V_p}{V_k} \quad (2.34)$$

Sendo equivalente a própria relação entre as tensões complexas E_p e E_k , pois $\theta_p = \theta_k$.

$$a = \frac{V_p e^{j\varphi_p}}{V_p e^{j\varphi_q}} \quad (2.35)$$

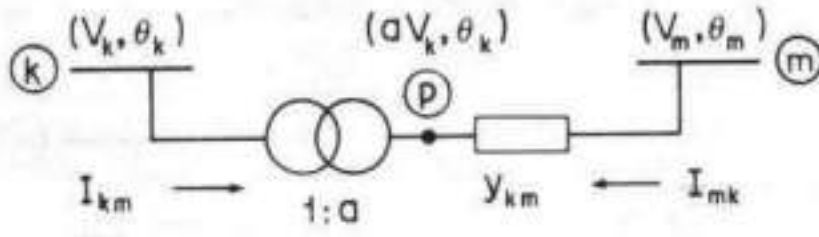


Figura 2.5 - Transformador em fase (MONTICELLI, 1983).

O fato de o transformador $k - p$, que aparece no modelo indicado na Figura 2.5 ser ideal implica também que as potências complexas na entrada e na saída são iguais, ou seja, não há dissipação de potência ativa ou reativa entre os nós $k - p$ (MONTICELLI, 1983).

$$E_k I_{km}^* + E_p I_{mk}^* = 0 \quad (2.36)$$

Onde E_k e E_p são as tensões da barra de saída e entrada, I_{km}^* e I_{mk}^* são os conjugados das correntes que circula nos ramos.

Com base nas equações 2.35 e 2.36 obtém-se:

$$-a = \frac{I_{km}}{I_{mk}} = -\frac{|I_{km}|}{|I_{mk}|} \quad (2.37)$$

Assim, as correntes I_{km} e I_{mk} estão defasadas de 180° e suas magnitudes estão na razão $a:1$.

O transformador em fase pode ser representado por um circuito equivalente do tipo π , conforme mostrado na figura 2.6. A determinação das admitâncias A, B e C do circuito equivalente é feita identificando-se as correntes I_{km} e I_{mk} do modelo com as correspondentes do circuito equivalente.

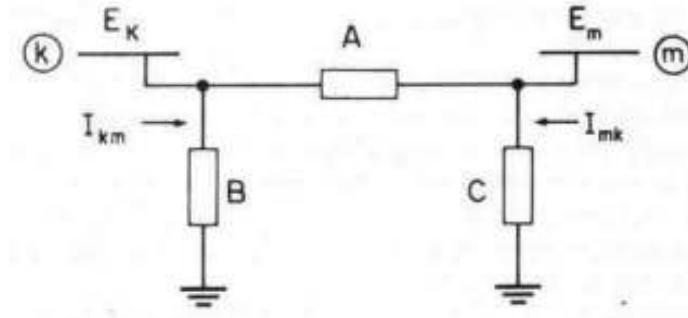


Figura 2.6 - Circuito equivalente π transformadores em fase (MONTICELLI, 1983).

$$I_{km} = -ay_{km}(E_m - E_p) = (a^2y_{km})E_k + (-ay_{km})E_m \quad (2.38)$$

$$I_{mk} = y_{km}(E_m - E_p) = (-ay_{km})E_k + (y_{km})E_m \quad (2.39)$$

Para o modelo π , podemos escrever:

$$I_{km} = (A + B)E_k + (-A)E_m \quad (2.40)$$

$$I_{mk} = (-A)E_k + (A + C)E_m \quad (2.41)$$

Onde obtemos os seguintes valores:

$$A = ay_{km} \quad (2.42)$$

$$B = a(a - 1)y_{km} \quad (2.43)$$

$$C = (1 - a)y_{km} \quad (2.44)$$

2.3 MATRIZ ZBARRA

A matriz Zbarra apresenta as impedâncias no ponto de inserção de cada nó com base a um nó de referência escolhido arbitrariamente. A impedância no ponto de um nó é a impedância equivalente entre o mesmo e a referência. A matriz Zbarra apresenta também a impedância de transferência entre cada barra do sistema e cada outra barra, com relação ao nó de referência. As impedâncias de transferência são encontradas calculando-se as tensões que existiriam em cada uma das outras barras do sistema, com relação à referência, quando uma barra em particular recebe uma injeção de corrente de uma unidade.

Segundo (HALE; WARD, 1956) e (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012), a equação matricial que relaciona a matriz ZBarra às correntes injetadas nos nós e às tensões dos nós, é a equação (2.29)

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{E}$$

Onde Z representa a matriz Zbarra, I a matriz com os valores das correntes nos ramos e E a matriz tensão. (2.45)

2.3.1 Construção da Matriz Zbarra

O matriz Zbarra é obtida começando-se com uma única linha de transmissão, logo após é acrescentado uma linha de cada vez, modificando-se a matriz para cada linha adicionada, e construindo o sistema desejado e a matriz Zbarra correspondente ao sistema.

Basicamente, os pontos de junção onde duas ou mais impedâncias de linhas de transmissão de transformadores ou de geradores são ligadas, recebem um único número de barra (nó). O número zero é reservado para a barra de referência. Em estudos de curto-

circuito, a barra de referência é escolhida como sendo o ponto comum atrás de todas as reatâncias dos geradores. Os dados são preparados descrevendo-se cada elemento do sistema de transmissão pelas duas barras nos terminais da linha e sua impedância em uma base p.u comum. A primeira linha da matriz Z_{barra} deve ser uma linha que liga a referência a alguma barra do sistema de maneira a fornecer uma trajetória até a referência para a corrente injetada em qualquer nó do sistema que está sendo construído. Segundo (HALE; WARD, 1956) e (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012). Cada linha selecionada da lista deve pertencer a um dos quatro tipos:

- 1- Adição Z_b de uma nova barra (p) ao nó de referência.
- 2- Adição Z_b de uma nova barra (p) a uma barra existente (k).
- 3- Adição Z_b de uma barra existente (k) ao nó de referência.
- 4- Adição de Z_b entre duas barras existentes (j) e (k).

2.3.1.1 Adição de impedância entre nova barra ao nó de referência

Segundo [4], a adição de uma nova barra (p) conectada ao nó de referência através da impedância Z_b sem qualquer conexão com outras barras da rede original não pode alterar as tensões de barra originais quando a corrente I_p é injetada na nova.

Para este caso, as equações das tensões de barra são fornecidas por:

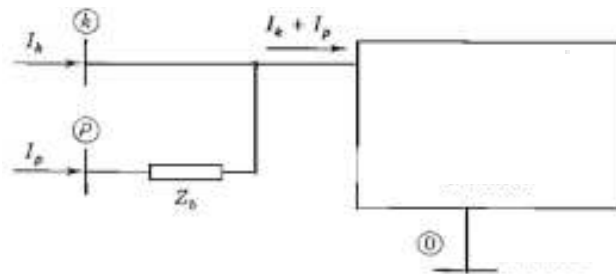
$$\begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_2^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.3.1.2 Adição de impedância entre nova barra a uma barra existente

A figura 2.7 ilustra a adição de Z_b de uma nova barra (p) a uma barra existente (k). Logo, é verificado que a corrente injetada I_p fará com que ocorra uma variação de corrente que entra na rede através da barra (k) original.

A corrente após essa mudança que entra na rede pela barra (k) será:

$$I = I_k + I_p$$



(2.47)

Figura 2.7 – Adicionando uma impedância de uma nova barra (p) a uma barra existente (k) (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012).

A corrente I_p que entra na rede através da barra (k) aumentará a tensão inicial (antes da nova barra) da barra (k) pela variação ($I_p Z_{kk}$).

$$V_k = V_k^0 + I_p Z_{kk} \quad (2.48)$$

A tensão da nova barra (p) será maior do que a tensão da barra (k) sendo dada por:

$$V_p - V_k = I_p Z_b \quad (2.49)$$

$$V_p = V_k + I_p Z_b \quad (2.50)$$

$$V_p = V_k^0 + I_p Z_{kk} + I_p Z_b \quad (2.51)$$

Substituindo para:

$$V_p = Z_{k1}I_1 + Z_{k2}I_2 + \dots + Z_{kn}I_n + (Z_{kk} + Z_b) I_p \quad (2.52)$$

Sendo a equação (2.52) referente a nova linha que deve ser adicionada na matriz impedância original do sistema. A nova matriz impedância ficará com o formato mostrado na (2.53).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} & Z_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} & Z_{nk} \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kn} & Z_{kk} + Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

2.3.1.3 Adição de impedância de uma barra existente ao nó de referência

Inicialmente conectamos uma nova barra (p) através de uma impedância Z_b a barra existente (k) (corresponde ao caso 2). Depois colocamos a barra (p) em curto o que equivale ligar a impedância Z_b entre a barra (k) e nó de referência. Obtendo a equação (2.54).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ V_p = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} & Z_{1k} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} & Z_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} & Z_{nk} \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kn} & Z_{kk} + Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

No caso 3 não é necessária criar uma nova barra permanente, ela é fictícia. Temos que utilizar a redução de Kron para eliminar a linha cuja tensão da barra é nula.

Os novos elementos da nova matriz impedância da barra são calculados através de:

$$Z_{hi}^{atual} = Z_{hi} - \frac{Z_{h(N+1)}Z_{(N+1)i}}{Z_{kk} + Z_b} \quad (2.55)$$

2.3.1.4 Adição de impedância entre duas barras existentes

Para efetuar os cálculos da nova matriz impedância de barra, é necessário analisar a situação onde ocorre variação na corrente injetada através de duas barras. Observa-se pela figura 2.8 que a variação da tensão em cada barra é causada pelas correntes injetadas no sistema original através das barras (j) e (k).

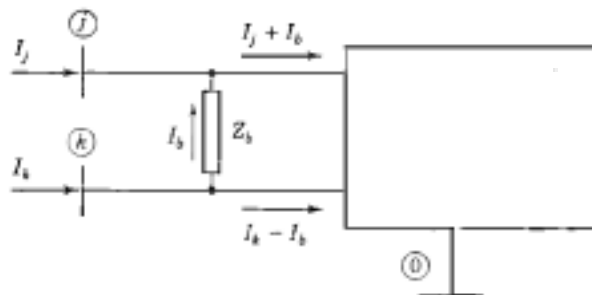


Figura 2.8 - Adição de uma impedância entre duas barras existentes (j) e (k) (FRAZER; DUNCAN, COLLAR, 2012).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_j \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1j}\Delta I_j + Z_{1k}\Delta I_k \\ \vdots \\ Z_{jj}\Delta I_j + Z_{jk}\Delta I_k \\ Z_{kj}\Delta I_j + Z_{kk}\Delta I_k \\ \vdots \\ Z_{nj}\Delta I_j + Z_{nk}\Delta I_k \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

A variação da tensão em cada barra (h) causada pela corrente injetada I_b através da barra (j) e $-I_b$ através da barra (k) para dentro do sistema, é dado por:

$$V_1 = V_1^0 + \Delta V_1 \quad (2.57)$$

Baseado na definição de variação de tensão, podemos escrever as equações para as tensões da barra. Por exemplo, para a barra 1:

$$\Delta V_1 = (Z_{hj} - Z_{hk})I_b \quad (2.58)$$

$$V_1 = Z_{11}I_1 + \dots + Z_{ij}I_j + Z_{1k}I_k + \dots + Z_{1n}I_n + (Z_{1j} - Z_{1k})I_b \quad (2.59)$$

onde

$$V_1^0 = Z_{11}I_1 + \dots + Z_{ij}I_j + Z_{1k}I_k + \dots + Z_{1n}I_n \quad (2.60)$$

$$\Delta V_1 = (Z_{1j} - Z_{1k})I_b \quad (2.61)$$

Como o mesmo método da Expressão (2.61) podemos encontrar as equações para as barras (j) e (k).

$$V_j = Z_{j1}I_1 + \dots + Z_{jj}I_j + Z_{jk}I_k + \dots + Z_{jn}I_n + (Z_{jj} - Z_{jk})I_b \quad (2.62)$$

$$V_j^0 = Z_{j1}I_1 + \dots + Z_{jj}I_j + Z_{jk}I_k + \dots + Z_{jn}I_n \quad (2.63)$$

$$\Delta V_j = (Z_{jj} - Z_{jk})I_b \quad (2.64)$$

2.3.1.5 Redução de Kron de uma Matriz

O método da Redução de Kron é muito utilizado para eliminar barras do sistema com injeção de corrente nula (ou nós passivos), isto é, barras que estejam conectadas à cargas representadas como impedância ou que não estejam conectadas à fontes geradoras.

A redução pode ser aplicada eliminando-se nó por nó, assim para uma matriz quadrada ($n \times n$), o k -ésimo nó pode ser eliminado recalculando os demais elementos das outras $n-1$ linhas através do seguinte processo:

$$y_{ij}' = y_{ij} - \frac{y_{ik} \times y_{jk}}{y_{kk}}$$

Para $i = 1, \dots, k-1, k+1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, k-1, k+1, \dots, n$

$$\begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Considere o exemplo a seguir dado pela matriz (2.71), a mesma pode ser modificada para refletir as alterações no sistema quando a linha e coluna correspondentes às filas de Z_3 e às colunas de Z_2 são eliminados. Esta matriz modificada Z_1 pode ser considerada como uma redução de circuito de Kron ou como uma eliminação algébrica. A redução de Kron é dada por:

$$Z_1 = Z_1 - Z_2 Z_4^{-1} Z_{23} \quad (2.72)$$

A validade da redução (2.72) pode ser provada considerando-se a equação matricial (2.71) na qual A_1, A_2, A_3 e A_4 podem ser consideradas matrizes ou coeficientes simples e X_1, X_2, B_1 e B_2 são vetores ou variáveis simples, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

A expressão (2.73) em forma expandida é

$$A_1 X_1 + A_2 X_2 = B_1 \quad (2.74)$$

$$A_3 X_1 + A_4 X_2 = B_2 \quad (2.75)$$

Reescrevendo (2.75), como

$$A_4 X_2 = B_2 - A_3 X_1 \quad (2.76)$$

Com a pré-multiplicação por A_4^{-1} temos

$$X_2 = A_4^{-1} B_2 - A_4^{-1} A_3 X_1 \quad (2.77)$$

A substituição de X_2 em (2.77) gera

$$A_1 X_1 + A_2 (A_4^{-1} B_2 - A_4^{-1} A_3 X_1) = B_1 \quad (2.78)$$

Rearranjando e reunindo os termos vem

$$(A_1 - A_2 A_4^{-1} A_3) X_1 = B_1 - A_2 A_4^{-1} B_2 \quad (2.79)$$

Vê-se que o coeficiente da incógnita X_1 é o resultado de uma redução de Kron em A_1 , como dado por (2.79), quando a incógnita X_2 é eliminada.

2.4 FALTAS

2.4.1 Faltas Simétricas

Admite-se que que todos os condutores da rede são solicitados de forma idêntica e conduzem o mesmo valor eficaz de corrente de curto, mas é apresentam defasagem de 120° entre as fases. Logo seu cálculo pode ser feito por fase, considerando apenas o circuito de sequência positiva.

2.4.1.1 Falta Trifásica

Na Figura 2.9 é mostrado um exemplo de falta trifásica, é observado que os condutores apresentam o mesmo valor eficaz da corrente de curto, mas apresentam defasagem de 120° entre as fases; e como consequência o cálculo da corrente de falta pode ser efetuado por fase.

Com base no método dos componentes simétricos e aplicação básica de Lei de Kirchhoff, obtemos as seguintes expressões para a corrente de falta trifásica.

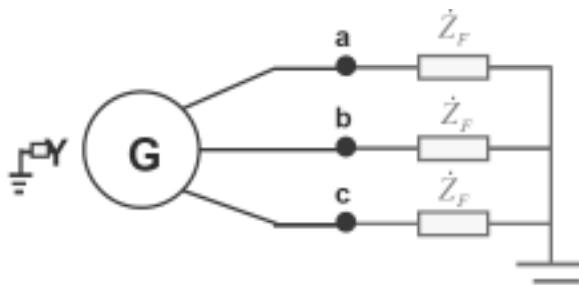


Figura 2.9 - Curto circuito trifásico

Equações que implicam no circuito equivalente:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} I_a \quad (2.80)$$

$$I_n = 0 \quad (2.81)$$

Sendo I_n o valor a soma das correntes $I_a + I_b + I_c$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} V_a \quad (2.82)$$

Como a falta é simétrica, pode ser resolvida pelo equivalente monofásico representado na figura 2.10.

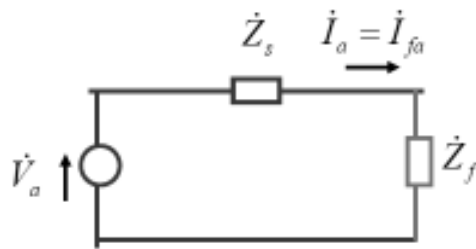


Figura 2.10 - Modelo equivalente para curto trifásico

Com base na análise do equivalente e nas condições de falta, podemos obter as seguintes equações:

$$I_{a0} = I_{a2} = 0 \quad (2.83)$$

$$I_a = I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_f} \quad (2.84)$$

Sendo Z_f o valor da impedância de falta, Z_1 a componente de sequência positiva da matriz Zbarra e E_a o valor da tensão pré-falta.

As correntes nas outras fases são defasadas de 120° .

$$I_f = I_{a1} \quad (2.85)$$

O cálculo das tensões de falta pode ser feito diretamente pelas equações:

$$V_{a0} = -(Z_0 \times I_{a0}) \quad (2.86)$$

$$V_{a1} = E_a - (Z_1 \times I_{a1}) \quad (2.87)$$

$$V_{a2} = -(Z_2 \times I_{a2}) \quad (2.88)$$

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.89)$$

2.4.2 Faltas Assimétricas

As faltas com maiores ocorrências no sistema de potência são as faltas assimétricas. Estes curtos circuitos podem ocorrer entre linhas, linha e terra, ou podem ser entre duas linhas e terra. É importante enfatizar que o meio pelo qual a corrente percorre de linha para linha ou de linha para a terra pode apresentar ou não impedância. Como qualquer falta assimétrica

provoca a circulação de correntes desequilibradas no sistema, utilizamos o método de componentes simétricos para analisar o sistema.

2.4.2.1 Falta Monofásica

A falta entre uma linha e terra pode ser observada na Figura 2.11, considerando a fase em curto como sendo a . Utilizando o modelo de componentes simétricos além dos conhecimentos em circuitos elétricos, são observadas as seguintes expressões que representam o sistema durante este tipo de curto circuito. As condições na falta são dadas pelas seguintes equações, segundo (STEVENSON, 1978):

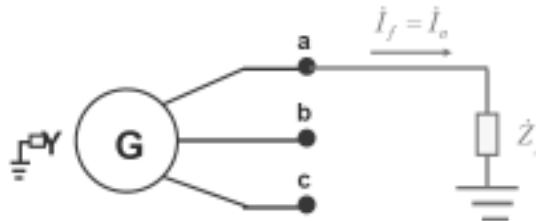


Figura 2.11 - Curto circuito monofásico

Condições de Falta:

$$I_b = 0 \quad (2.90)$$

$$I_c = 0 \quad (2.91)$$

$$V_a = Z_f I_a \quad (2.92)$$

Com base na análise do equivalente mostrado na figura 2.12 e nas condições de falta, podemos obter as seguintes equações:

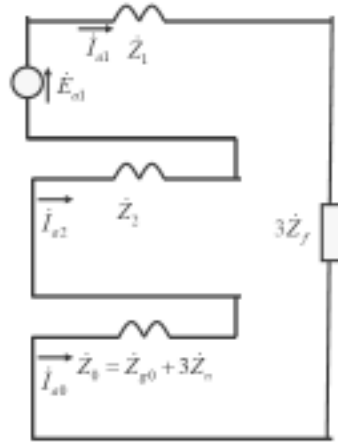


Figura 2.12 - Modelo equivalente para curto monofásico

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.93)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

Substituindo (2.93) e (2.94), temos:

$$I_b = 0 \quad (2.95)$$

$$I_a = I_f \quad (2.96)$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.97)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.98)$$

$$I_f = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.99)$$

O valores das tensões em componentes simétricos podem ser obtidas pelas seguintes expressões:

$$V_{a0} = -(Z_0 \times I_{a0}) \quad (2.100)$$

$$V_{a1} = 1 - (Z_1 \times I_{a1}) \quad (2.101)$$

$$V_{a2} = -(Z_2 \times I_{a2}) \quad (2.102)$$

2.4.2.2 Falta Bifásica

A falta entre duas linhas está representado na figura 2.13, considerando as fases em curto como sendo b e c . Utilizando o modelo de componentes simétricos além dos conhecimentos em circuitos elétricos, são observadas as seguintes expressões que representam o sistema durante este tipo de curto circuito. As condições na falta são dadas pelas seguintes equações, segundo (STEVENSON, 1978):

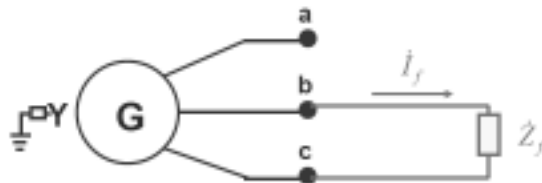


Figura 2.13 - Curto circuito bifásico

Equações que implicam no circuito equivalente:

$$I_a = 0 \quad (2.103)$$

$$I_b = -I_c = I_f \quad (2.104)$$

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (2.105)$$

Com base na análise do equivalente mostrado na figura 2.14 e nas condições de falta, podemos obter as seguintes equações:

$$I_{a0} = 0 \quad (2.106)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2.107)$$

$$I_f = I_b = (a^2 - a)I_{a1} \quad (2.108)$$

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (2.109)$$

$$V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} - (V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}) = Z_f I_b \quad (2.110)$$

$$0 + a^2 V_{a1} + a V_{a2} - (0 + a V_{a1} + a^2 V_{a2}) = Z_f I_b \quad (2.111)$$

$$V_{a1} - V_{a2} = \frac{Z_f I_b}{a^2 - a} \quad (2.112)$$

A partir de:

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} \quad (2.113)$$

Temos:

$$V_{a1} - V_{a2} = \frac{Z_f (a^2 - a) I_{a1}}{a^2 - a} \quad (2.114)$$

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} \quad (2.115)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.116)$$

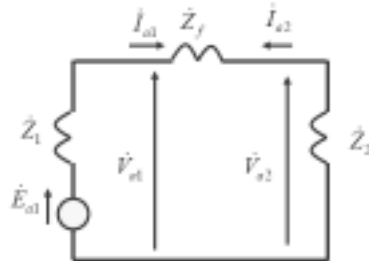


Figura 2.14 - Modelo equivalente para curto bifásico

2.4.2.3 Falta Bifásica - Terra

A falta entre duas linhas e Terra apresentada na figura 2.15, considerando as fases em curto como sendo *b* e *c*. Utilizando o modelo de componentes simétricos além dos conhecimentos em circuitos elétricos, são observadas as seguintes expressões que representam o sistema durante este tipo de curto circuito. As condições na falta são dadas pelas seguintes equações, segundo (STEVENSON, 1978):

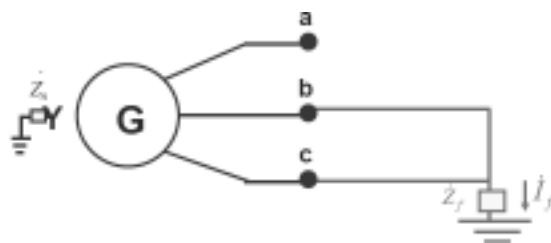


Figura 2.15 - Curto circuito bifásico terra

Condições de Falta:

$$I_a = 0 \quad (2.117)$$

$$I_b + I_c = I_f \quad (2.118)$$

$$V_b = V_c = Z_f I_f \quad (2.119)$$

Com base na análise do equivalente mostrado na figura 2.16 e nas condições de falta, podemos obter as seguintes equações:

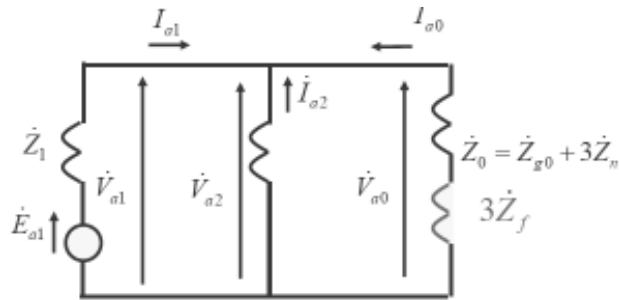


Figura 2.16 - Modelo equivalente para curto bifásico terra

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{V_a}{3} \quad (2.120)$$

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.121)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2(Z_0 + 3Z_f)/(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (2.122)$$

$$I_{a0} = \frac{-I_{a1} \times Z_1}{(Z_1 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (2.123)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \quad (2.124)$$

$$I_f = 2I_{a0} + (aI_{a1} + aI_{a2})(a + 1) \quad (2.125)$$

2.4.3 Cálculo das tensões nodais

O cálculo das tensões nas barras é feito utilizando noções de circuitos elétricos, no qual chegamos nas seguintes fórmulas:

$$V_{a0} = -(Z_{ij\ 0} \times I_{a0}) \quad (2.126)$$

$$V_{a1} = E_a - (Z_{ij\ 1} \times I_{a1}) \quad (2.127)$$

$$V_{a2} = -(Z_{ij\ 2} \times I_{a2}) \quad (2.128)$$

Onde E_a representa a tensão pré-falta.

Chegamos aos seguintes valores das tensões nas barras:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.129)$$

$$V_b = a^2V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0} \quad (2.130)$$

$$V_c = aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0} \quad (2.131)$$

2.4.4 Corrente nos ramos

O cálculo das correntes nos ramos é feito utilizando noções de circuitos elétricos, no qual chegamos nas seguintes equações:

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{R + jX} \quad (2.132)$$

Sendo i e j a barra de saída e entrada respectivamente, R a resistência e X a reatância

$$I_{ij} = I_{ij} \times I_{base} \quad (2.133)$$

$$I = V \times (G + jB) \quad (2.134)$$

Sendo V a tensão, G a admitância e B a susceptância.

3 MÉTODOLOGIA UTILIZADA

Este capítulo fornece os detalhes referentes a elaboração do SiF, que consiste em um módulo inserido no módulo de cálculo de fluxo de potência do SimSEP. Este módulo é responsável pelo cálculo de tensão e corrente durante uma falta. Vale ressaltar que o estado transitório do sistema foi considerado; logo podendo ser utilizado para a operação dos dispositivos de proteção. Assim, tem-se uma resolução simplificada do problema.

3.1 SimSEP

Segundo (BAPTISTA, 2017), o Simulador de Sistemas Elétricos de Potência – SimSEP tem como atribuição, ser um importante programa para estudos sistemáticos da rede em regime permanente, sendo utilizado intrinsecamente em sua programação a modelagem dos equipamentos elétricos envolvidos no sistema de potência, cálculo do fluxo de potência da rede e estimação do estado de um sistema composto por N barras, emitindo relatórios dos fluxos de carga e estados estimados para as 24 horas do dia com periodicidade definida pelo usuário. Todas as informações sobre o programa em questão, podem ser encontradas em (BAPTISTA, 2017).

Para o entendimento sobre funcionamento do SimSEP, pode ser observado a Figura 3.1 com fluxograma de funções e sub-rotinas que são executadas durante a iniciação do simulador.

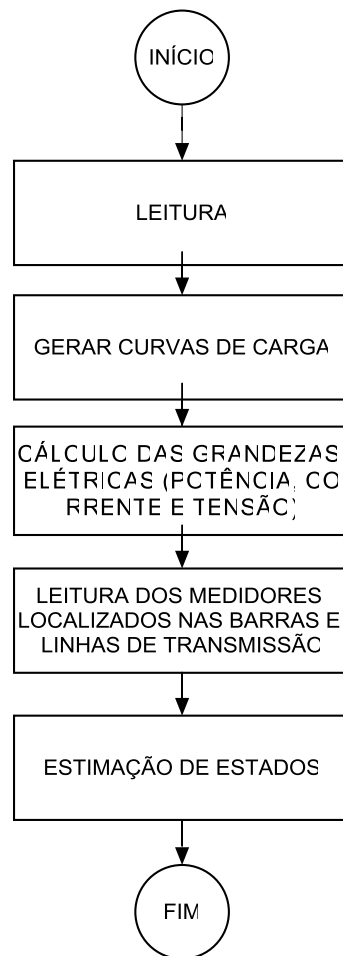


Figura 3.1 - Fluxograma SimSEP (Fonte própria).

3.2 Simulador de Faltas

O simulador de faltas – SiF é um programa elaborado no MATLAB, assim como o SimSEP; tendo com característica principal, ser um módulo totalmente individualizado das funções originais do SimSEP. Esse fato cria uma análise dependente apenas dos parâmetros recebidos inicialmente pelo simulador. O SiF foi criado utilizando subrotinas, este método torna a análise de erros durante a compilação mais fáceis de serem verificadas, além de serem importante para diminuir o tamanho do código.

A ocorrência da falta é feito com base em probabilidades citadas em (GIGUER, 1988) podendo ser verificado na tabela 1, ressaltando que foi considerado 5% de chance de ocorrer uma falta. Esse valor é difícil de ser obtido pois depende de características meteorológicas e da região analisada.

Os valores dos parâmetros utilizados durante o início da execução do SiF são obtidos durante a leitura inicial feita pelo SimSEP, isso retira a necessidade de leitura subsequente e criação de variáveis com informações duplicadas durante a execução do programa. Não sendo previsto a necessidade de ajuste em tempo real.

A Figura 3.2 apresenta o momento exato em que o módulo de análise de faltas é executado e mostra as funções intrínsecas do analisador de faltas. Após a execução do SiF, iniciamos os cálculos matemáticos para a obtenção dos resultados de tensão e correntes de curto circuito. Seguindo os passos: cálculo da matriz Zbarra, obtenção das tensões de faltas e correntes nos ramos após a falha. Os dois últimos passos foram modelados a partir da utilização do método dos componentes simétricos.

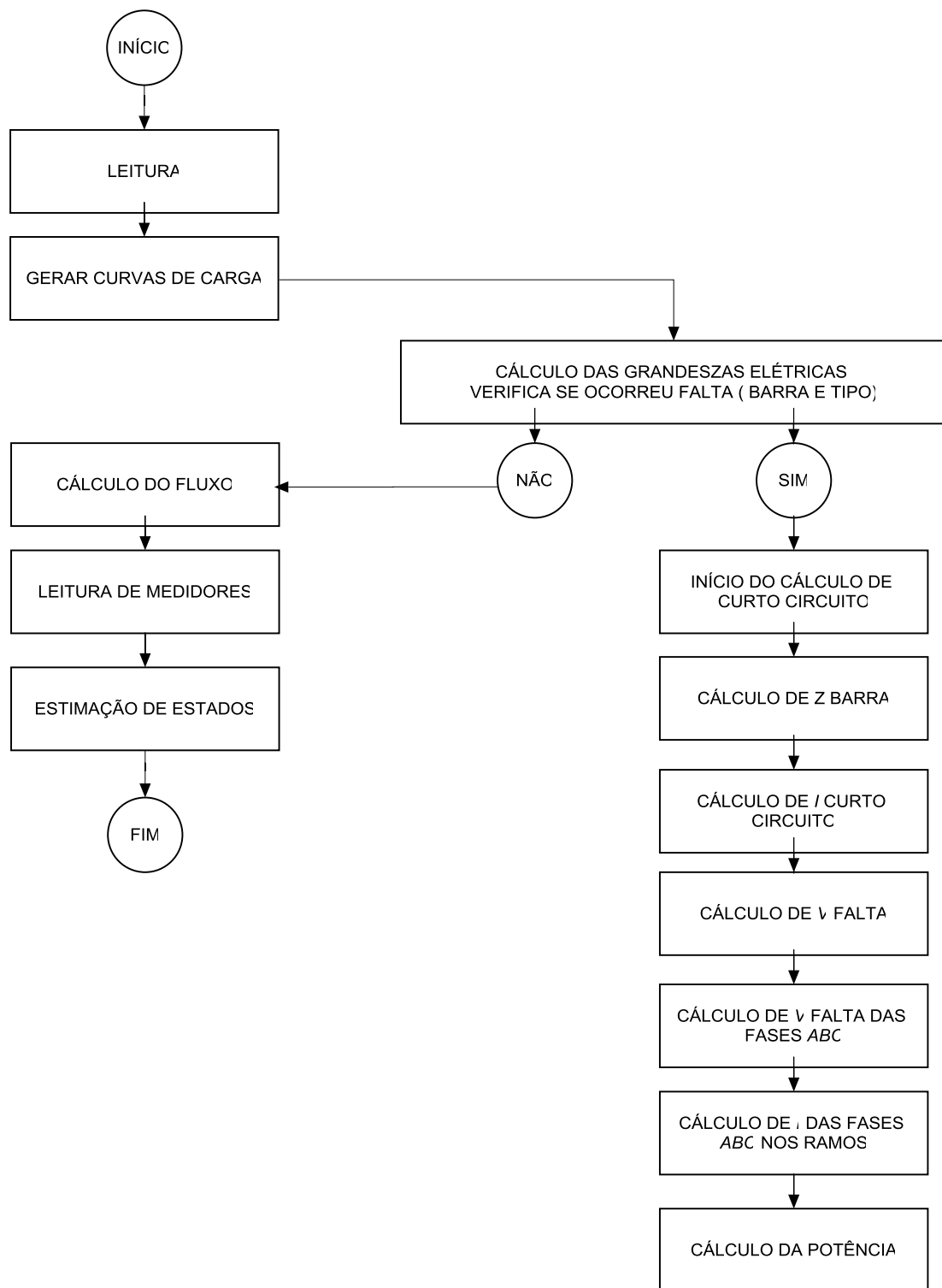


Figura 3.2 - Fluxograma SiF (Fonte própria).

3.2.1 Sub-Rotina “Cálculo das Grandezas Elétricas”

A sub-rotina “C” encontrada no Simulador de Sistemas de Potência – SimSEP foi alterada para receber a funcionalidade de fazer a verificação de uma possível falta no sistema 14 barras analisado. O SiF acrescenta na planilha “Fluxos.xlsx” as seguintes informações: a ocorrência de curto-circuito, tipo do falta, e barra na qual ocorreu a respectiva falta. O fluxograma com o funcionamento da sub-rotina pode ser verificado na Figura 3.3.

Outra alteração que acarreta em uma nova atribuição para esta sub-rotina, ocorre no fato da mesma ser utilizada para abrir um arquivo “zfalta.txt”. Neste arquivo é encontrado o valor da impedância de falta que será utilizada nos cálculos. A impedância de falta segundo (BARIONI, 2017) e (SATO, 2013), sucintamente corresponde à característica física do material percorrido pela corrente de falta, podemos citar como exemplos: resistência do arco elétrico, resistência da torre de transmissão e até mesmo a base da torre de transmissão.

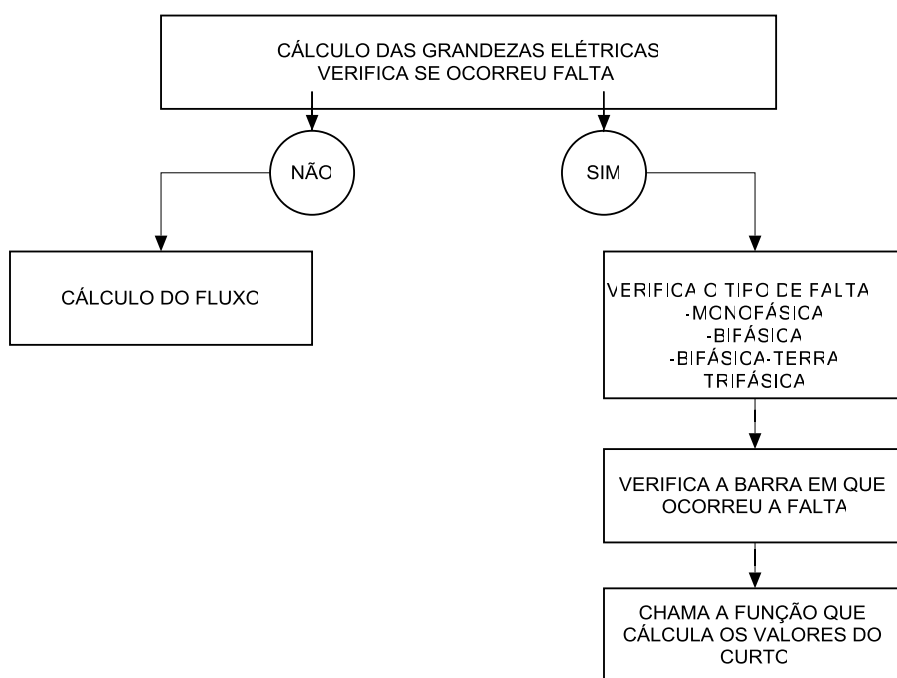


Figura 3.3 - Fluxograma da Sub-Rotina "Cálculo das Grandezas Elétricas" (Fonte própria).

3.2.2 Função “Cálculo Zbarra”

Para a montagem da matriz Zbarra, que apresenta as impedâncias no ponto de inserção de cada nó com base a um nó de referência escolhido arbitrariamente; seguimos com base a teoria detalhada no tópico 2.2 e a Figura 3.4. Primeiramente a função em questão reconhece todas as barras que estão ligadas à terra e começa a construir a matriz pela barra que está na primeira posição do vetor. Quando a barra é adicionada a matriz, ela é apagada do vetor e é adicionada em um vetor de controle.

O vetor de controle é apenas um artifício de programação, pois administra todas as barras que são adicionadas a matriz Zbarra e armazena a ordem em que foram adicionadas. Após adicionado a primeira barra na matriz, incluímos as outras barras desse sistema como conexões entre uma barra existente e uma nova. Essa inclusão ocorre analisando o vetor de controle e comparando para cada uma das barras adicionadas se as barras ligadas as mesmas já foram adicionadas no vetor de controle ou não, caso não, a barra é adicionada à matriz e ao vetor de controle, caso já tenha sido adicionada pula-se para a próxima barra do vetor de controle.

O resultado dessa parte do processo é uma matriz quadrada com dimensão igual ao número de barras do sistema, ressaltando que a matriz ainda não estará na configuração final, no sentido que o número de uma certa linha não corresponde ao número da barra. Então o próximo passo do programa é reorganizar essa matriz levando em conta a ordem que as barras estão no vetor de controle.

Após o processo de organização da matriz, são adicionadas todas as conexões restantes entre as barras que se caracterizam ligação entre duas barras existentes e como ligação de barra existente à terra.

A função de cálculo de Zbarra é chamada mais vezes para o cálculo da Zbarra positiva e a de sequência zero.



Figura 3.4 - Fluxograma da função "Cálculo de Zbarra" (Fonte própria).

3.2.3 Função "Cálculo da Corrente de Curto Circuito"

A função em questão é responsável pelo cálculo da corrente de curto circuito, sendo necessário para seu funcionamento a especificação anteriormente do tipo de falta que será analisado e a barra na qual ocorreu. A partir disto, é utilizado o método dos componentes simétricos para obtenção dos valores de corrente, ressaltando que os valores são calculados em *pu*. As fórmulas utilizadas constam no tópico referente a Faltas.

Seu modo de funcionamento pode ser observado na Figura 3.5. É importante enfatizar a necessidade de obtenção dos valores da corrente em módulo e ângulo, sendo os mesmos armazenados em variáveis distintas, isso facilitará futuros cálculos matemáticos no MATLAB. Neste momento calcula-se o valor da corrente base, que será utilizado para a obter os resultados em amperes.

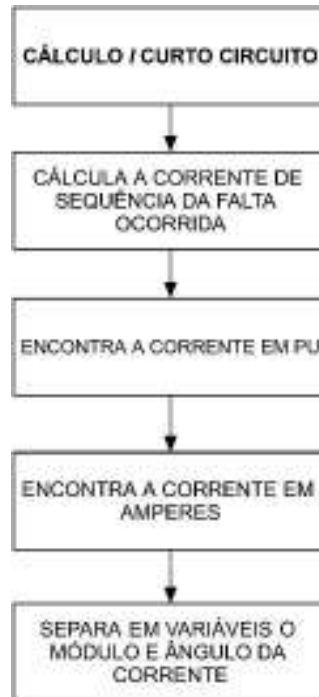


Figura 3.5 - Fluxograma da Função "Cálculo da Corrente de Curto Circuito" (Fonte própria).

3.2.4 Função "Cálculo da Tensão de Falta"

A respectiva tensão em cada barra do sistema, pode ser obtida de forma direta pela utilização do método dos componentes simétricos, no qual utilizamos a corrente de falta calculada anteriormente, na Função "Cálculo da Corrente de Curto Circuito" apresentada em 3.2.3, e multiplicamos pelo matriz Z_{barra} conveniente. A partir disto, também é possível obter os valores das tensões nas fases a , b e c , somente fazendo a soma dos componentes simétricos e aplicando o operador quando necessário. As fórmulas utilizadas para cálculo da matriz constam no tópico de Faltas.

A sua funcionalidade pode ser observada no fluxograma apresentado na Figura 3.6.

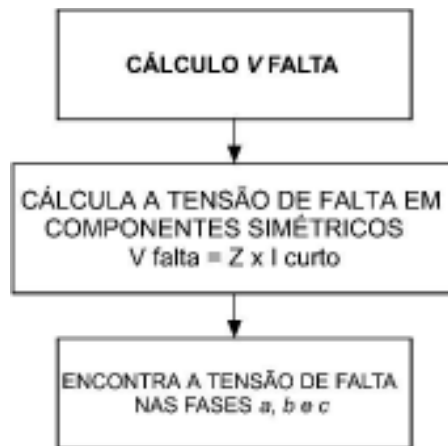


Figura 3.6 - Fluxograma da Função "Cálculo da Tensão de Falta" (Fonte própria).

3.2.5 Função "Cálculo da Tensão de Falta em Amperes"

Essa função é apresentada na Figura 3.7; sendo necessária, pois existe a importância de isolarmos em variáveis distintas os valores da tensão em: pu, módulo e ângulo. Após isso, é possível obter cálculos específicos e resultados em formatos diferentes, isso é necessário caso seja de interesse do usuário analisar as respostas em formatos e unidades diferentemente dos padrões estabelecidos.

A função "Cálculo de Tensão de Falta em Amperes" apresenta intrinsecamente a multiplicação da corrente em pu pela tensão base. Com base em circuitos elétricos existe a possibilidade de encontrar a tensão fase-fase e fase-terra. Basicamente após este à execução deste método matemático, apenas é necessário organizar a ordem das barras e suas respectivas tensões e criar variáveis para receber os valores do módulo e ângulo das tensões.

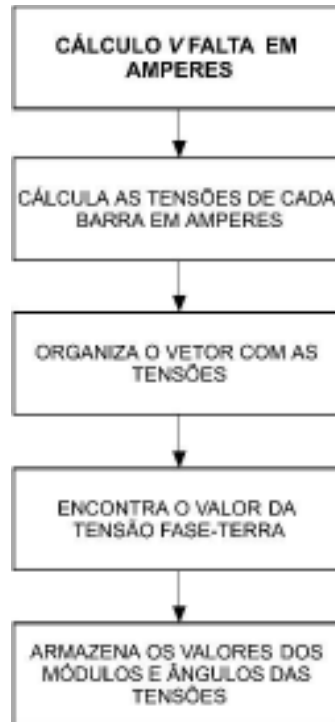


Figura 3.7 - Fluxograma da Função "Cálculo da Tensão de Falta em Amperes" (Fonte própria).

3.2.6 Função "Cálculo da Corrente de Curto nos Ramos"

O objetivo desta função é calcular os valores das correntes que circulam pelos ramos presentes no sistema 14 barras, como mostra a Figura 3.8. Essa função se torna importante, pois podemos identificar os ramos críticos em caso de curto circuito. Deste modo, nossas respostas são importantes para estudos em ramos críticos, e alteração do sistema elétrico para diminuição da contribuição da corrente de falta nestes ramos.

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{R + jX} \quad (3.1)$$

$$I_{ij} = I_{ij} \times I_{base} \quad (3.2)$$

$$I = V \times (G + jB) \quad (3.3)$$

Sendo V a tensão, G a admitância e B a susceptância.

Uma consideração que se tornou necessária durante a aplicação desta função, é o fato do valor da susceptância B ser considerado nulo para efeitos de cálculos. Essa premissa não altera de forma significativa os resultados, pois grande parte dos estudos atuais sobre análises de curtos circuitos já partem do princípio desta consideração.

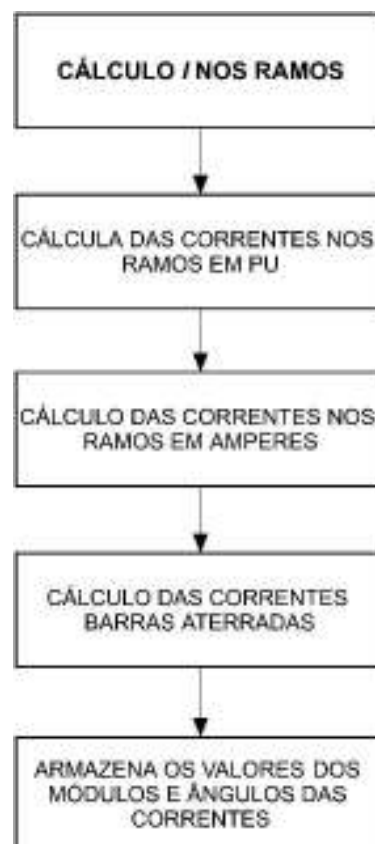


Figura 3.8 - Fluxograma da Função "Cálculo da Corrente de Curto nos Ramos" (Fonte própria).

3.2.7 Função “Planilha CC”

Esta função apresenta como característica principal a conversão das unidades de radianos para graus; isso é necessário para fazer futuramente a comparação com os resultados do ANAFAS. Outra atribuição importante para a mesma, é fazer a escrita na planilha “Fluxos.xlsx” de todas as informações necessárias para a análise de faltas no sistema de 14 barras. Sua forma de operação pode ser observada na Figura 3.9.

As informações escritas na planilha são:

- Barras
- Potência Ativa e Reativa
- Corrente nos Ramos
- Módulo e Ângulo das Correntes e Tensões
- Conversão de Radianos para Graus

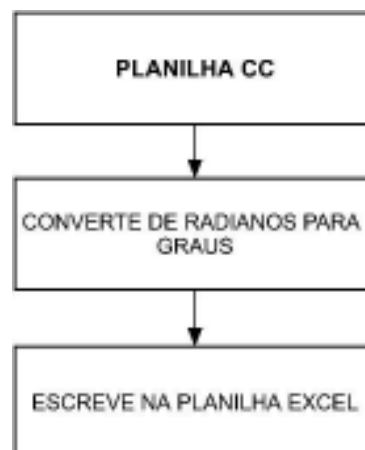


Figura 3.9 - Fluxograma da Função " Planilha CC" (Fonte própria).

3.2.8 Função “Cálculo CC”

A função em questão é apresentada na Figura 3.10, tendo como finalidade a operação de todas as outras funções e sub-rotinas criadas anteriormente; executando-as de forma organizada para cada tipo de curto analisado. Deste modo, não existe a possibilidade da resolução equivocada por parte do simulador, porque após ser sorteado a barra e o tipo de curto, o mesmo é armazenado em variáveis isoladas. Logo após, todos os outros passos são iniciados, basicamente como uma resolução matemática de um curto circuito.



Figura 3.10 - Fluxograma da Função "Cálculo CC" (Fonte própria).

4.1 IEEE 14 BARRAS

Para a análise do SiF foram utilizadas as informações encontradas no arquivo “ieee14.txt”, CDF – Common Data Format. Nele estão detalhados todos os valores dos parâmetros do sistema 14 barras. As principais informações são: níveis de tensão, barras aterradas, transformadores, geradores, impedâncias entre linhas, entre outros

4.2 COMPARAÇÃO COM O ANAFAS

O programa computacional ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) é utilizado para cálculo de curtos-circuitos na rede elétrica. Permitindo a análise e resposta do sistema a faltas em diversos pontos do sistema; obtendo como resultados orientados a pontos de falta e de monitoração. Para o atual estudo é feito a conversão do arquivo “ieee14.cmd” para o formato de leitura do ANAFAS, logo após é inserido pelo usuário os parâmetros e informações que serão consideradas para a elaboração dos resultados.

Suas principais características são:

- Facilidade e flexibilidade na definição dos casos, permitindo a modelagem de feitos simultâneos aplicados sobre barras ou pontos intermediários de linhas de transmissão; modelagem de diversos tipos de defeitos, incluindo curtos-circuitos “shunt”, com ou sem impedância.
- Permite a modelagem fiel do sistema elétrico, com possibilidade de representação do carregamento pré-falta, desfasamento dos transformadores, etc.
- Solução orientada a ponto de falta ou a ponto de monitoração, onde o usuário define as grandezas a serem observadas.

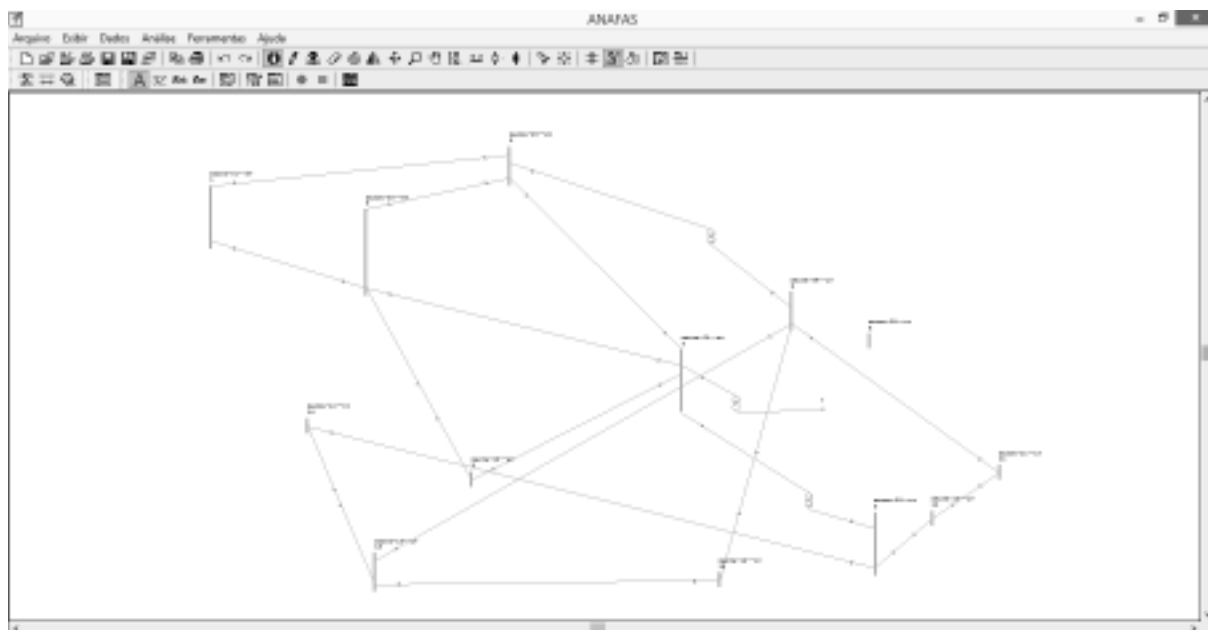


Figura 4.2 - Modelagem do sistema 14 barras no ANAFAS (Fonte própria).

4.3 PROBABILIDADE DE FALTA

Os sistemas de potência de energia elétrica estão susceptíveis às faltas que podem ser temporárias ou permanentes. As faltas temporárias são aquelas cuja duração é limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através de operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou alguma ramificação dele. As faltas permanentes são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas. Um dos tipos de faltas mais comuns em um sistema de energia elétrica é o curto-circuito. Este tipo de falta causa sobrecorrente e desbalanço na tensão. Com base no (GIGUER, 1988), a Tabela 1 apresenta dados estatísticos entre os tipos de faltas e a composição das mesmas.

Tabela 1 - Probabilidade entre os Tipos de Faltas (Fonte própria).

| FALTAS | % | PERMANENTES(%) | TEMPORARIAS(%) |
|------------|----|----------------|----------------|
| Trifásicas | 2 | 95 | 5 |
| Bifásicas | 11 | 70 | 30 |
| Fase-Terra | 79 | 20 | 80 |
| Outros | 8 | - | - |

Segundo (MAMEDE, 2005), essas faltas no sistema são normalmente provocadas pela ação de descargas atmosféricas, falhas de equipamento e erro humano. Classificam-se como faltas simultâneas quando ocorrem duas ou mais faltas no mesmo instante de tempo. Estas ocorrências são resultados de eventos como descarga atmosférica e manipulações erradas de equipamentos pelos operários. Este tipo de falta é um evento que tem baixa probabilidade que ocorra, pois é muito difícil que ocorram duas faltas no mesmo instante de tempo.

Foram avaliados os resultados para as faltas monofásica, bifásica, bifásica-terra e trifásica. Para critério de informação, não foram considerados os valores da susceptância, a tensão pré falta é fixada em módulo 1 e ângulo 0 graus, e não foram considerados as contribuições devido as variações das cargas no sistema.

4.3.1 Falta Monofásica

Os resultados obtidos durante a simulação de uma falta monofásica na barra 10, encontram-se na Tabela 2. É verificado que os valores apresentam uma diferença ínfima quando comparados ao programa ANAFAS. Desta forma é concretizado a capacidade do SiF em resolver o problema proposto para o caso de faltas monofásicas.

Tabela 2 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto monofásico (Fonte própria).

| DE | PARA | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | | BUS | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | |
|----|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|-----|---------|-------|---------|--------|----------|--------|
| | | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | | Voltage | Ang G | Voltage | Ângulo | Voltage | Ângulo |
| 1 | 2 | 0,2 | -103,7 | 0,2 | -103,7 | 0 | 0,00 | 1 | 0,007 | 157,6 | 0,007 | 157,6 | 0 | 0 |
| 1 | 5 | 0,2 | 76,3 | 0,2 | 76,3 | 0 | 0,00 | 2 | 0,007 | 157,6 | 0,007 | 157,6 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 0,2 | -102,3 | 0,2 | -102,3 | 0 | 0,00 | 3 | 0,008 | 157,6 | 0,008 | 157,6 | 0 | 0 |
| 2 | 4 | 0,4 | -101,2 | 0,4 | -101,2 | 0 | 0,00 | 4 | 0,008 | 157,5 | 0,008 | 157,5 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 0,3 | 79,8 | 0,3 | 79,8 | 0 | 0,00 | 5 | 0,007 | 157,7 | 0,007 | 157,7 | 0 | 0 |
| 3 | 4 | 0,2 | -102,3 | 0,2 | -102,5 | 0 | 0,20 | 6 | 0,005 | 153,7 | 0,005 | 153,7 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 2,9 | 78,7 | 2,9 | 78,7 | 0 | 0,00 | 7 | 0,009 | 158,8 | 0,009 | 158,8 | 0 | 0 |
| 4 | 7 | 2,2 | -101,4 | 2 | -101,4 | 10 | 0,00 | 8 | 0,009 | 158,8 | 0,008 | 158,8 | 12,5 | 0 |
| 4 | 9 | 1,3 | -101,4 | 1,3 | -101,4 | 0 | 0,00 | 9 | 0,009 | 159,4 | 0,009 | 159,4 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 3,5 | 78,6 | 3,5 | 78,6 | 0 | 0,00 | 10 | 0,000 | 179,3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 11 | 22,0 | 88,0 | 22 | 88 | 0 | 0,00 | 11 | 0,003 | 154,9 | 0,003 | 154,9 | 0 | 0 |
| 6 | 12 | 1,7 | -68,4 | 1,7 | -68,4 | 0 | 0,00 | 12 | 0,006 | 154,8 | 0,006 | 154,8 | 0 | 0 |
| 6 | 13 | 6,8 | -78,5 | 6,8 | -78,52 | 0 | 0,03 | 13 | 0,006 | 154,7 | 0,006 | 154,7 | 0 | 0 |
| 7 | 8 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 14 | 0,008 | 157,7 | 0,008 | 157,7 | 0 | 0 |
| 7 | 9 | 8,9 | -101,4 | 9 | -103,5 | 0 | 0,00 | | | | | | | |
| 9 | 10 | 179,2 | 90,0 | 179,2 | 90 | 0 | 0,00 | | | | | | | |
| 9 | 14 | 8,5 | 103,5 | 8,5 | 103,5 | 0 | 0,00 | | | | | | | |
| 10 | 11 | 22,0 | -92,0 | 22 | -92 | 0 | 0,00 | | | | | | | |
| 12 | 13 | 1,7 | -68,4 | 1,7 | -68,4 | 0 | 0,00 | | | | | | | |
| 13 | 14 | 8,5 | -76,5 | 8,5 | -76,5 | 0 | 0,00 | | | | | | | |

4.3.2 Falta Bifásica

Os resultados obtidos durante a simulação de uma falta bifásica na barra 10, encontram-se na Tabela 3. É verificado que os valores apresentam uma diferença ínfima quando comparados ao programa ANAFAS. Desta forma é concretizado a capacidade do SiF em resolver o problema proposto para o caso de faltas bifásicas.

Tabela 3 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto bifásico (Fonte própria).

| DE | PARA | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | | BUS | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | |
|----|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|-----|---------|-------|---------|--------|----------|--------|
| | | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | | Voltage | Ang G | Voltage | Ângulo | Voltage | Ângulo |
| 1 | 2 | 0,3 | 166,1 | 0,3 | 166,1 | 0 | 0 | 1 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,8 | 0,0 | 0,0 |
| 1 | 5 | 0,3 | -13,9 | 0,3 | -13,9 | 0 | 0 | 2 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,8 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 3 | 0,3 | 167,6 | 0,3 | 167,6 | 0 | 0 | 3 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,8 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 4 | 0,5 | 168,7 | 0,5 | 168,7 | 0 | 0 | 4 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,8 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 5 | 0,5 | -10,3 | 0,5 | -10,3 | 0 | 0 | 5 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,9 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | 4 | 0,3 | 167,6 | 0,3 | 168,7 | 0 | 1 | 6 | 0,497 | 179 | 0,497 | 179,2 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | 5 | 4,3 | -11,5 | 4,3 | -11,4 | 0 | 1 | 7 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,6 | 0,0 | 0,0 |
| 4 | 7 | 3,2 | 168,5 | 3,2 | 168,6 | 0 | 0 | 8 | 0,496 | 179 | 0,495 | 178,5 | 0,2 | 0,1 |
| 4 | 9 | 1,8 | 168,5 | 1,8 | 168,6 | 0 | 0 | 9 | 0,495 | 179 | 0,495 | 178,5 | 0,0 | 0,0 |
| 5 | 6 | 5,1 | -11,5 | 5,1 | -11,5 | 0 | 0 | 10 | 0,5 | -180 | 0,5 | -180 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | 11 | 31,9 | -2,1 | 31,9 | -2,1 | 0 | 0 | 11 | 0,498 | 180 | 0,498 | 179,6 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | 12 | 2,5 | -158,5 | 2,5 | -158,5 | 0 | 0 | 12 | 0,497 | 179 | 0,497 | 179,1 | 0,0 | 0,0 |
| 6 | 13 | 9,9 | -168,7 | 9,9 | -168,7 | 0 | 0 | 13 | 0,496 | 179 | 0,496 | 179,1 | 0,0 | 0,0 |
| 7 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0,496 | 179 | 0,496 | 178,5 | 0,0 | 0,2 |
| 7 | 9 | 12,9 | 168,5 | 13 | 168,6 | 1 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 10 | 260,1 | -0,1 | 260,1 | -0,1 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 14 | 12,4 | 13,4 | 12,4 | 13,4 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 11 | 31,9 | 177,9 | 31,9 | 177,9 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 12 | 13 | 2,5 | -158,5 | 2,5 | -158,5 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 13 | 14 | 12,4 | -166,6 | 12,4 | -166,6 | 0 | 0 | | | | | | | |

4.3.3 Falta Bifásica - Terra

Os resultados obtidos durante a simulação de uma falta bifásica-terra na barra 10, encontram-se na Tabela 4. É verificado que os valores apresentam uma diferença ínfima quando comparados ao programa ANAFAS. Desta forma é concretizado a capacidade do SiF em resolver o problema proposto para o caso de falta bifásica-terra.

Tabela 4 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto bifásico-terra (Fonte própria).

| DE | PARA | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | | BUS | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | |
|----|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|-----|---------|-------|---------|--------|----------|--------|
| | | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | | Voltage | Ang G | Voltage | Ângulo | Voltage | Ângulo |
| 1 | 2 | 0,3 | 152,4 | 0,3 | 152,4 | 0 | 0 | 1 | 0,011 | 53,7 | 0,011 | 53,7 | 0 | 0 |
| 1 | 5 | 0,3 | -27,6 | 0,3 | -27,6 | 0 | 0 | 2 | 0,011 | 53,7 | 0,011 | 53,7 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 0,3 | 153,8 | 0,3 | 153,8 | 0 | 0 | 3 | 0,011 | 53,7 | 0,011 | 53,7 | 0 | 0 |
| 2 | 4 | 0,6 | 154,9 | 0,6 | 154,9 | 0 | 0 | 4 | 0,011 | 53,6 | 0,011 | 53,6 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 0,5 | -24,1 | 0,5 | -24,1 | 0 | 0 | 5 | 0,011 | 53,8 | 0,011 | 53,8 | 0 | 0 |
| 3 | 4 | 0,3 | 153,8 | 0,3 | 153,8 | 0 | 0 | 6 | 0,008 | 49,8 | 0,008 | 49,8 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 4,4 | -25,2 | 4,4 | -25,2 | 0 | 0 | 7 | 0,013 | 54,9 | 0,013 | 54,9 | 0 | 0 |
| 4 | 7 | 3,3 | 154,7 | 3,3 | 154,7 | 0 | 0 | 8 | 0,013 | 54,9 | 0,013 | 54,9 | 0 | 0 |
| 4 | 9 | 1,9 | 154,7 | 1,9 | 154,7 | 0 | 0 | 9 | 0,014 | 55,5 | 0,014 | 55,5 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 5,2 | -25,3 | 5,2 | -25,2 | 0 | 0 | 10 | 0,00 | -0,10 | 0,00 | 0,43 | 0 | -123 |
| 6 | 11 | 32,9 | -15,9 | 32,9 | -15,9 | 0 | 0 | 11 | 0,004 | 51 | 0,004 | 51 | 0 | 0 |
| 6 | 12 | 2,6 | -172,3 | 2,6 | -172,3 | 0 | 0 | 12 | 0,008 | 50,9 | 0,008 | 51 | 0 | 0 |
| 6 | 13 | 10,2 | 177,6 | 10,2 | 177,6 | 0 | 0 | 13 | 0,009 | 50,8 | 0,009 | 50,8 | 0 | 0 |
| 7 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0,012 | 53,8 | 0,012 | 53,8 | 0 | 0 |
| 7 | 9 | 13,3 | 154,7 | 13 | 154,7 | 2 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 10 | 268 | -13,9 | 268 | -13,9 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 14 | 12,8 | -0,4 | 12,8 | -0,4 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 11 | 32,9 | 164,1 | 32,9 | 164,1 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 12 | 13 | 2,6 | -172,3 | 2,6 | -172,3 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 13 | 14 | 12,8 | 179,6 | 12,8 | 179,6 | 0 | 0 | | | | | | | |

4.3.4 Falta Trifásica

Os resultados obtidos durante a simulação de uma falta trifásica na barra 10 encontram-se na Tabela 5. É verificado que os valores apresentam uma diferença ínfima quando comparados ao programa ANAFAS. Desta forma é concretizado a capacidade do SiF em resolver o problema proposto para o caso de faltas trifásicas.

Tabela 5 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto trifásico (Fonte própria).

| DE | PARA | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | | BUS | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | |
|----|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|-----|---------|-------|---------|--------|----------|--------|
| | | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | | Voltage | Ang G | Voltage | Ângulo | Voltage | Ângulo |
| 1 | 2 | 0,4 | -103,9 | 0,4 | -103,9 | 0 | 0 | 1 | 0,013 | 158 | 0,013 | 157,5 | 0 | 0 |
| 1 | 5 | 0,4 | 76,1 | 0,4 | 76,1 | 0 | 0 | 2 | 0,013 | 158 | 0,013 | 157,5 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 0,3 | -102,4 | 0,3 | -102,4 | 0 | 0 | 3 | 0,013 | 157 | 0,013 | 157,5 | 0 | 0 |
| 2 | 4 | 0,6 | -101,3 | 0,6 | -101,3 | 0 | 0 | 4 | 0,013 | 157 | 0,013 | 157,3 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 0,6 | 79,7 | 0,6 | 79,7 | 0 | 0 | 5 | 0,012 | 158 | 0,012 | 157,6 | 0 | 0 |
| 3 | 4 | 0,3 | -102,4 | 0,3 | -102,4 | 0 | 0 | 6 | 0,009 | 154 | 0,009 | 153,5 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 4,9 | 78,5 | 4,9 | 78,5 | 0 | 0 | 7 | 0,015 | 159 | 0,015 | 158,7 | 0 | 0 |
| 4 | 7 | 3,7 | -101,5 | 3,7 | -101,5 | 0 | 0 | 8 | 0,015 | 159 | 0,015 | 158,7 | 0 | 0 |
| 4 | 9 | 2,1 | -101,5 | 2,1 | -101,5 | 0 | 0 | 9 | 0,016 | 159 | 0,016 | 159,3 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 5,9 | -78,5 | 5,9 | -78,5 | 0 | 0 | 10 | 0,000 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 11 | 36,9 | 87,9 | 36,9 | 87,9 | 0 | 0 | 11 | 0,004 | 155 | 0,004 | 154,8 | 0 | 0 |
| 6 | 12 | 2,9 | -68,5 | 2,9 | -68,5 | 0 | 0 | 12 | 0,009 | 155 | 0,009 | 154,6 | 0 | 0 |
| 6 | 13 | 11,4 | -78,7 | 11,4 | -78,7 | 0 | 0 | 13 | 0,01 | 155 | 0,01 | 154,6 | 0 | 0 |
| 7 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0,013 | 158 | 0,014 | 157,6 | -7 | 0 |
| 7 | 9 | 14,9 | -101,5 | 15 | -101,5 | -1 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 10 | 300,4 | 89,9 | 300,4 | 89,9 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 14 | 14,3 | 103,4 | 14,3 | 103,4 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 11 | 36,9 | -92,1 | 36,9 | -92,1 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 12 | 13 | 2,9 | -68,5 | 2,9 | -68,5 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 13 | 14 | 14,3 | -76,6 | 14,3 | -76,6 | 0 | 0 | | | | | | | |

4.3.5 Falta no Módulo Completo do SimSEP

As respostas obtidas neste caso, são referentes a execução do SimSEP utilizando a probabilidade de 5% para a ocorrência de uma falta; além dos dados contidos na Tabela 1. O resultado dessa simulação está representado na Tabela 6 e Tabela 7, onde podemos observar as probabilidades do simulador sendo executadas, assim como a veracidade dos dados obtidos quando comparados com o programa ANAFAS.

Tabela 6 - Ocorrências de Falta no Módulo SimSEP (Fonte própria).

| HORA | OCORRÊNCIA DE FALTA | BARRA | TIPO DE CURTO |
|------|---------------------|-------|---------------|
| 21 | SIM | 3 | MONOFÁSICO |

Tabela 7 - Comparação SiF x ANAFAS para um curto monofásico às 21 horas (Fonte própria).

| DE | PARA | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | | BUS | SiF | | ANAFAS | | ERRO (%) | |
|----|------|--------|---------------|--------|---------------|----------|---------------|-----|---------|-------|---------|--------|----------|--------|
| | | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | I (ij) | I (ij) ÂNGULO | | Voltage | Ang G | Voltage | Ângulo | Voltage | Ângulo |
| 1 | 2 | 5 | 85,1 | 5 | 85,1 | 0 | 0 | 1 | 0,01 | 162 | 0,01 | 162,2 | 0 | 0 |
| 1 | 5 | 5 | -94,9 | 5 | -94,9 | 0 | 0 | 2 | 0,01 | 163 | 0,01 | 162,6 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 20,7 | 86 | 20,7 | 86 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 4 | 7,8 | -96,2 | 7,8 | -96,2 | 0 | 0 | 4 | 0,013 | 161 | 0,013 | 160,8 | 0 | 0 |
| 2 | 5 | 8 | -91,4 | 8 | -91,3 | 0 | 0 | 5 | 0,013 | 162 | 0,013 | 162,1 | 0 | 0 |
| 3 | 4 | 30,7 | -87,8 | 30,7 | -87,8 | 0 | 0 | 6 | 0,02 | 172 | 0,02 | 172,3 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 2,9 | -12,6 | 2,9 | -12,6 | 0 | 0 | 7 | 0,024 | 168 | 0,024 | 168,1 | 0 | 0 |
| 4 | 7 | 24,1 | -93,7 | 24,1 | -93,7 | 0 | 0 | 8 | 0,024 | 168 | 0,024 | 168,1 | 0 | 0 |
| 4 | 9 | 13,8 | -93,7 | 13,8 | -93,7 | 0 | 0 | 9 | 0,03 | 170 | 0,03 | 169,7 | 0 | 0 |
| 5 | 6 | 13,7 | -80,8 | 13,7 | -80,8 | 0 | 0 | 10 | 0,028 | 170 | 0,028 | 169,9 | 0 | 0 |
| 6 | 11 | 33,4 | -81,8 | 33,4 | -81,8 | 0 | 0 | 11 | 0,024 | 171 | 0,024 | 170,6 | 0 | 0 |
| 6 | 12 | 4,4 | -71,3 | 4,4 | -71,3 | 0 | 0 | 12 | 0,021 | 172 | 0,021 | 172,3 | 0 | 0 |
| 6 | 13 | 17,2 | -81,4 | 17,2 | -81,4 | 0 | 0 | 13 | 0,022 | 172 | 0,022 | 171,6 | 0 | 0 |
| 7 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0,027 | 170 | 0,027 | 170,3 | 0 | 0 |
| 7 | 9 | 96,2 | -93,7 | 96 | -93,7 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 10 | 33,4 | 98,2 | 33,4 | 98,2 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 9 | 14 | 21,6 | 100,7 | 21,6 | 100,7 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 10 | 11 | 33,4 | 98,2 | 33,4 | 98,2 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 12 | 13 | 4,4 | -71,3 | 4,4 | -71,2 | 0 | 0 | | | | | | | |
| 13 | 14 | 21,6 | -79,3 | 21,6 | -79,3 | 0 | 0 | | | | | | | |

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo desse trabalho, criar um módulo de faltas para o SimSEP, foi alcançado de forma satisfatória. Assim o SiF pode ser considerado um bom simulador em ambientes acadêmicos. Vale ressaltar, a necessidade de aperfeiçoamentos e incrementos para o simulador de faltas, sendo os seguintes parâmetros importantes para futuros estudos: influência da carga, tap dos transformadores e inclusão da susceptância no modelo.

Outro ponto fundamental e capaz de gerar interessantes trabalhos futuros consiste em após obtenção dos valores de tensão e correntes de falta, fazer o dimensionamento das proteções. Esse estudo é importante para exploração de novos horizontes durante um estudo em sistemas de potência. Pois, grande parte das modernizações e variações nos sistemas são definidos pela proteção e estabilidade necessária durante sua operação.

Existe também a necessidade de considerar sistemas com maior quantidade de barras; essa verificação não pode ser analisada devido a limitações do SimSEP. Visto, que no presente trabalho, os resultados foram obtidos para estudos em sistemas com 14 barras. Isso aumenta a complexidade do problema e torna o simulador de faltas funcional para sistemas bem próximos do real.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

G. kindermann, *Curto-Circuito*, 2ª Edição: Sagra Luzzato, 1997.

W. Stevenson, *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, McGraw-Hill do Brasil, 1978.

C. C. Barioni, *Introdução à Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*, Blucher, 2017.

J. R. W. e. H. Hale, *Digital solution of power flow problems*, Trans. AIEE.

W. J. D. e. A. R. C. R. A . Frazer, *Elementary Matrices*, Cambridge Press, 1995.

J. M. Baptita, *Simulador de Sistemas Elétricas de Potência - SimSEP*, Niterói, 2017.

F. Sato, *Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*, Campinas: Engenharia Elétrica e da Computação - Unicamp, 2003.

S. Gieger, *Proteção de Sistemas de Distribuição*, Sagra, 1988.

J. M. F, *Manual de Equipamentos Elétricos*, 3ª Edição: TLC, 2005.