

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS MG**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**ANTONIEL NUNES DE CARVALHO**

**PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO**

**Varginha**  
**2016**

**ANTONIEL NUNES DE CARVALHO**

**PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Elétrica sob orientação do Prof. Thiago Cornélio da Fonseca.

**Varginha  
2016**

**ANTONIEL NUNES DE CARVALHO**

**PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Elétrica sob orientação do Prof. Thiago Cornélio da Fonseca.

Aprovado em:    /    /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a minha família, e ao meu professor e orientador Thiago Cornélio da Fonseca, aos sinceros amigos de classe e a todos que contribuíram para o bom desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço primeiramente a Deus pela força e determinação, a minha esposa Thamires e a meus pais José Vicente e Maria Aparecida que tanto amo, a meus irmãos pelo apoio e a todos que contribuíram para a realização deste.

## **AGRADECIMENTOS**

“Não sou obrigado a vencer mas tenho o dever de ser verdadeiro. Não sou obrigado a ter sucesso mas tenho o dever de corresponder à luz que tenho.”

Abraham Lincoln

## RESUMO

Um Sistema Elétrico de Potência - SEP é uma malha complexa constituída de uma rede de Geração, Transformação, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica e que tem por objetivo se ocupar da operação, controle, manutenção, gerenciamento e demais processos operacionais e utilizações afins dessa energia, produzida setorialmente, através de diferentes processos de transformação, transmitida em alta tensão e distribuída sob as mais diversificadas formas operativas. Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários que exige elevado padrão de competência técnica, sinergia entre as equipes e a definição de diretrizes e estratégias de ação. Diante destes fatos o sistema elétrico de potência esta susceptível a falhas elétricas causadas por diversas razões, falhas essas comumente chamadas de “curto-circuito” ou “faltas” que ocorre na maioria das vezes em linhas de transmissão devido a sua exposição e extensão. O presente trabalho tem a finalidade de resolver o problema de um curto-circuito trifásico que ocorre na barra 2 e um curto-circuito Fase-Terra na barra 4, e com isso obter todas as tensões nodais inerentes a cada barra após a ocorrência da falta. Uma vez reunidas todas as informações necessárias, o trabalho foi concluído com o desenvolvimento de um algoritmo capaz de realizar os cálculos de maneira rápida e eficaz de corrente de curto-circuito utilizando o método das componentes simétricas em sistemas trifásicos em linhas de transmissão após a entrada dos parâmetros da rede a ser analisada.

**Palavras-chave:** Sistema elétrico de potência. Corrente de curto-circuito. Algoritmo.

## **ABSTRACT**

*A Electric Power System - SEP is a complex mesh consists of a Generation Network, Processing, Transmission and Distribution of Electric Energy and aims to engage the operation, control, maintenance, management and other operational processes and related uses this energy produced by sector, through different processing procedures, transmitted at high voltage and distributed under the most diverse operational forms. With size and characteristics indicating that it unique worldwide, the system of production and transmission of electricity in Brazil is a large hydrothermal system, with a strong predominance of hydroelectric plants and multiple owners who require high standard of technical competence, synergy between the teams and the definition of guidelines and strategies. Given these facts, the power electric system is susceptible to electrical failures caused by many reasons, these failures commonly called "short circuit" or "faults" that occurs most often in transmission lines due to their exposure and extension. This work aims to solve the problem of a three-phase short circuit that occurs in bar 2 and a Phase-Earth short circuit in bar 4, and thus get all the nodal tensions inherent in each bar after the fault occurrence. Once all the necessary information, the work was completed with the development of an algorithm to perform calculations quickly and effectively short-circuit current using the method of symmetrical components in three-phase systems in transmission lines after the entry of network parameters to be analyzed.*

*Keywords: Electric power system. Short circuit current. Algorithm.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Sistema de Transmissão-Horizonte 2015 .....	13
Figura 2. Ilustração das etapas de geração, transmissão e distribuição .....	14
Figura 3. Representação unifilar de um sistema de potência .....	14
Figura 4. Representação dos componentes em um SEP .....	14
Figura 5. Diagrama unifilar típico de um SEP .....	15
Figura 6. Triângulo de Potências. ....	17
Figura 7. Efeito corona.....	22
Figura 8. Linha de transmissão curta .....	22
Figura 9. Linha de transmissão média .....	22
Figura 10. Linha de transmissão longa .....	22
Figura 11. Transposição linhas de transmissão .....	24
Figura 12. Tipos de torres de transmissão.....	25
Figura 13. Configurações da relação alumínio-aço nos cabos ACSR .....	26
Figura 14. Propriedades de materiais condutores.....	26
Figura 15. Falta em linhas de transmissão .....	30
Figura 16. Sequência positiva.....	31
Figura 17. Sequência negativa.....	32
Figura 18. Sequência zero .....	32
Figura 19. Fasores desequilibrados.....	32
Figura 20. Fasor .....	34
Figura 21. O Operador “ a ” e suas combinações .....	35
Figura 22. Corrente de curto-circuito simétrica.....	36
Figura 23. Corrente de curto-circuito no domínio do tempo.....	37
Figura 24. Fluxograma do algoritmo .....	39
Figura 25. Fluxograma do algoritmo .....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem de curto-circuito .....	20
Tabela 2 - Modelo de linhas de transmissão .....	22
Tabela 3 - Comparação entre isoladores de Vidro, Porcelana e Polimérico .....	27
Tabela 4 - Causas das interrupções.....	28
Tabela 5 - Origem das interrupções.....	29
Tabela 6 - Duração das interrupções (T minutos) .....	29
Tabela 7 - Interrupções quanto ao tipo de curto-circuito .....	29
Tabela 8 - Interrupções quanto ao tipo de curto-circuito .....	40
Tabela 9 - Interrupções quanto ao tipo de curto-circuito .....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA DO BRASIL .....</b>	<b>13</b>
2.1 Fundamentos de análise de sistemas de potência .....	13
2.2 Valores por unidade .....	15
2.3 Representação de cargas .....	16
2.4 Fator de Potência .....	16
2.5 Potências em sistemas trifásicos.....	17
<b>3 LINHAS DE TRANSMISSÃO .....</b>	<b>20</b>
3.1 Efeito Corona .....	21
3.2 Classificação das linhas de transmissão .....	21
3.3 Parâmetros de uma linha de transmissão.....	23
3.4 Transposição de Linhas de Transmissão.....	23
3.5 Torres de Transmissão de Energia Elétrica .....	24
3.6 Condutores de transmissão de energia elétrica.....	25
3.7 Isoladores.....	27
<b>4 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 Estatísticas das interrupções no SEP.....	28
4.1.1 Causas das Interrupções .....	28
4.2 Finalidade dos cálculos de curto-circuito em SEP .....	29
4.2.1 Definição de falta no SEP.....	30
<b>5 MÉTODO DOS COMPONENTES SIMÉTRICOS .....</b>	<b>31</b>
5.1 Teorema de Fortescue .....	31
5.2 Componentes simétricos de um sistema trifásico .....	31
5.3 Expressão analítica das componentes simétricas .....	33
5.3.1 Equações.....	33
5.3.2 Forma matricial .....	34
5.3.3 Matriz de transformação .....	35
5.4 Redes equilibradas providas de cargas desequilibradas.....	36
5.5 Metodologia matemática .....	36
<b>6 MÉTODOS E MATERIAIS.....</b>	<b>38</b>
6.1 Simulação de faltas nos sistemas de transmissão de energia elétrica .....	38
6.2 Utilização do <i>software</i> Matlab.....	38
6.3 Fluxograma do algoritmo .....	39
6.4 Compilação de dados do algoritmo através do <i>software</i> Matlab.....	40
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A introdução da energia elétrica no Brasil em no cotidiano causou uma mudança de conduta radical e, com a transição da população para ambientes mais urbanos, gerou-se uma crescente necessidade de geração de energia. Suprir uma demanda crescente do mercado tornou-se um desafio, especialmente porque os sistemas elétricos formam redes complexas, interligando-se e apresentando um comportamento que deve ser constantemente monitorado e analisado. Assim, a prevenção e diagnóstico de falhas são aspectos de muita relevância na tarefa de se entregar energia elétrica ininterruptamente. O estudo e cálculo da corrente de curto-circuito é imprescindível para a proteção desses sistemas. (KINDERMANN, 1992)

O curto-circuito é definido pela passagem de corrente elétrica acima do normal em um circuito devido à redução abrupta da impedância da ligação entre dois pontos com potenciais diferentes. Essa ligação pode ser metálica, quando se diz que há um curto-circuito franco, ou por um arco elétrico, que é a situação mais comum. Uma situação intermediária é a dos curtos causados por galhos de árvores ou outros objetos que caem sobre as linhas. Há nesse instante uma rápida elevação da corrente atingindo valores, em geral, muito superiores a corrente nominal do circuito.

Os curtos-circuitos podem ser causados por dois motivos: uma falha da isolação que sustenta a tensão entre condutores ou entre esses condutores e o aterramento; ou por uma redução da distância entre os condutores ou entre os condutores e a terra.

O objetivo básico de um sistema de energia elétrica consiste em fornecer essa energia às várias cargas existentes em uma dada área de serviço. O planejamento da operação, o aperfeiçoamento e a expansão de um sistema de energia elétrica, exigem estudos de fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade.

Em um sistema real é impossível satisfazer totalmente as condições ideais, pois a rede e os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que deterioram de alguma maneira as condições que seriam desejáveis para a operação. Portanto, a utilização de ferramentas matemáticas computacionais torna-se necessário para a correta análise no menor tempo possível para que o sistema seja reestabelecido.

Os estudos de curto-circuito consistem na determinação de correntes para diversos tipos de faltas e em vários pontos do sistema, visando dimensionar corretamente os dispositivos de proteção e equipamentos do sistema.

O curto-circuito é um dos incidentes que mais afetam as redes elétricas, e causa maior preocupação, ocorrendo em pontos aleatórios do sistema. O Brasil possui dimensões

continentais e seu sistema de transmissão é bastante extenso, diante desse cenário, estudos e pesquisas devem ser elaborados com a finalidade de aperfeiçoar técnicas de planejamento, operação e manutenção do sistema. Pela própria natureza do sistema, o setor mais vulnerável à falha é a Linha de Transmissão.

## 2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA DO BRASIL

A Figura 1 mostra um esquema atualizado do sistema brasileiro de transmissão de energia elétrica.

O modelo de transmissão de energia elétrica que prevaleceu na maioria das aplicações é o que faz uso da corrente alternada (CA).

Essa figura foi obtida na página do Operador Nacional do Sistema (ONS).

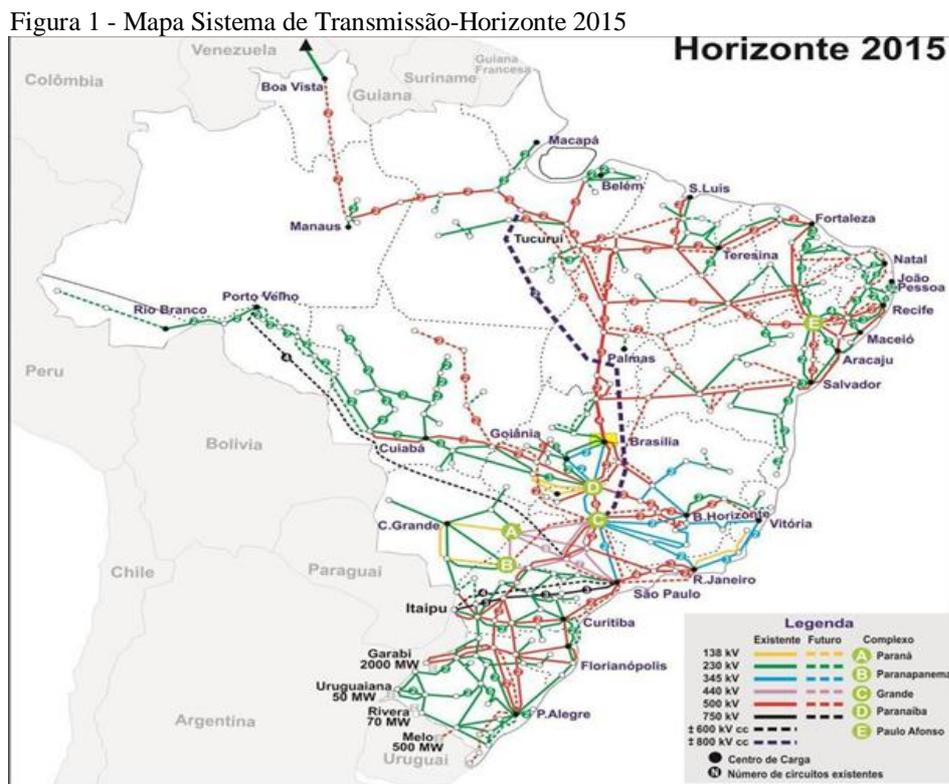


Figura 1 - Mapa Sistema de Transmissão-Horizonte 2015

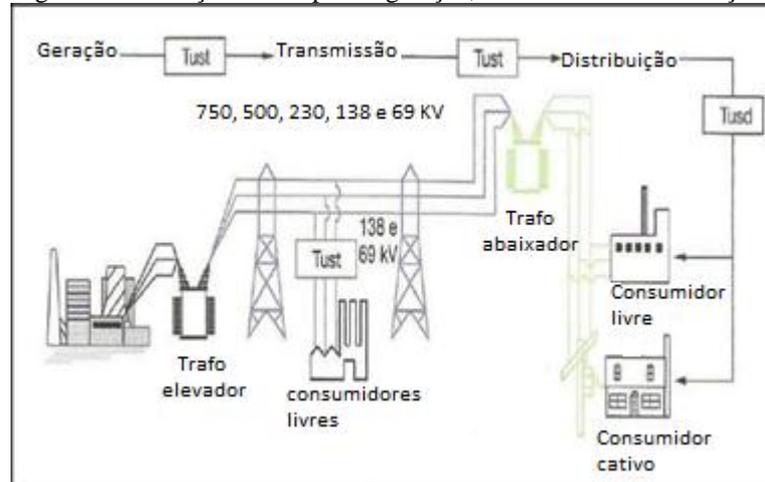
### 2.1 Fundamentos de análise de sistemas de potência

Em todas as instalações elétricas, independentemente de suas condições operativas, ou seja, operação em regime permanente ou em condições transitórias, a análise desse comportamento operacional assume uma importância fundamental e, uma das ferramentas mais poderosas para exercer esta análise, além do bom conhecimento prévio da instalação, é o domínio de algumas das técnicas básicas de Análise de Sistemas de Potência.

Dentro deste contexto, podemos dizer que tais técnicas, de forma generalizada, se estendem desde os procedimentos clássicos da Teoria de Circuitos, até os mais complexos,

que acabam por envolver os cálculos de correntes de curtos-circuitos, fluxos de cargas, limites térmicos e dinâmicos de componentes, estabilidade do sistema, análises harmônicas, etc.

Figura 2 - Ilustração das etapas de geração, transmissão e distribuição



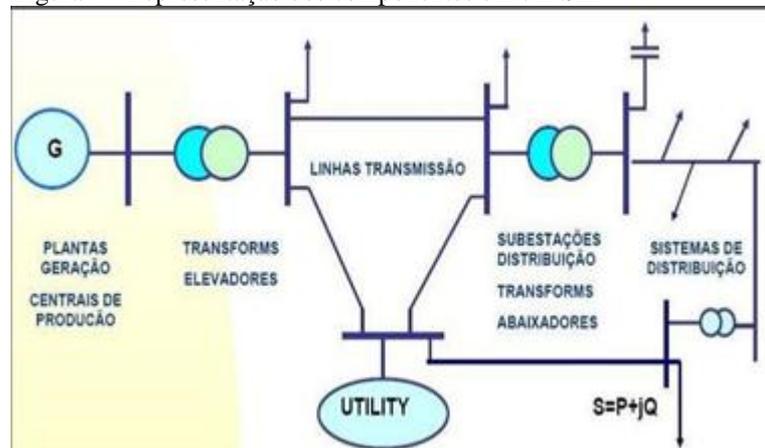
Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.6.

Figura 3 - Representação unifilar de um sistema de potência



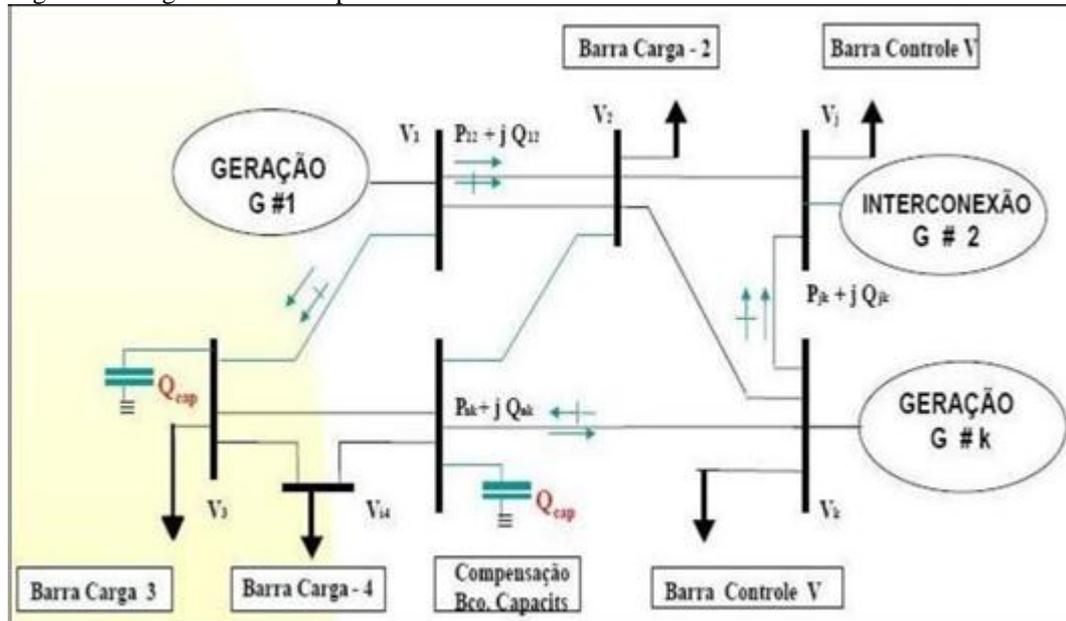
Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.6.

Figura 4 - Representação dos componentes em um SEP



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.7

Figura 5 - Diagrama unifilar típico de um SEP



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.8

## 2.2 Valores por unidade

Em toda análise matemática de redes elétricas, podemos encontrar os parâmetros representativos de seus componentes, ora expressos em valores reais de suas grandezas, tais como, corrente em [A], tensão em [V], potência em [VA], impedância em [ohm], etc., ora em valores unitários ou percentuais, como os que ocorrem notadamente, nas informações sobre alguns parâmetros específicos de máquinas, tais como, as impedâncias subtransitória ou síncrona de geradores, a de curto-circuito de transformadores, a de partida de motores e as representativas dos cabos de transporte e de alimentação de energia dessa rede.

"É comum, em cálculos de sistemas de potência, o uso dos chamados valores em p.u. (por unidade), que é a abreviatura de sistemas por unidade, uma forma de exprimir as grandezas elétricas de modo normalizado, a partir de valores já previamente estabelecidos." (OLIVEIRA, 2013, p.19)

Por definição, tem-se, que o valor por unidade de uma grandeza qualquer "g" e o seu correspondente valor percentual G, são dados pelas equações:

$$G_{pu} = \frac{\text{valor real de uma grandeza}[u]}{\text{valor base dessa grandeza}[u]} \quad (2.1)$$

$$G = g_{pu} \times 100 \% \quad (2.2)$$

### 2.3 Representação de cargas

Este é um problema cujo grau de dificuldade cresce com a complexidade das mesmas.

As cargas são especificadas em termos de potências ativas e reativas variáveis com o tempo, de modo geralmente previsível.

Em regime, a potência aparente absorvida por uma carga depende de sua natureza, podendo variar em função da tensão aplicada aos seus terminais.

$$P_F = f(V_F) \quad (2.3)$$

$$Q_F = \varphi(V_F) \quad (2.4)$$

Os modelos usuais para as cargas, são de:

- a) Impedância constante;
- b) Potência constante com a tensão;
- c) Corrente constante com a tensão;
- d) Uma associação das anteriores.

No processo de inicialização de um sistema elétrico, em CA ou CC, quando ocorre a energização desse, é comum falar-se em transitórios e regime permanente. É entendido como transitório o momento decorrido em um circuito no qual as tensões e correntes se ajustam até atingir o instante de estabilidade, dito aqui como regime permanente.

### 2.4 Fator de Potência

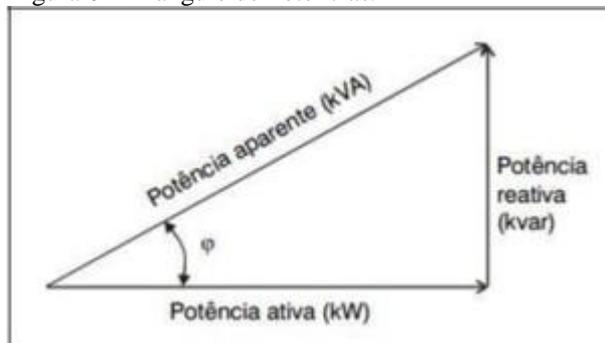
Essa definição foi evoluída com a Resolução No. 456 da ANEEL, sendo que atualmente o valor do fator de potência é considerado como sendo o cosseno do ângulo formado entre a potência ativa total ( $\Sigma P_i$ ) envolvido no sistema considerado, em relação ao valor da potência

aparente total ( $\sum S_i$ ) absorvida por esse sistema, entendendo-se por total, o somatório de todos os valores correspondentes a todas as componentes harmônicas (i) associadas ao processo de medição realizado nessa aplicação.

$$FP = \cos \varphi = \frac{\sum P_h}{\sum S_h} \quad (2.5)$$

$$\text{Fator de potência} = fp = \cos \varphi \quad (2.6)$$

Figura 6 - Triângulo de Potências.



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.44

Na Figura 6 é representado o esquema trigonométrico mostrando um triângulo com a potência ativa P, a potência reativa Q, e a potência aparente S. O ângulo  $\varphi$  entre P e Q é dito como fator de potência.

Há três modos de definirmos o fator de potência:

- a)  $FP = \cos \varphi = \text{ângulo entre } v \text{ e } i$ ;
- b)  $FP = R / Z = \text{resistência} / \text{impedância}$ ;
- c)  $FP = P / S = \text{potência ativa} / \text{potência aparente}$ .

## 2.5 Potências em sistemas trifásicos

Em todos os circuitos elétricos é de fundamental importância conhecer e dominar perfeitamente os conceitos de potências que lhe são associadas.

Esses conceitos se estendem às definições de potência ativa [P], ou seja, aquela parcela que é responsável pela transformação e realização de trabalho útil dentro de um sistema elétrico qualquer.

A potência reativa [Q] é por outro lado, uma forma de potência oscilante entre os elementos reativos da rede ou do circuito, mas que não realiza trabalho útil, sendo, todavia, importantíssima para os devidos controles de tensão da rede.

A soma dessas duas parcelas permite definir a potência total ou aparente [S] do componente considerado, lembrando entretanto, que essa soma é vetorial, ou seja, entre a parcela ativa e a reativa, existe também a presença do operador j, permitindo-se assim, que ela seja escrita da seguinte forma:

$$S = P + jQ = V \cdot I^* \quad (2.7)$$

A essas potência são associados às seguintes unidades, referidas ao sistema internacional de unidades:

- a) P - Potência ativa, [WATT]= [W], [Mw], [KW];
- b) Q - Potência reativa, [VAR]= [KVAR], [MVAR];
- c) S - Potência aparente, [VA]= [KVA], [MVA], [GVA].

Onde, matematicamente, cada parcela destas potência corresponde a:

$$P = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi = 3 \cdot R \cdot I^2 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi [W]; \quad (2.8)$$

$$Q = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \sin \varphi = 3 \cdot X \cdot I^2 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi [VAR]; \quad (2.9)$$

$$S = 3 \cdot V_F \cdot I_F = 3 \cdot Z \cdot I^2 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L [VA]. \quad (2.10)$$

Em geral para sistemas elétricos de potência ou industriais, são utilizadas apenas 4 grandezas fundamentais, a saber:

- a) Potência aparente: [kVA] ou [MVA];
- b) Tensão: [kV] ou [volt];
- c) Corrente: [A] ou [kA];
- d) Impedância: [ohm].

As equações que relacionam essas grandezas, três a três, são duas relações simples, definidas pela Lei de Ohm e pela definição de potência, conforme mostrado no conjunto de equações apresentado abaixo, isto é:

$$a) \text{ Lei de Ohm: } \quad V = Z \cdot I \text{ OU } I = Y \cdot V; \quad (2.11)$$

$$b) \text{ Potência monofásica: } \quad S_{1\phi} = V_F \cdot I_F [KVA \setminus Fase]; \quad (2.12)$$

c) Potência aparente trifásica:  $S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$  [KVA]. (2.13)

### 3 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Constituem as artérias de um sistema de energia. A existência de um sistema de energia de transmissão de alta capacidade e bem desenvolvido, torna técnica e economicamente viável, o transporte de grandes quantidades de energia através de grandes distâncias.

A teoria de operação de Linhas de Transmissão, nos mostra que, as perdas de energia ativa [kW-h], existentes nos processos de transporte de energia elétrica, são diretamente proporcionais ao quadrado da corrente circulante nos cabos de transmissão ( $\epsilon = R.I^2.t$ ) e dependem ainda, das condições de temperatura em que esses condutores se encontram durante o processo da transmissão.

A esses motivos, associam-se às quedas de tensão e a elevação de temperatura que ocorrem nesses cabos condutores, quando submetidos a elevadas correntes circulantes (altas amperagens), impostas pelos grandes blocos de energia a serem transportados entre os centros de produção e os de consumo. Esses fatores fazem com que, se procure transportar esses grandes blocos de energia, sob elevada tensão de transmissão, reduzindo assim, a corrente nos circuitos condutores.

Porém por outro lado, à medida que se processa essa elevação de tensão, o sistema de transmissão propicia um aumento na presença do efeito corona, o que implica num maior controle dessa tensão operativa e do provimento de uma isolação adequada a esse sistema, procurando-se assim estabelecer um equilíbrio entre essa tensão e a corrente circulante, visando minimizar sob os condutores, alguns desses efeitos mencionados (corona, sobreaquecimentos, perdas joule, etc.).

Os elementos das linhas de transmissão, isto é, as ferragens, cabos, estruturas, estão dispostos em série, diminuindo consideravelmente a sua confiabilidade, isto ocorre porque as linhas de transmissão percorrem todo o país de ponta a ponta, passando por diversos lugares com terrenos e climas distintos.

Tabela 1 - Porcentagem de curto-circuito

Setor do sistema elétrico	Porcentagem de curto-circuito
Geração	6%
Subestação	5%
Linhas de transmissão	89%

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.138.

### 3.1 Efeito Corona

O efeito corona é uma descarga elétrica gerada pela ionização do ar nos arredores do condutor, após exceder determinado limite e em condições insuficientes para gerar um arco voltaico. A alta voltagem das linhas de transmissão produz uma descarga (corona) que gera ondas eletromagnéticas. A corona pode se manifestar por meio de um ruído audível, que ocorre em função dos máximos gradientes de potencial na superfície dos condutores.

“O efeito corona é acompanhado por quatro características: ruído sonoro, produção de ozônio, perda de energia e interferência.” (OLIVEIRA, 2013, p.31)

A Figura 7 mostra o efeito corona.

Figura 7 - Efeito corona



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.11.

### 3.2 Classificação das linhas de transmissão

A evolução dos sistemas de energia elétrica não permitiu uma padronização das tensões. Atualmente, o IEC (*International Electrotechnical Commission*) recomenda para tensão nominal/tensão máxima os valores de: 330 a 345/362 kV; 380 a 400/420kV; 500/520 kV; 700/765 kV.

Os níveis das tensões padronizadas no Brasil são:

- a) Transmissão: 750, 500, 345, 230, 138 e 69 kV;
- b) Subtransmissão: 138, 69 e 34,5 kV.

As linhas de transmissão podem ser classificadas em três categorias, indicadas no quadro abaixo:

Tabela 2 - Modelo de linhas de transmissão

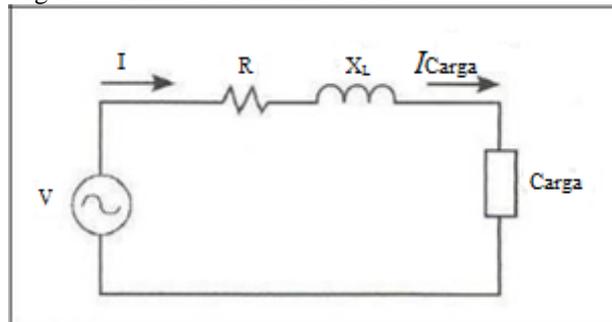
	Curta	Média	Longa
Comprimento	até 80 km	entre 80 km e 240 km	mais de 240 km

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.138.

Representação das linhas de transmissão por um circuito equivalente monofásico.

a) Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta:

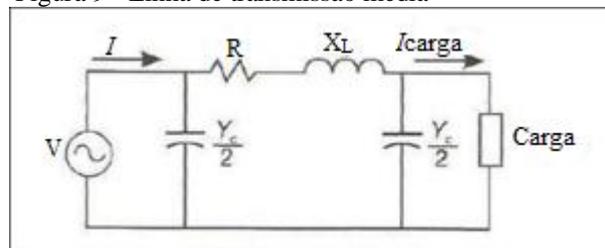
Figura 8 - Linha de transmissão curta



Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.74

b) Circuito equivalente de uma linha de transmissão média:

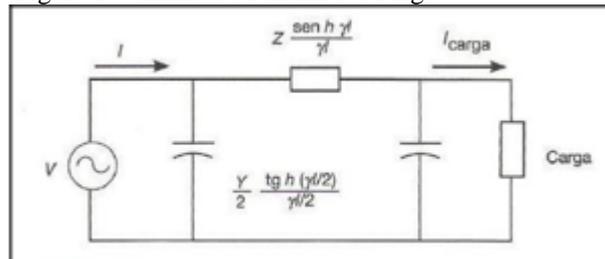
Figura 9 - Linha de transmissão média



Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.74

c) Circuito equivalente de uma linha de transmissão longa:

Figura 10 - Linha de transmissão longa



Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.74

### 3.3 Parâmetros de uma linha de transmissão

Os parâmetros de uma linha de transmissão estão distribuídos ao longo de seu comprimento. Diante dessas características, as tensões e as correntes envolvidas na linha a ser analisada se comportarão como ondas, encontrando soluções matemáticas nas equações diferenciais, que podem ser resolvidas no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Um condutor elétrico de uma linha de transmissão tem quatro parâmetros elétricos, que são combinações de resistência, indutância, capacitância e condutância. Estes parâmetros são distribuídos uniformemente ao longo do comprimento da linha, não sendo possível uma representação independente destas grandezas em qualquer ponto dela.

Como tais parâmetros dependem do comprimento da linha de transmissão, a análise desta deverá ser feita para três situações distintas: para uma linha de transmissão curta, para uma média e para uma longa.

“A resistência (R) e indutância (L) são combinações em série, enquanto que a capacitância (C) e a condutância (G) em combinação shunt. Os parâmetros R, L e C dependem do material usado e das dimensões físicas do condutor. A indutância e a capacitância são produzidas pela presença de campos magnéticos e elétricos em torno dos condutores, dependendo de sua disposição geométrica.” (OLIVEIRA, 2013, p.25)

### 3.4 Transposição de Linhas de Transmissão

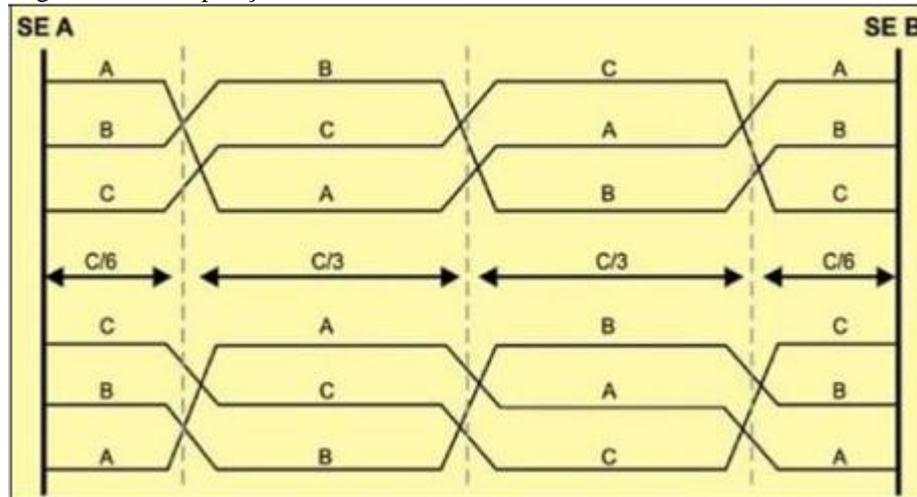
Ao longo do comprimento das linhas de transmissão, os condutores não podem manter sua disposição simétrica, devido a questões de construção. Desse modo, com o espaçamento desigual, a indutância será diferente em cada fase, gerando uma queda de tensão desequilibrada em cada condutor e a um desbalanceamento da linha.

Para ajustar este não balanceamento, as posições dos condutores são modificadas em intervalos regulares ao longo da linha. Essa prática é conhecida por transposição, que se baseia em rotacionar as posições das fases em intervalos, atentando para que cada uma delas percorra todas as posições em uma dada configuração da linha. O objetivo é igualar as impedâncias próprias e mútuas.

O ONS, por meio do Submódulo 2.4 estabelece que “as linhas de transmissão de comprimento igual ou superior a 100 km devem ser transpostas com um ciclo completo de transposição, de preferência com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total”.

A Figura 11 mostra o esquema de transposição de linhas de transmissão.

Figura 11 - Transposição linhas de transmissão



Fonte: ONS, 2013, p.168

### 3.5 Torres de Transmissão de Energia Elétrica

Existem vários tipos de estruturas de apoio para as linhas de transmissão. Há torres de madeira, aço, concreto e alumínio. É possível que uma mesma linha de transmissão possua mais de um tipo de torre.

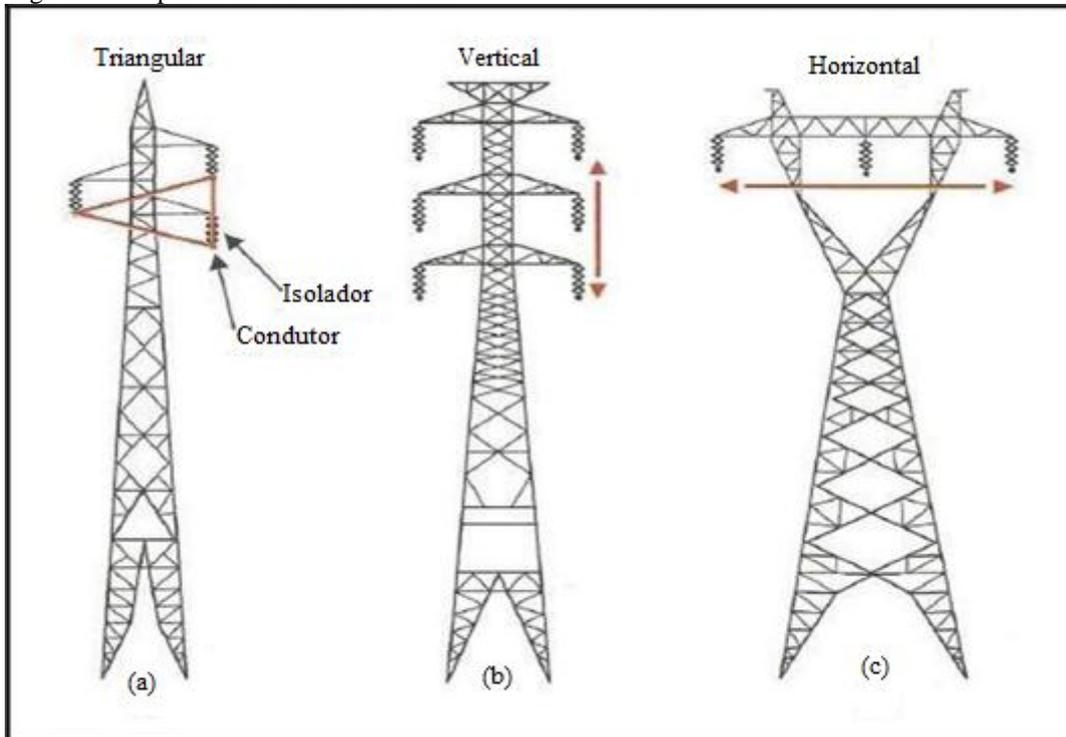
As torres de transmissão podem ser classificadas quanto:

- a) A disposição dos condutores: triangular, vertical e horizontal;
- b) Ao número de circuitos: simples ou duplo.

Os cabos para-raios são colocados acima da torre; trata-se de um condutor aterrado. Em caso de descarga atmosférica, a corrente escoará para o solo por meio do aterramento da torre.

Exemplos de construção, quantidade de circuitos e disposição dos condutores em uma torre de transmissão de energia elétrica.

Figura 12 - Tipos de torres de transmissão



Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.88

### 3.6 Condutores de transmissão de energia elétrica

Os condutores são dispostos em torno de um único condutor central, em camadas sucessivas e enrolados em sentidos contrários, com o objetivo de ter uma melhor fixação. Os materiais mais comumente usados para as linhas aéreas de transmissão são o cobre e o alumínio.

Algumas características dos condutores de uma linha de transmissão devem ser consideradas:

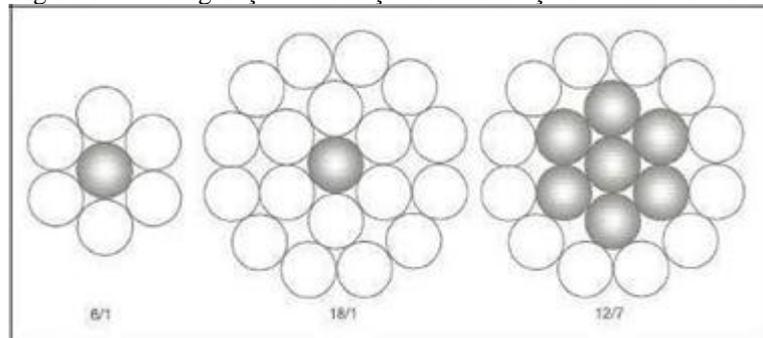
- a) Alta condutibilidade elétrica;
- b) Baixo custo;
- c) Boa resistência mecânica;
- d) Alta resistência à oxidação;
- e) Baixo peso específico.

Por razões econômicas os condutores mais usados em linhas de transmissão são normalmente de alumínio; dentre eles, temos:

- a) CA: condutor de alumínio puro;
- b) AAAC: *all aluminium alloy conductor*, condutor de liga de alumínio;
- c) CAA: condutor de alumínio com alma de aço;
- d) ACAR: *aluminium conductor alloy reinforced*, condutor de alumínio com alma de liga de alumínio.

Exemplos de formação de cabos:

Figura 13 - Configurações da relação alumínio-aço nos cabos ACSR



Fonte: OLIVEIRA, 2014, p.90

Figura 14 - Propriedades de materiais condutores

Especificações	Fio de alumínio duro (1350-H19)	Fio de cobre duro comercial	IACS (Padrão Internacional de Cobre Recozido)	Fio de aço zincado para alma de cabos de alumínio
Massa específica a 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	2,705	8,89	8,89	7,78
Condutividade mínima a 20°C (% IACS)	61,0	97,0	100,0	-
Resistividade máxima a 20°C (Ωmm <sup>2</sup> /m)	0,028264	0,017775	0,017241	-
Relação em peso entre condutores de igual resistência a CC, e igual comprimento	0,50	1,03	1,00	-
Coefficiente de variação da resistência por grau C a 20°C	0,00403	0,00381	0,00393	-
Coefficiente de dilatação linear por grau C	0,000023	0,00001692	0,00001692	0,00001152
Calor específico (cal/g°C)	0,214	-	0,0921	-
Condutividade térmica (cal/cm.s.°C)	0,485	-	0,930	0,150
Módulo de elasticidade fio sólido (kgf/mm <sup>2</sup> )	7.000	12.000	-	20.000

Fonte: Nexans - Catálogo de condutores de alumínio, 2013, p.7

### 3.7 Isoladores

Os isoladores fornecem o necessário isolamento entre os condutores da linha de transmissão e as torres, evitando qualquer corrente de fuga para o solo. Além disso, eles também têm a função de sustentar mecanicamente os cabos.

Geralmente, os isoladores precisam ter as seguintes características:

- a) Alta rigidez mecânica;
- b) Alta resistência elétrica;
- c) Alta permissividade relativa;
- d) Não porosidade e livre de rachaduras.

Em linhas de transmissão aéreas são comumente usados isoladores de porcelana, outros materiais como o vidro, polímero, fibra de vidro e resina epóxi também são utilizados.

O número de isoladores necessários numa cadeia é determinado pelo nível de tensão e pelo comprimento da linha de fuga necessário para que o isolamento seja eficaz.

Comparação entre isoladores de Vidro, Porcelana e Polimérico:

Tabela 3 - Comparação entre isoladores de Vidro, Porcelana e Polimérico

Tensão da linha (kV)	Número de isoladores convencionais por cadeia	Peso da cadeia (kgf.)		Peso médio do Isolador polimérico (kgf.)
		Vidro	Porcelana	
69	5	18,5	33,5	3,0
138	9	33	60	4,7
230	16	61	107	9,8
500	24	91	160	17,5

Fonte: Linhas de transmissão de energia elétrica, 2007

O número de isoladores que forma uma cadeia depende da tensão. Para a tensão de 120 kV usa-se de 6 a 8 isoladores enquanto para linhas de 500 kV são usados de 26 a 32 isoladores. A tensão média por isolador é de 10 kV.

## 4 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Em qualquer análise de circuitos ou redes elétricas, constituídas de elementos considerados como lineares, sabe-se que o manuseio dos Teoremas sobre Circuitos, tais como as aplicações dos Teoremas de Superposição, Thevenin, Norton, além evidentemente, do bom domínio das Leis de Ohm, Kirchhoff e metodologias de análises como os Métodos Nodais e Malhas, assumem uma importância fundamental.

Assim, para as análises de faltas em redes elétricas e cálculo das correntes de curtos-circuitos nessas redes, o Teorema de Thevenin assume uma dessas importâncias básicas e ele é mundialmente nessas aplicações, o mais utilizado pela maioria dos programas (*softwares*) que tratam desse assunto.

Por outro lado, sabe-se também que um curto-circuito numa rede elétrica pode ser interpretado como sendo uma falta nela originada, tal que, o valor da impedância total vista pela fonte equivalente de alimentação dessa rede sofre uma alteração, em geral acompanhada de uma redução em seu valor, a qual pode ser expressiva ou não, caracterizando altas ou baixas correntes de faltas correspondentemente a essa variação sofrida pela impedância.

### 4.1 Estatísticas das interrupções no SEP

#### 4.1.1 Causas das Interrupções

Tabela 4 - Causas das interrupções

Causas	Ocorrências em porcentagem
Fenômenos naturais	48%
Falhas em materiais equipamentos	12%
Falhas humanas	9%
Falhas diversas	9%
Falhas operacionais	8%
Falhas na medição e proteção	4%
Objetos estranhos sobre a rede	4%
Condições ambientais	6%

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.137.28

Tabela 5 - Origem das interrupções

Origem das interrupções	Ocorrências em porcentagem
Linhas de transmissão	68%
Rede de distribuição	10%
Barramento de subestação	7%
Transformador de potência	6%
Gerador	1%
Próprio sistema	4%
Consumidor	4%

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.138

Tabela 6 - Duração das interrupções (T minutos)

Duração (T minutos)	Ocorrências em porcentagem
$1 < T < 3$	57%
$3 < T \leq 15$	21%
$15 < T \leq 30$	6%
$30 < T \leq 60$	4%
$60 < T \leq 120$	3%
$T > 120$	9%

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.140.

Tabela 7 - Interrupções quanto ao tipo de curto-circuito

Tipo de curto-circuito	Ocorrências em porcentagem
Curto-circuito trifásico	8%
Curto-circuito bifásico	14%
Curto-circuito monofásico	78%

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.140.

## 4.2 Finalidade dos cálculos de curto-circuito em SEP

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) deve fornecer energia elétrica aos consumidores sem interrupção e a um custo razoável. Falhas nos equipamentos podem ser destrutivas, causando consideráveis danos, devido a grande quantidade de energia envolvida nos equipamentos do SEP, que são de custos elevados. A reparação de danos oriundos das falhas e defeitos pode ser bastante onerosa, além dos inconvenientes e perdas causadas pela falta de energia elétrica.

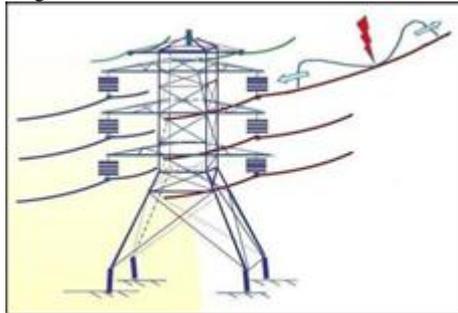
O tipo de Falha elétrica que maior preocupação causa é o “curto-circuito” ou “Falta” como e comumente chamada.

#### 4.2.1 Definição de falta no SEP

Caracterizadas pela perda do meio básico de isolamento do SEP, resultando em um arco voltaico contendo quase sempre potência considerável, pode causar danos formidáveis em tempo muito rápido, colocando o componente afetado fora de serviço por muito tempo. O curto-circuito é a falta mais comum no SEP.

As linhas de transmissão são os elementos mais expostos em um sistema de potência, dados estatísticos apontam que a incidência de faltas nesse trecho é maior do que em outros componentes do sistema. A Figura 15 mostra uma falta em linha de transmissão causada por uma descarga atmosférica.

Figura 15. Falta em linhas de transmissão



Fonte: ROSSI, 2008, p.12

Propósito dos cálculos de curto-circuito:

- a) Determinação do poder de corte de disjuntores e fusíveis: com a previsão da corrente de curto-circuito no ponto de instalação da proteção, tem-se o parâmetro necessário para a calibração do poder de corte destes dispositivos;
- b) Regulação e Coordenação das proteções: a especificação das correntes e tempos de disparo das proteções baseia-se nos valores previstos da corrente de curto-circuito;
- c) Previsão dos esforços térmicos e eletrodinâmicos: todos os elementos da rede, sobretudo barramentos e seccionadores, terão que suportar os efeitos destrutivos da passagem das correntes de curto-circuito;
- d) A proteção pode levar alguns ciclos até abrir o circuito;30
- e) Dimensionamento e ajuste dos diversos componentes de proteção;
- f) Por fim, possibilitar a especificação de para-raios.

## 5 MÉTODO DOS COMPONENTES SIMÉTRICOS

Foi desenvolvido por Charles LeGeyt Fortescue e apresentado em uma reunião do IEEE, em 1918, sob o título " O método dos componentes simétricos na solução de circuitos polifásicos ". Este método se constitui em uma poderosa ferramenta na análise de sistemas desequilibrados, propiciando um meio de estender a análise, por fase, a tais sistemas. É desenvolvido somente o cálculo monofásico, simplificando muito o processo do cálculo das grandezas de falta no SEP.

### 5.1 Teorema de Fortescue

Um sistema desequilibrado de "n" fasores pode ser desmembrado em "n" sistemas de "n" fasores equilibrados chamados de componentes simétricas dos fasores originais.

Sendo que "n" fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento, e os ângulos entre os fasores adjacentes do conjunto são iguais.

Este teorema é válido tanto para fasores de tensão, bem como fasores de corrente.

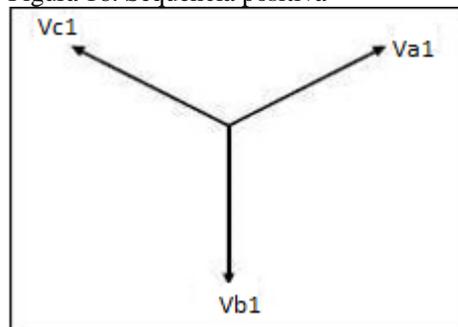
### 5.2 Componentes simétricos de um sistema trifásico

De acordo com o teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados de um sistema trifásico podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores.

Os conjuntos equilibrados, figura 16, 17 e 18, respectivamente são:

- a) Componentes de sequência positiva, constituído por três fasores iguais em módulo, defasados de  $120^\circ$  e tendo sequência de fases dos fasores originais.

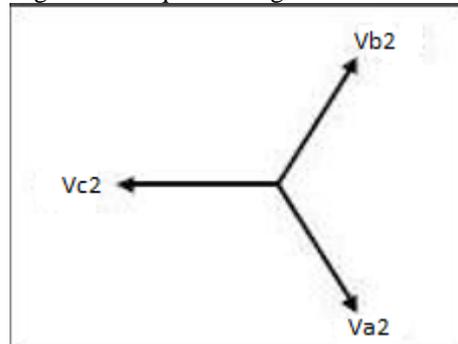
Figura 16. Sequência positiva



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.40

- b) Componentes de seqüência negativa, constituídos por três fasores iguais em módulo, defasados de  $120^\circ$  e tendo seqüência de fases opostas a dos fasores iniciais.

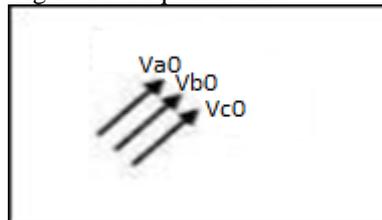
Figura 17. Seqüência negativa



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.40.

- c) Componentes de seqüências zero, constituídos por três fasores iguais em módulo e com defasagem nula entre si.

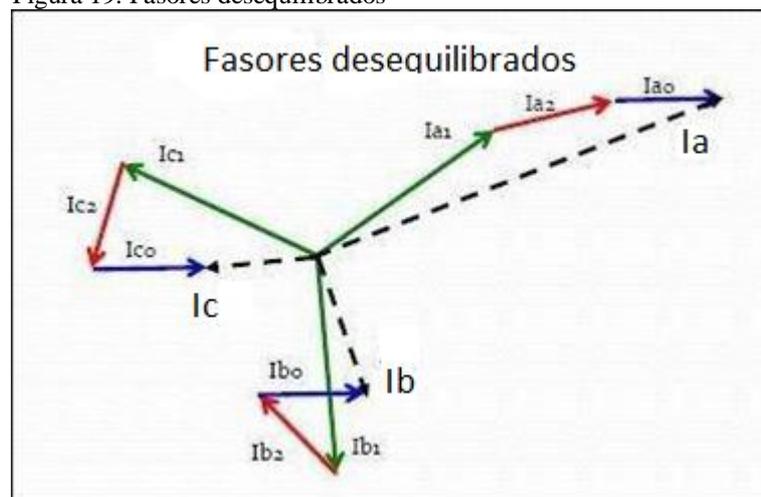
Figura 18. Seqüência zero



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.40.

Na seqüência, a Figura 19, mostra os fasores desequilibrados.

Figura 19. Fasores desequilibrados



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.40

### 5.3 Expressão analítica das componentes simétricas

#### 5.3.1 Equações

$$Va = Va0 + Va1 + Va2 \quad (5.1)$$

$$Vb = Vb0 + Vb1 + Vb2 \quad (5.2)$$

$$Vc = Vc0 + Vc1 + Vc2 \quad (5.3)$$

$$Ia = Ia0 + Ia1 + Ia2 \quad (5.4)$$

$$Ib = Ib0 + Ib1 + Ib2 \quad (5.5)$$

$$Ic = Ic0 + Ic1 + Ic2 \quad (5.6)$$

$$In = Ia + Ib + Ic \quad (5.7)$$

a) Sistema trifásico desequilibrado:

$$Va$$

$$Vb$$

$$Vc$$

b) Sequência Zero:

$$Va0 = Va0$$

$$Vb0 = Va0$$

$$Vc0 = Va0$$

c) Sequência Positiva:

$$Va1 = Va1$$

$$Vb1 = a^2.Va1$$

$$Vc1 = a.Va1$$

d) Sequência Negativa:

$$Va2 = Va2$$

$$Vd2 = a.Va2$$

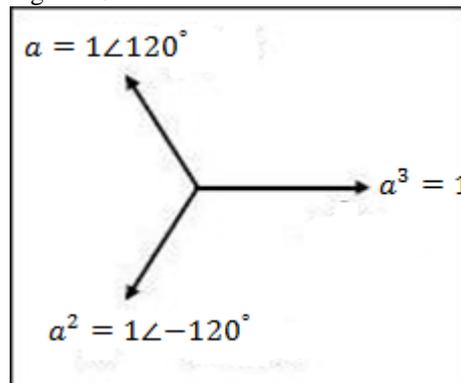
$$Vc2 = a^2.Va2$$

Onde:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

Figura 20. Fasor



Fonte: ROSSI, 2008, p.82

Como os sistemas trifásicos de sequência são equilibrados basta então fazer todo o estudo em relação a uma fase " a ".

$$Va = Va0 + Va1 + Va2 \quad (5.8)$$

$$Vd = Va0 + Vb1 + Vb2 = Va0 + a2.Va1 + a.Va2 \quad (5.9)$$

$$Vc = Va0 + Vc1 + Vc2 = Va0 + a.Va1 + a2.Va2 \quad (5.10)$$

### 5.3.2 Forma matricial

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va0 \\ Vb1 \\ Vc2 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

### 5.3.3 Matriz de transformação

A Matriz [T] é a matriz de transformação das componentes de sequência nos fasores originais, ou de fase, de corrente e tensão.

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

$$[T^{-1}] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

$$\begin{bmatrix} Va0 \\ Va1 \\ Va2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

$$V0 = \frac{Va + Vb + Vc}{3} \quad (5.16)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

$$Vn = Va + Vb + Vc \quad (5.17)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

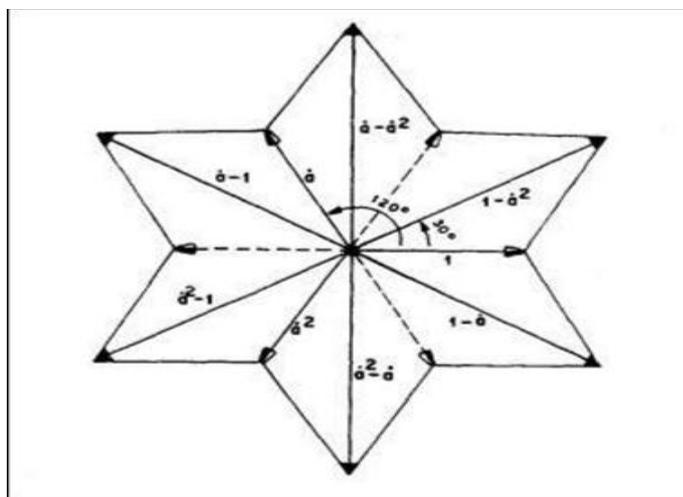
$$Vn = 3 \cdot V0 \quad (5.18)$$

Fonte: KINDERMANN, 1997, p.45.

O Teorema de Fortescue pode ser aplicado aos três fasores de corrente do sistema trifásico desbalanceado, uma vez que as operações das matrizes de transformação T e T\* podem ser aplicadas a qualquer conjunto de fasores 3

O operador “a” é um número complexo com módulo unitário e ângulo de 120°, com a propriedade de girar qualquer fasor de 120° no sentido de giro da velocidade síncrona. A Figura 21 ilustra as possíveis combinações do operador “a”.

Figura 21. O Operador “a” e suas combinações



Fonte: KINDERMANN, 1997, p.207.

#### 5.4 Redes equilibradas providas de cargas desequilibradas

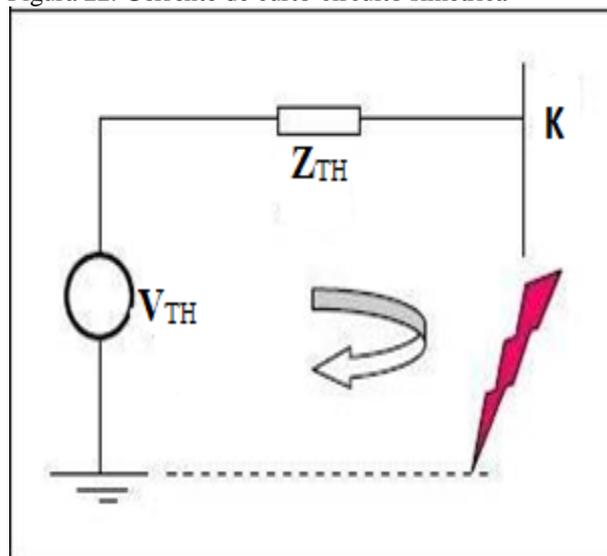
O método geral para análise de tais problemas pode ser resumido nas passagens seguintes:

- a) Isola-se a carga desequilibrada da rede, no ponto;
- b) Representa-se a rede equilibrada pelos equivalentes de Thévenin de seus circuitos sequenciais, vistos no ponto;
- c) Determinam-se as relações de componentes simétricos de tensões e correntes no ponto, via sistema;
- d) Repete-se o procedimento anterior, via carga;
- e) Igualam-se as quantidades obtidas em c e d, obtendo-se os valores de tensões e correntes no referido ponto;
- f) Aplica-se a equação de síntese, visando-se obter as quantidades de fase.

#### 5.5 Metodologia matemática

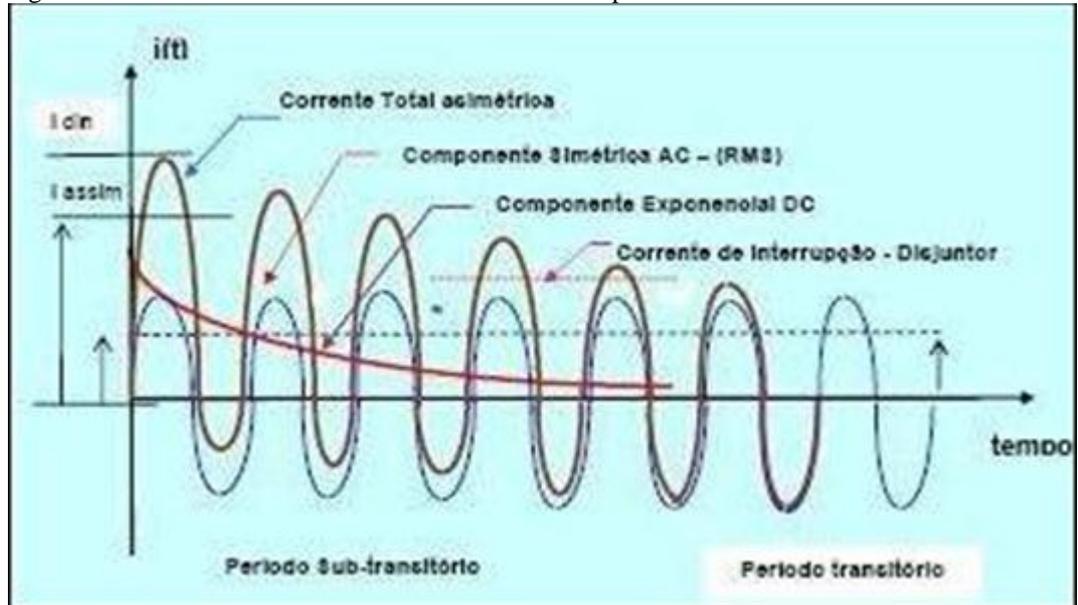
Para se calcular o valor da corrente de curto-circuito trifásico simétrico numa dada barra  $k$  de uma rede qualquer, deveremos fechar a malha de circulação dessa corrente de falta com o referencial de terra do gerador, conforme indicado na Figura 22.

Figura 22. Corrente de curto-circuito simétrica



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.59

Figura 23. Corrente de curto-circuito no domínio do tempo



Fonte: Subestações Elétricas de Alta Tensão, 2008, p.61

Para a determinação desses valores são usados recursos definidos por Normas, as quais estabelecem percentuais da componente exponencial DC presente na corrente total da falta avaliado em cada instante após a ocorrência da falta, através de curvas Normalizadas, representada pela Figura 23.

## 6 MÉTODOS E MATERIAIS

Neste capítulo serão desenvolvidos algoritmos bem como suas simulações e suas análises.

### 6.1 Simulação de faltas nos sistemas de transmissão de energia elétrica

As análises dos processos operacionais desses grandes sistemas elétricos interligados realizados pela ONS, associadas aos modernos procedimentos de sua comercialização provida pelo Mercado Atacadista de Energia e a Câmara de Comércio de Energia Elétrica atual (CCEE), evidentemente, acabaram por envolver sofisticados programas computacionais (“*softwares*”), técnico-operacionais e comerciais, específicos e apropriados para tais fins, os quais utilizam sistemas com grande capacidade de processamento manipuladas através de grandes quantidades de memória (“*hardware*”), face aos grandes bancos e volumes de dados existentes, bem como, devido às complexidades operativas e as diversificações de análises de contingências em que os mesmos estão envolvidos.

A título de curiosidade, sobre a complexidade dessa análise, pode-se facilmente imaginar e até verificar, quando para tais sistemas, se está utilizando vários programas, em suas diferentes versões, envolvendo um ou mais dos clássicos para provimento e processamentos de dados, tais como: SCADA (“*System Control and Data Acquisition*”), EMTP, ATP, ETAP, PECO, ANAREDE, CYME, *POWERWORLD*,

Classificadores e Estimadores de Estados, além de outros desenvolvidos especificamente para tais fins, os quais permitem avaliar e prover análises de despachos econômicos de cargas, análises e avaliações de simultaneidade de contingências, análises de correntes de curtos-circuitos em diferentes barras do sistema, análises de fluxo de carga e de estabilidade operacional do sistema, interfaceamentos de redes CA com sistemas DC, análises de comportamentos transitórios de redes e outras perturbações a mais.

### 6.2 Utilização do *software* Matlab

Uma opção para a investigação de circuitos elétricos é a utilização de métodos matriciais a partir de recursos computacionais, os quais se mostram eficientes para a análise e solução de sistemas elétricos de maior porte. Um ambiente computacional como o *Software* Matlab é capaz de realizar cálculos a partir de linhas de comando ou blocos de funções, assim

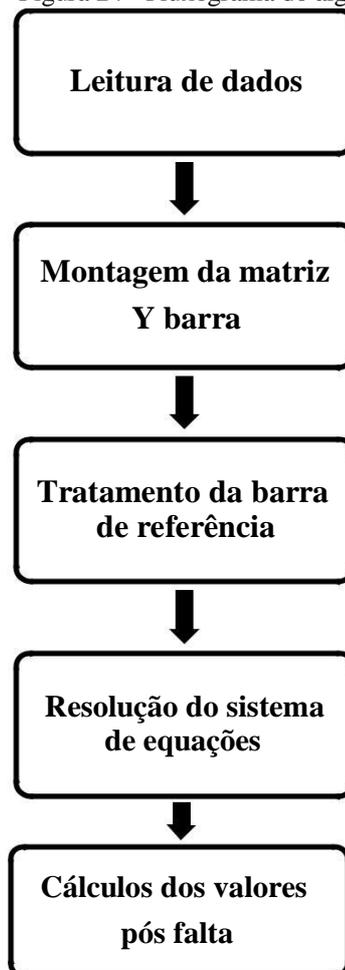
como representações gráficas e numéricas que tornam a análise da resposta de um sistema mais simples, e assim, estendendo a implementação dos mesmos como proposta de ferramenta interativa ao Ensino de Engenharia.

Essa análise atua como uma poderosa ferramenta no processo de avaliação de novas configurações do sistema elétrico para atender o aumento da demanda dentro dos limites da segurança do sistema elétrico. Assim, também se procura configurações dos sistemas elétricos com as menores perdas de operação.

### 6.3 Fluxograma do algoritmo

Fluxograma contendo a lista de instruções algoritmo e sequencia de execução das linhas do programa:

Figura 24 - Fluxograma do algoritmo



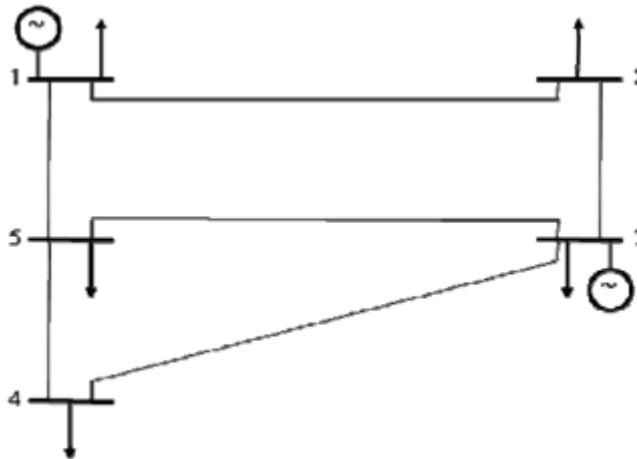
Fonte: o autor.

#### 6.4 Compilação de dados do algoritmo através do *software* Matlab

O presente trabalho tem a finalidade de resolver o problema de um curto-circuito trifásico que ocorre na barra 2 e um curto-circuito Fase-Terra na barra 4, e com isso obter todas as tensões nodais inerentes a cada barra após a ocorrência da falta.

A Figura 25 mostra o diagrama unifilar de um sistema de potência muito simples. Os geradores estão conectados às barras 1 e 3. Nas barras 2, 4 e 5 estão indicadas as cargas. Os valores das bases para o sistema são 100MVA e 138kV. A Tabela 8 lista os valores P, Q e V para cada barra, isto é, fornece os dados referentes às barras do sistema. A Tabela 9 fornece as impedâncias para as seis linhas que estão identificadas no diagrama.

Figura 25 - Fluxograma do algoritmo



Fonte: o autor.

Tabela 8- Dados de barra

Barra	Geração		Carga		V (pu)	$\theta$ (°)	Tipo
	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)			
1	-	-	65	30	1,04	0,00	SW
2	0	0	115	60	1,00	0,00	PQ
3	180	-	70	40	1,02	0,00	PV
4	0	-	70	30	1,00	0,00	PQ
5	0	0	85	40	1,00	0,00	PQ

Tabela 9- Dados de circuitos

Da Barra	Para Barra	Comprimento (km)	R	X	R (pu)	X (pu)	Mvar
1	2	64,4	8	32	0,042	0,168	4,1
1	5	48,3	6	24	0,031	0,126	3,1
2	3	48,3	6	24	0,031	0,126	3,1
3	4	128,7	16	64	0,084	0,336	8,2
3	5	80,5	10	40	0,053	0,210	5,1
4	5	96,5	12	48	0,063	0,252	6,1

Construa um programa computacional para resolver o problema de curto-circuito do sistema elétrico de potência acima (isto é, obter a corrente de falta e as tensões nodais em todas as barras e em todas as fases). Incluir as reatâncias dos geradores e transformadores na matriz admitância, sabendo que as reatâncias subtransitórias dos geradores nas barras 1 e 3 mais as reatâncias dos transformadores que os conecta às barras são iguais a 0,30 pu cada uma, tomando como base os valores nominais 270 e 225 MVA, respectivamente. As relações de transformação dos transformadores são tais que a tensão-base em cada circuito gerador é igual à tensão nominal do transformador. As ligações dos transformadores é Yaterrado-Yaterrado, sem limitador de corrente.

Primeiramente será resolvido o problema do curto-circuito trifásico na barra 2 e posteriormente o problema do curto-circuito Fase-Terra na barra 4.

**Obs:**

- Será considerado uma falta sólida, ou seja, a impedância de falta igual a 0 (zero).
- As correntes pré-falta serão consideradas 0 (zero) e as tensões pré-falta igual a 1(um) pu.
- A falta é considerada trifásica e equilibrada, com isso apenas a seqüência positiva será analisada.
- As reatâncias subtransitórias dos geradores e transformadores conectados nas barras 1 e 3 valem  $j0,111$  e  $j0,133$  (pu) respectivamente.

Com os valores tabelados mais as reatâncias dos transformadores e geradores conectados nas barras 1 e 3, obtém-se a matriz admitância  $[Y_{bus}]$ .

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} -22,898 & 5,952 & 0 & 0 & 7,936 \\ 5,952 & -13,889 & 7,936 & 0 & 0 \\ 0 & 7,936 & -23,193 & 2,976 & 4,762 \\ 0 & 0 & 2,976 & -6,944 & 3,968 \\ 7,936 & 0 & 4,762 & 3,968 & -16,667 \end{bmatrix}$$

Cálculo da matriz  $Z_{bus}$ :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$$

Logo:

$$[Z_{bus}] = \begin{bmatrix} 0,0792 & 0,0557 & 0,0381 & 0,0510 & 0,0607 \\ 0,0557 & 0,1337 & 0,0662 & 0,0629 & 0,0604 \\ 0,0381 & 0,0662 & 0,0874 & 0,0718 & 0,0602 \\ 0,0510 & 0,0629 & 0,0718 & 0,2320 & 0,1000 \\ 0,0607 & 0,0604 & 0,0602 & 0,1000 & 0,1299 \end{bmatrix}$$

Cálculo da corrente de curto na barra 2:

$$I^f = \frac{V_{20}}{Z_{22}} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0,1337} = -j7,4794 \text{ (pu)}.$$

Com o cálculo da corrente de falta trifásica na barra 2, podemos escrever na forma matricial as relações entre tensões, impedâncias e correntes para a falta trifásica:

$$[Vf] = [V_{\text{barra}}^0] + [Z_{\text{barra}}] \cdot [I^f]$$

$$\begin{bmatrix} V1f \\ V2f \\ V3f \\ V4f \\ V5f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,000 \\ 1,000 \\ 1,000 \\ 1,000 \\ 1,000 \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} 0,0792 & 0,0557 & 0,0381 & 0,0510 & 0,0607 \\ 0,0557 & 0,1337 & 0,0662 & 0,0629 & 0,0604 \\ 0,0381 & 0,0662 & 0,0874 & 0,0718 & 0,0602 \\ 0,0510 & 0,0629 & 0,0718 & 0,2320 & 0,1000 \\ 0,0607 & 0,0604 & 0,0602 & 0,1000 & 0,1299 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,0000 \\ -7,4794 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$$

Resolvendo a igualdade temos:

$$\begin{bmatrix} V1f \\ V2f \\ V3f \\ V4f \\ V5f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5837 \\ 0,0000 \\ 0,5039 \\ 0,5288 \\ 0,5492 \end{bmatrix}$$

A matriz  $V_f$  indica as tensões nas barras do sistema após a ocorrência de uma falta trifásica na barra dois.

Foi implementado um algoritmo no *Software MatLab* para resolver o problema em questão. A rotina encontra-se abaixo, juntamente com os resultados obtidos:

- Algoritmo:

```
clear all; clc

% Matriz Ybarra %

Ybus = j*[-22.889 5.952 0 0 7.936
          5.952 -13.889 7.936 0 0
          0 7.936 -23.193 2.976 4.762
          0 0 2.976 -6.944 3.968
          7.936 0 4.762 3.968 -16.667];

disp('***** ENTRADA DE DADOS *****')
disp(' ')

N = input('Número de barras:');
b = input('Curto em qual barra?:');

disp(' ')
```

```

disp(' ')

Vbus0 = ones(N,1); % tensoes pre falta igual a 1 pu
If = zeros(N,1); % correntes pre falta igual a 0
Zbus = inv(Ybus); % matriz Zbus
Ifb = 1.0/(Zbus(b,b)); % corrente de falta
If(b) = -Ifb; % corrente de falta
VT = Zbus*If; % variacao das tensoes
Vf = Vbus0 + VT; % tensoes nas barras pos falta

% resultados %

disp('***** RESULTADOS *****')
disp(' ')
disp(' Corrente na barra de falta (pu):')
[abs(Ifb) angle(Ifb)*180/pi]
disp(' ')
disp(' Tensoes em todas as barras pós falta:')
[abs(Vf) angle(Vf)*180/pi]

```

#### - Resultados:

```
***** ENTRADA DE DADOS *****
```

```
Número de barras:5
Curto em qual barra?:2
```

```
***** RESULTADOS *****
```

```

Corrente na barra de falta (pu):
ans =
    7.4773   -90.0000

Tensoes em todas as barras pós falta:
ans =
    0.5832         0
         0         0
    0.5046         0
    0.5294         0
    0.5480         0

```

Com a solução do curto-circuito trifásico ocorrido na barra 2 concluído, foi desenvolvido um novo programa no *Software MatLab* para a solução do curto Fase-Terra que ocorre na barra 4 do mesmo sistema sob estudo apresentado no início deste trabalho. Segue abaixo o algoritmo implementado juntamente com os resultados obtidos na simulação, ou seja, as correntes nas barras e as tensões nas barras pós falta.

Qualquer falta assimétrica provoca o fluxo de correntes desequilibradas no sistema, por isso o método das componentes simétricas é muito útil na determinação das correntes e tensões em todas as partes do sistema após a ocorrência de uma falta. A partir do uso da matriz de impedância de barras o presente trabalho analisa uma falta assimétrica (fase-terra)

ocorrida na barra 4 do sistema dado. Independente do tipo de falta que ocorra nos terminais de um gerador a equação seguinte pode ser aplicada

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em cada caso a equação acima é usada juntamente com as equações que descrevem as condições da falta para deduzir a corrente  $I_{a1}$  em termos de  $E_a$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_0$ . No caso da falta fase-terra na fase a as condições na falta são as seguintes:

$$I_b=0 \qquad I_c=0 \qquad V_a=0$$

Com  $I_b=0$  e  $I_c=0$  as componentes simétricas da corrente são:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

Como  $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$  a equação (2) fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Fazendo as operações matriciais indicadas obtém-se uma igualdade de duas matrizes coluna como mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_0 I_{a1} \\ E_a - Z_1 I_{a1} \\ -Z_2 I_{a1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pré multiplicando ambos os lados da equação (4) pelo vetor linha  $[1 \ 1 \ 1]$  tem-se:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -Z_0 I_1 + E_a - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} \quad (5)$$

Como  $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$  resolvendo a equação (5) obtém-se  $I_{a1}$  :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (6)$$

$$I_a = 3I_{a1} = I_f$$

A matriz de impedância calculada pelo programa *MATLAB* é:

$$J. \begin{bmatrix} 0,1894 & 0,1592 & -0,0106 & -0,4153 & -0,0234 \\ 0,1592 & 0,4004 & 0,0852 & -0,6597 & -0,1138 \\ -0,0106 & 0,8520 & 0,0783 & -0,2331 & -0,0764 \\ -0,4153 & -0,6597 & -0,2331 & 1,1274 & 0,0081 \\ -0,0234 & -0,1138 & -0,0764 & 0,0081 & 0,0579 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir do elemento  $Z_{44}$  da matriz de impedância (7) calcula-se a corrente de falta  $I_f$  através da equação (6) obtendo :

$$I_f = 0,8868 \text{ pu}$$

As tensões pós falta nas barras é calculada através da equação seguinte:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,1894 & 0,1592 & -0,0106 & -0,4153 & -0,0234 \\ 0,1592 & 0,4004 & 0,0852 & -0,6597 & -0,1138 \\ -0,0106 & 0,8520 & 0,0783 & -0,2331 & -0,0764 \\ -0,4153 & -0,6597 & -0,2331 & 1,1274 & 0,0081 \\ -0,0234 & -0,1138 & -0,0764 & 0,0081 & 0,0579 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,8868 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_1 = 1,3684 \text{ pu}$$

$$V_2 = 1,5851 \text{ pu}$$

$$V_3 = 1,2068 \text{ pu}$$

$$V_4 = 0 \text{ pu}$$

$$V_5 = 0,9928 \text{ pu}$$

Algoritmo para solução do curto-circuito fase-terra na barra 4

```
clear all
clc
```

```

disp('***** ENTRADA DE DADOS *****')
disp(' ')

nb = input('Número de barras:');
n = input('Curto em qual barra?:');

disp(' ')
disp(' ')

zn=0; % impedância de falta igual a 0

% dados das linhas

z(1,5)=i*0.126;
z(1,2)=i*0.168;
z(2,3)=i*0.126;
z(3,4)=i*0.336;
z(3,5)=i*0.210;
z(4,5)=i*0.252;

% impedâncias dos geradores e trafos

zg=[i*0.30*(100/270) 0 i*0.30*(100/225) 0 0];

% tensões pre falta iguais a 1
v=[1 1 1 1 1];

% cargas nas barras
car=[i*0.3 i*0.6 i*0.4 i*0.3 i*0.4];

% cargas no modelo impedância constante
for i=1:nb
    ycarga(i)=conj(car(i))/abs(v(i)^2);
end

% admitâncias das barras
y(1,2)=-1/z(1,2);
y(2,1)=y(1,2);
y(1,5)=-1/z(1,5);
y(5,1)=y(1,5);
y(2,3)=-1/z(2,3);
y(3,2)=y(2,3);
y(3,4)=-1/z(3,4);
y(4,3)=y(3,4);
y(3,5)=-1/z(3,5);
y(5,3)=y(3,5);
y(4,5)=-1/z(4,5);
y(5,4)=y(4,5);

dy=-sum(y,n);

% obtenção da Ybus
for i=1:nb
    if zg(i)~=0
        y(i,i)=dy(i)+ycarga(i)+1/zg(i);
    else

```

```

        y(i,i)=dy(i)+ycarga(i);
    end
end

% matriz Zbus
z=inv(y);

% impedância de thevenin vista da barra de falta
zth=z(n,n);

% correntes de falta
If(1:nb,1)=0;
If(n,1)=v(n)/zth;

% obtenção das tensões pos falta
deltav=z*If;

vf=abs(v'-deltav);

%resultados
disp('*****  RESULTADOS  *****')
disp(' ')
disp(' Corrente na barra de falta (pu):')
If
disp(' ')
disp(' Tensões nas barras pós falta:')
vf

```

Abaixo segue os resultados obtidos com a simulação:

```

*****  ENTRADA DE DADOS  *****

Número de barras:5
Curto em qual barra?:4

*****  RESULTADOS  *****

Corrente na barra de falta (pu):
If =
    0
    0
    0
    0 - 0.8870i
    0

Tensões nas barras pós falta:
vf =
    1.3684
    1.5851
    1.2068
    0
    0.9928
>>

```

## 7 CONCLUSÃO

Após a etapa de levantamento bibliográfico através de pesquisas e estudos teve início a fase de elaboração do algoritmo e conseqüentemente simulações no Matlab. Foram criados vários algoritmos com uma linguagem de programação distinta voltada para efetuar o cálculo de corrente de curto-circuito. No entanto, a estrutura do algoritmo teve como base a utilização de métodos matriciais capazes de realizar cálculos de corrente de curto-circuito simétricos envolvendo as três fases com uma impedância igual em todas as fases e uma segunda opção de cálculo de corrente de curto-circuito quando o valor da impedância é nulo, designado curto franco, ocorridos em linhas de transmissão, uma vez que ficou evidenciada sua alta percentagem de ocorrência com base nos estudos citados neste trabalho e dados estatísticos. O algoritmo possui linhas de comando e blocos de funções para a inserção de dados de entrada característicos do sistema a ser analisado desenvolvendo os cálculos e retornando seus devidos resultados. Uma vez compilado estes resultados e plotados os gráficos, é possível despertar em alunos e demais utilizadores do programa a percepção de realizar uma análise comparativa de resultados de simulações verificando a eficiência do algoritmo com a leitura e interpretação de gráficos e valores encontrados, com os resultados obtidos através de cálculos realizados por meio de uma calculadora gráfica HP 50G, por exemplo, devido à complexidade dos cálculos matriciais, o que tornaria o processo significativamente trabalhoso e demorado e com incidência de erros aumentada.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. J. **P&D no Setor Elétrico Brasileiro: um Estudo de Caso na Companhia Hidro Elétrica de São Paulo**, 2008. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/dissertacao\\_Jose\\_Alvaro.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/dissertacao_Jose_Alvaro.pdf)>. Acesso em: DEZEMBRO, 2013.

**ANEEL - Anexo V.2009.** Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/052/documento/anexo\\_v\\_nt\\_304\\_-\\_submodulos.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/052/documento/anexo_v_nt_304_-_submodulos.pdf)> Acesso em: 24 out. 2015

**AVALIAÇÃO dos Desequilíbrios de Tensão e Transposição, 2013.** Disponível em: <[http://www.ons.org.br/administracao\\_transmissao/padroes\\_desempenho.aspx](http://www.ons.org.br/administracao_transmissao/padroes_desempenho.aspx)> Acesso em: 17 out. 2015

**BIBLIOTECA Digital da Unicamp.** Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/list.php?tid=42&page=2>> Acesso em: 24 out. 2015

CAPELLI, A. **Energia Elétrica Qualidade e Eficiência para Aplicações Industriais.** São Paulo: Érica, 2014.

**CATÁLOGO de Condutores de Alumínio Nu, 2013.** Disponível em: <[http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt\\_BR/navigate\\_306630/Documentos.html](http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/navigate_306630/Documentos.html)> Acesso em: 24 out. 2015

DIB, W. M. **Manual de Engenharia Elétrica.** 2.ed. São Paulo: Nobel, 1984 2. 594p.

**DIRETRIZES para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão, 2014.** Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>> Acesso em: 17 out. 2015

**ESTUDOS de Curto-circuito, 2013.** Disponível em: <[http://www.ons.org.br/operacao/estudos\\_curto\\_circuito.aspx](http://www.ons.org.br/operacao/estudos_curto_circuito.aspx)> Acesso em: 4 nov. 2015

GARCIA, A.; MONTICELLI, A. **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica.** São Paulo, 2011: Editora da Unicamp. 2. ed.

HERMETO, A.E. **Apostila de Análise de Falhas em Sistemas Elétricos,** 2010. Itajubá: FUPAI - Fundação de pesquisa e assessoramento à indústria.

**LINHAS de transmissão de energia elétrica,** 2013. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/>. Acesso em: 10 out. 2015.

MAMEDE FILHO, J. MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.

**MANUAL para correção do Fator de Potência,** 2008. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net>> Acesso em: 9 nov. 2015

**MAPA Sistema de Transmissão, Horizonte, 2015.** Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx)> Acesso em: 10 nov. 2015

**OLIVEIRA, C.C.B.; SCHMIDT, H.P.; Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas.** 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2000.

**OLIVEIRA, M. ENERGIA ELÉTRICA - Geração, Transmissão e Sistemas Interligados.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.

**PERTUBAÇÕES, 2014.** Site do operador nacional do sistema ONS. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/download/biblioteca\\_virtual/relatorios\\_anuais/RA2014\\_ONS/indicadores-de-desempenho-do-sin-em--2014.html](http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/relatorios_anuais/RA2014_ONS/indicadores-de-desempenho-do-sin-em--2014.html)> Acesso em: 10 nov. 2015

**ROSSI, R. Apostila de Subestações Elétricas de Alta Tensão: Minas Gerais: Operação e Manutenção,** 2008. 329p.

**ZANETTA, L. C. Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência.** São Paulo: Livraria da Física Editora, 2006.

**KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

**KINDERMANN, G. Curto-circuito.** 4. Ed. Porto Alegre: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.