

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

Tássia Mantelli Görgen

ANÁLISE DE SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO
Circuito de média tensão 13,8 kV - município de Jataí

Jataí
2014

Tássia Mantelli Görger

ANÁLISE DE SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

Circuito de média tensão 13,8 kV - município de Jataí

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado junto ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Professor orientador: Mestre Marcelo
Semensato

Jataí
2014

Görgen, Tássia Mantelli

GOR/ana Análise de sistema elétrico de distribuição: circuito de média tensão 13,8 kV - município de Jataí / Tássia Mantelli Görgen. - Jataí: IFG - Campus Jataí/ Coordenação dos cursos de Indústria - Engenharia Elétrica, 2014.

Orientador: Prof.º MSc. Marcelo Semensato
Bibliografias: f.45; il.

1. Método de Cespedes. 2. Cálculo de curto-circuito. 3. Coordenação da proteção em média tensão. 4. Sistema elétrico de distribuição - Circuito I de média tensão - 13,8 kV - Jataí-GO . I. Título. II. IFG - Campus Jataí: Coordenação dos cursos de Indústria - Engenharia Elétrica.

CDD 621.32

Tássia Mantelli Görger

ANÁLISE DE SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO
Circuito de média tensão 13,8 kV - município de Jataí

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado pela banca examinadora em
07 de agosto de 2014.

Professor orientador: Mestre Marcelo Semensato
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Professor examinador: Doutor Fernando Silva Pereira
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Professora examinadora: Mestre Aline da Silva Magalhães
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Agradecimentos

Aos meus pais por nunca medirem esforços proporcionando-me as melhores oportunidades.

A minha família pelo amor e incentivo.

Aos meus sinceros amigos, pelo companheirismo de todas as horas, em particular aos meus colegas de graduação por compartilharem comigo horas de estudo e dedicação.

A esta instituição de ensino, seu corpo docente, direção e administração que propiciaram minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, professor Mestre Marcelo Semensato, pelos ensinamentos e por jamais ter desistido de mim.

Aos meus colegas de trabalho, por compartilharem comigo o conhecimento e a experiência profissional. E aos funcionários da CELG, Cláudio, Lélío, Odonil e Valdir, pelo repasse de informações imprescindíveis para a elaboração deste trabalho.

Ao meu namorado, por tem vivenciado comigo a elaboração deste trabalho, pelas cobranças sempre acompanhadas de muito carinho e por acrescentar alegria no meu dia a dia.

“Muito a aprender você ainda tem.”

Mestre Yoda

Resumo

Este trabalho tem por objetivo analisar o sistema elétrico de distribuição: o circuito I de média tensão - 13,8 kV - do município de Jataí. Tendo como ferramentas de simulação os cálculos de fluxo de potência e de correntes de curto-circuito. Serão apresentados os resultados de iterações através do Método de Cespedes para fluxo de potência, para verificação do sistema em condições normais de operação, tornando possível a verificação do dimensionamento dos condutores de acordo com a capacidade de corrente e a queda de tensão. Serão apresentados os resultados das simulações das faltas típicas em pontos estratégicos para verificação do comportamento do sistema em situações de contingência, possibilitando o dimensionamento dos elos fusíveis de acordo com a coordenação da proteção.

Palavras chaves: Método de Cespedes. Cálculo de curto-circuito. Coordenação da proteção em média tensão.

Abstract

This paper has the goal to analyze a Distribution Electric System, most specifically the Circuit I (a medium voltage system of 13.8kV) situated in the city of Jataí. In the possession of simulation tools such, the calculation of the power flow analysis and the calculation of the short circuit current. This work will present some iteration results using the Cespede Method for power flow analysis to verify a normal condition operation status, after that it will be possible to study the dimensioning of the conductors according to their current capacity and voltage drop. This paper will also present some typical fault simulations at strategic points to verify the behavior of the system during a contingency situation allowing the dimensioning of the high voltage fuses according to the protection coordination.

Key words: Cespede Method, Short circuit calculation, Protection coordination for medium voltage.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Três conjuntos de fasores equilibrados que são componentes de três fasores desequilibrados.....	21
Figura 2 – Trecho da rede de distribuição	23
Figura 3 – Fluxograma do método de Cespedes	26
Figura 4 – Curto-circuito monofásico à terra	27
Figura 5 – Circuito equivalente do curto-circuito monofásico à terra.....	28
Figura 6 - Curto-circuito bifásico.....	29
Figura 7 - Circuito equivalente do curto-circuito bifásico	30
Figura 8 - Curto-circuito bifásico à terra	30
Figura 9 - Circuito equivalente do curto-circuito bifásico à terra.....	32
Figura 10 - Curto-circuito trifásico	32
Figura 11 - Circuito equivalente do curto-circuito trifásico.....	33
Figura 12 – Elos fusíveis protegido e protetor	35
Figura 13 – Pontos de cálculo de curto-circuito.....	41
Figura 14 – Pontos de locação de elos fusíveis coordenados.....	43

Lista de tabelas

Tabela 1 - Resistência e reatância dos cabos de alumínio nu	17
Tabela 2 - Coordenação de elos fusíveis tipo <i>K</i>	36
Tabela 3 - Coordenação de elos fusíveis tipo <i>T</i>	36
Tabela 4 - Coordenação de elos fusíveis tipo <i>K</i> e <i>H</i>	37
Tabela 5 - Coordenação de elos fusíveis tipo <i>T</i> e <i>H</i>	37
Tabela 6 - Capacidade de condução de corrente dos cabos de alumínio nu.....	39
Tabela 7 - Dimensionamento de Elos fusíveis	40

Lista de abreviaturas e siglas

A	ampere
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWG	American Wire Gauge
CAA	Cabo de Alumínio com Alma de aço
CELG D	CELG Distribuição S.A. – CELG D
h	hora
kV	quilovolt
kVA	quilovolt-amper
MW	mega-watt
NBI	Nível Básico de Isolamento
NTC	Norma Técnica CELG
NTD	Norma Técnica de Distribuição
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
<i>pu</i>	por unidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
TAP	Terminal de Ajuste de Potencial

Lista de símbolos

α	rotação de 120° no sentido anti-horário;
E_a	tensão pré-falta;
I_{base}	corrente de base para o primário do transformador;
I'_{base}	corrente de base para o secundário do transformador;
I	corrente, em A;
i	corrente, em pu;
I_{a1}	corrente de sequência positiva;
I_{a2}	corrente de sequência negativa;
I_{a0}	corrente de sequência zero;
\bar{I}	corrente no trecho;
I_a	corrente da fase a;
I_b	corrente da fase b;
I_c	corrente da fase c;
I_{cc}	corrente de curto-circuito;
$I_{nom\ elo}$	corrente nominal do elo fusível;
$I_{cc\ \phi 1\ barra\ 00}$	corrente de curto circuito monofásico na barra 00;
P	potência ativa da carga;
P_p	perdas ativa do trecho;
P_q	perdas reativa do trecho;
Q	potência reativa da carga;
r	nó do lado da carga;
R	resistência do trecho;
$R1$	resistência de sequência positiva;
$R2$	resistência de sequência negativa;
$R0$	resistência de sequência zero;

s	nó do lado da fonte;
s	potência, em pu ;
S_{base}	potência de base;
S	potência, em VA;
V_{base}	tensão de base para o primário do transformador;
V'_{base}	tensão de base para o secundário do transformador;
V	tensão, em V;
V_2	tensão obtida nos terminais secundários do transformador, em V;
V_1	tensão aplicada nos terminais primários do transformador, em V;
v	tensão, em pu ;
v_2	tensão obtida nos terminais secundários do transformador, em pu ;
v_1	tensão aplicada nos terminais primários do transformador, em pu ;
V_{NB}	tensão nominal do enrolamento de baixa tensão;
V_{NA}	tensão nominal do enrolamento de alta tensão;
\bar{V}_s	tensão do nó da fonte ($\bar{V}_s = V_s \angle \phi_s$);
\bar{V}_r	tensão do nó da carga ($\bar{V}_r = V_r \angle \phi_r$);
V_a	tensão da fase a;
V_{a1}	tensão da fase a de sequência positiva;
V_{a2}	tensão da fase a de sequência negativa;
V_{a0}	tensão da fase a de sequência zero;
V_b	tensão da fase b;
V_{b1}	tensão da fase b de sequência positiva;
V_{b2}	tensão da fase b de sequência negativa;
V_{b0}	tensão da fase b de sequência zero;
V_c	tensão da fase c;
V_{c1}	tensão da fase c de sequência positiva;

V_{c2}	tensão da fase c de sequência negativa;
V_{c0}	tensão da fase c de sequência zero;
X	reatância do trecho;
X_1	reatância de sequência positiva do trecho;
X_2	reatância de sequência negativa do trecho;
X_0	reatância de sequência zero do trecho;
Z_{base}	impedância de base para o primário do transformador;
Z'_{base}	impedância de base para o secundário do transformador;
Z	impedância, em Ω ;
z	impedância, em pu ;
Z_f	impedância de falta;
Z_1	impedância de sequência positiva;
Z_2	impedância de sequência negativa;
Z_0	impedância de sequência zero.

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1. Objetivos.....	15
1.2. Organização do trabalho	15
2. Apresentação e modelagem do circuito I.....	16
2.1. Caracterização do circuito I	16
2.2. Modelagem do circuito	16
3. Embasamento teórico.....	19
3.1. Sistema por unidade.....	19
3.2. Componentes simétricas	21
3.3. Método de Céspedes	23
3.4. Cálculo de curtos-circuitos típicos	26
3.4.1. Curto-circuito monofásico à terra	27
3.4.2. Curto-circuito bifásico.....	28
3.4.3. Curto-circuito bifásico à terra.....	30
3.4.4. Curto-circuito trifásico.....	32
3.5. Coordenação da proteção	33
4. Apresentação e análise dos resultados	38
4.1. Dimensionamento dos condutores de acordo com a capacidade de corrente e queda de tensão.....	38
4.2. Dimensionamento dos elos fusíveis de acordo com a coordenação da proteção	39
4.2.1. Proteção do primário dos transformadores	39
4.2.2. Proteção dos ramais	40
4.2.3. Proteção do circuito.....	40
5. Conclusão.....	44
Referências	45
Anexo 01	46
Anexo 02	47
Anexo 03	51
Anexo 04	55
Anexo 05	59

1. Introdução

O sistema de distribuição de energia elétrica é parte fundamental do sistema elétrico, pois, é o responsável por entregá-la a grande maioria dos consumidores. Atualmente as distribuidoras têm percebido que suas receitas estão diminuindo e por outro lado, as exigências de qualidade estão aumentando, inclusive acarretando penalidades maiores, o que retoma a importância do planejamento do sistema de distribuição.

Como já é sabido, o planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica tem como objetivo “adequar, ao menor custo, o sistema elétrico e o sistema-suporte de distribuição às futuras solicitações do mercado consumidor, garantindo um suprimento de energia elétrica, com níveis compatíveis com esse mercado” (ELETROBRÁS, v. 01, 1982, p. 17). Sendo assim, o trabalho pretende analisar a atual situação do circuito I de distribuição em média tensão 13,8 kV, do município de Jataí, pertencente ao sistema da distribuidora CELG Distribuição S.A. – CELG D.

1.1. Objetivos

Com o objetivo de avaliar se as metas de qualidade estão sendo atendidas, o circuito em questão será analisado. Será verificada sua real situação nas condições normais de operação e nas situações de contingência. Com base nesta análise formular um planejamento do sistema, visando avaliar suas instalações e identificar alternativas de melhoria do circuito em estudo.

1.2. Organização do trabalho

O trabalho foi organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 1: introdução e objetivos do trabalho;
- Capítulo 2: apresentação e a modelagem do circuito I;
- Capítulo 3: embasamento teórico do trabalho;
- Capítulo 4: apresentação e análise dos resultados, assim como o dimensionamento e alocação dos equipamentos;
- Capítulo 5: conclusão com uma síntese da análise do circuito em questão.

2. Apresentação e modelagem do circuito I

O estudo de caso deste trabalho tem como objeto o circuito I de distribuição de energia em média tensão 13,8 kV da cidade de Jataí. Para início da análise do mesmo, se faz necessário caracterizá-lo. Na sequência será apresentada a modelagem do circuito.

2.1. Caracterização do circuito I

Este circuito é um dos mais antigos em funcionamento, totalmente aéreo, predominantemente urbano e conectado ao Sistema Interligado Nacional - SIN. O trecho do circuito trifásico possui aproximadamente 17 774 metros de extensão. Conta com uma rede tronco de aproximadamente 3 983 metros, utilizando cabo 2/0 AWG CAA, o que representa 22,4% de todo o circuito, sendo que os ramais utilizam cabo 2 AWG ou 4 AWG CAA. Embora construída há muitos anos, a rede apresenta um bom aspecto físico geral, pois, apresenta bom estado de conservação. Apenas se atentando a vida útil de cada material e ao uso de materiais que atualmente possuem seu uso vetado.

Dispõe de aproximadamente 7,9 MW de potência ativa instalada, atendendo mais de 6000 unidades consumidoras. Possui 100 transformadores instalados, destes 07 são monofásicos. Os trifásicos totalizam 82 de propriedade da concessionária e 11 de propriedade particular. Por ser predominantemente urbano e atender principalmente comércios e residências, o fator de demanda (que é expresso pela razão da Demanda média pela Demanda máxima) é considerado alto e se aproxima de 1,00, porém para efeito de cálculo será adotado fator de demanda 0,80. Possui redução no consumo apenas no período das 21:30h até as 6:00h. Para efeito de cálculo o fator de potência é de 0,92.

Vinculada à questão da continuidade do fornecimento de energia, o circuito em questão não possui religadores. De modo que, após a ocorrência da interrupção o tempo para retomar o fornecimento é maior. Embora haja alguns conjuntos de chaves fusíveis, para proteção de ramais, não há certeza do valor da capacidade de interrupção dos elos fusíveis instalados, logo não há coordenação na proteção.

2.2. Modelagem do circuito

Para esta modelagem foram desconsiderados os trechos monofásicos (linhas e barras), por serem de pequena expressão e para considerar o circuito equilibrado.

Através dos dados disponibilizados pela concessionária foi possível fazer a modelagem do circuito. Foi-nos disponibilizada a coordenada geográfica de cada poste, bem como a estrutura de média tensão 13,8kV e a bitola do cabo de alumínio nu com alma de aço. Além das coordenadas das chaves fusíveis e dos transformadores instalados no circuito, assim como a potência de cada transformador.

Todas as coordenadas geográficas foram lançadas no AutoCAD®, e determinado todas as barras do sistema. Sendo uma única barra de referência, referente ao poste imediatamente após a subestação de energia elétrica, e todas as demais barras de carga. Como pode ser conferido no anexo 01.

No circuito 1, foi verificada a utilização de três bitolas distintas, 2/0 AWG predominante na linha tronco do circuito, 2 AWG e 4 AWG para ramais. Através das coordenadas geográficas dos postes obteve-se a distância entre as barras, e através da tabela disponibilizada pelo fabricante de cabos Nexans® obteve-se a resistência, reatância e a susceptância *Shunt* de cada trecho do circuito. Os valores da susceptância *Shunt* foram desprezados nos cálculos da rede por ter valores inexpressivos.

Tabela 1 - Resistência e reatância dos cabos de alumínio nu

Bitola (AWG)	Seção transversal do condutor (mm ²)	Tipo de cabo	Resistência elétrica máxima CA 60Hz 75°C (Ohm/km)	Reatância indutiva (Ohm/km)	Reatância capacitiva (Mohm*km)
2/0	78,6	Quail	0,577	0,4100	0,2469
2	39,3	Sparrow	1,102	0,4362	0,2635
4	24,7	Swan	1,712	0,4537	0,2746

Sendo as três fases do circuito I equilibradas, temos que as impedâncias de sequência positiva e de sequência negativa são iguais. E a impedância de sequência zero, para redes aéreas de 3 condutores, normalmente é da ordem de 2,0 a 3,5 vezes o valor da impedância de sequência positiva e negativa (HAFFNER). Isso acontece porque as correntes de sequência zero estão em fase nos três condutores. Para modelagem deste circuito, será adotada a proporção de $Z_0 = 3 \cdot Z_1 = 3 \cdot Z_2$.

Após a determinação das barras se fez necessário à confecção da matriz de dados para os respectivos cálculos. O anexo 02 traz a matriz dados, onde a primeira coluna corresponde a barra inicial, a segunda coluna a barra final, a terceira e a quarta coluna, que correspondem a potência ativa e reativa, que foram calculadas de acordo com as cargas dos transformadores ligados a rede considerando fator de demanda de 0,80 e fator de potência de 0,92, a quinta e sexta coluna, que correspondem a resistência e reatância do trecho da rede de sequência positiva e negativa, foram calculadas através da impedância do cabo e do comprimento do trecho da rede e a sétima e oitava coluna, que correspondem a resistência e reatância do trecho da rede de sequência zero, que foram calculadas de maneira proporcional a resistência e reatância de sequências positiva e negativa.

O anexo 03 traz a matriz de dados, já calculadas no sistema por unidade, sendo adotados os valores de tensão de base 13,8 kV e de potência de base 2 MVA. A matriz dados possui a nona coluna com os valores iniciais para tensão na barra.

3. Embasamento teórico

3.1. Sistema por unidade

Para facilitar o processamento de dados dos cálculos de redes é interessante trabalhar com grandezas em valores por unidade. “Os valores percentuais e os valores por unidade – também chamados de valores pu – correspondem a uma mudança de escala das grandezas principais em sistemas elétricos: tensão, corrente, potência e impedância” (ROBBA, 2000, p. 106).

Qualquer valor de grandeza será convertido para o sistema por unidade dividindo sua magnitude real pelo valor de base.

$$\text{Grandeza por unidade} = \frac{\text{Grandeza real}}{\text{Valor de base da grandeza}}$$

Sendo que para os valores de base, apenas duas grandezas independentes podem ser escolhidas arbitrariamente, as demais são determinadas pelas relações entre elas (FITZGERALD, 2006, p.104). Assim determinamos os valores de base para tensão e potência, e os valores de base para corrente e impedância são provenientes das relações abaixo:

$$S_{base} = V_{base} \times I_{base} \quad (3.1)$$

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

As principais vantagens de se trabalhar com grandezas com valores por unidade, é a melhor visão geral do problema, além de permitir a resolução de circuitos através de algoritmos computacionais.

O uso de grandezas em pu simplifica muito os cálculos em redes que possuem transformador, pois possibilita que o transformador seja modelado com a relação de espiras 1:1 apenas com a escolha coerente do valor das grandezas de base do primário e do secundário. Para determinar as tensões primária e secundária de um transformador tem-se a seguinte relação:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{V_{NB}}{V_{NA}} \quad (3.3)$$

Onde:

V_2 é a tensão obtida nos terminais secundários do transformador;

V_1 é a tensão aplicada nos terminais primários do transformador;

V_{NB} é a tensão nominal do enrolamento de baixa tensão;

V_{NA} é a tensão nominal do enrolamento de alta tensão.

Para relação de espiras 1:1, temos que a tensão aplicada ao primário em pu seja a mesma tensão secundária em pu , logo:

$$v_1 = v_2 \quad (3.4)$$

Sabendo que:

$$v_1 = \frac{V_1}{V_{base}} \quad (3.5)$$

$$v_2 = \frac{V_2}{V'_{base}} \quad (3.6)$$

Onde:

V_{base} é a tensão de base para o primário do transformador;

V'_{base} é a tensão de base para o secundário do transformador.

Fazendo (3.5) e (3.6) em (3.4), tem-se que:

$$\frac{V_1}{V_{base}} = \frac{V_2}{V'_{base}} \quad (3.7)$$

Fazendo (3.3) em (3.7), tem-se que:

$$\frac{1}{V_{base}} = \frac{V_{NB}}{V'_{base} \cdot V_{NA}} \quad (3.8)$$

Donde:

$$\frac{V_{base}}{V'_{base}} = \frac{V_{NA}}{V_{NB}} \quad (3.9)$$

Tem-se que “se fixarmos os valores de base da tensão no primário e no secundário na relação de espiras do transformador, as tensões primárias e secundárias, em pu , serão iguais” (ROBBA, 2000, p. 117) e por consequência obtém-se a modelagem do transformador como a relação 1:1. E por considerar o transformador como ideal, tem-se que potência de base, em pu , no primário e no secundário serão iguais.

Por consequência, a corrente de base e impedância de base do secundário do transformador decorrem das seguintes relações:

$$I'_{base} = I_{base} \cdot \frac{V_{NA}}{V_{NB}} \quad (3.10)$$

$$Z'_{base} = Z_{base} \cdot \left(\frac{V_{NB}}{V_{NA}}\right)^2 \quad (3.11)$$

Onde:

I'_{base} é a corrente de base para o secundário do transformador;

Z'_{base} é a impedância valor de base para o secundário do transformador.

Quando necessário avaliar a magnitude real da grandeza basta multiplicar seu valor em pu pelo valor de base.

$$S = s \times S_{base} \text{ (VA)} \quad (3.12)$$

$$V = v \times V_{base} \text{ (V)} \quad (3.13)$$

$$I = i \times I_{base} \text{ (A)} \quad (3.14)$$

$$Z = z \times Z_{base} \text{ (\Omega)} \quad (3.15)$$

3.2. Componentes simétricas

Para possibilitar o cálculo de faltas assimétricas em sistema de distribuição de energia elétrica, se faz necessário o uso do método das componentes simétricas. As componentes simétricas são resultado da decomposição de um sistema de n fasores desequilibrados em n sistemas de fasores equilibrados. “Os n fasores de cada conjunto de componentes são iguais em comprimento, e os ângulos entre os fasores adjacentes do conjunto são iguais” (STEVENSON, 1986, p. 295). Assim o sistema elétrico trifásico desequilibrado, pode ser decomposto em três sistemas trifásicos balanceados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero.

Os fasores desequilibrados originais podem ser expressos em termos de seus componentes (STEVENSON, 1986, p. 296):

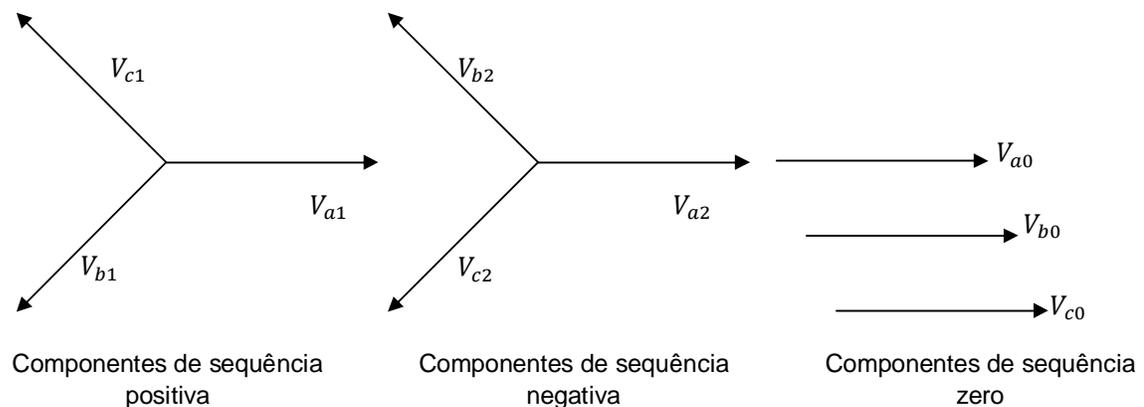


Figura 1 – Três conjuntos de fasores equilibrados que são componentes de três fasores desequilibrados

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.16)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (3.17)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.18)$$

A letra α é usada para designar o operador que causa uma rotação de 120° no sentido anti-horário, equivale a um número complexo de módulo unitário com um ângulo de 120° . Visando reduzir o número de incógnitas no sistema, usa-se o operador α para expressar cada componente de V_b e V_c em função da componente V_a . Surgindo assim as seguintes relações:

$$\begin{aligned} V_{b1} &= \alpha^2 \cdot V_{a1} & V_{c1} &= \alpha \cdot V_{a1} \\ V_{b2} &= \alpha \cdot V_{a2} & V_{c2} &= \alpha^2 \cdot V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Repetindo a equação (3.16) e reescrevendo as equações (3.17) e (3.18) utilizando as relações de (3.19), tem-se:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= \alpha^2 \cdot V_{a1} + \alpha \cdot V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= \alpha \cdot V_{a1} + \alpha^2 \cdot V_{a2} + V_{a0} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Reescrevendo as relações (3.20) na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Para recompor os fasores, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Com base na decomposição de uma sequência V_a em suas componentes simétricas (ROBBA, 2000, p. 197), a sequência para cada sistema é:

- trifásico simétrico : $V_{a0} = V_{a2} = 0$;
- trifásico puro : $V_{a1} \neq 0, V_{a2} \neq 0, V_{a0} = 0$;
- trifásico impuro : $V_{a1} \neq 0, V_{a2} \neq 0, V_{a0} \neq 0$.

3.3. Método de Céspedes

Este método foi publicado em janeiro de 1990 sendo considerado eficiente na resolução de problemas de fluxo de carga em sistemas radiais. Sendo baseado em um circuito elétrico equivalente onde se elimina o ângulo de fase e trabalha-se apenas com as magnitudes de tensão.

Para a modelagem da rede neste método, os trechos da rede são chamados de ramos e nele são expressas a resistência e a reatância do cabo, sendo que a capacitância shunt da rede é considerada insignificante. E cada ramo interliga dois nós, o nó de origem e o nó final, o nó de origem expressa a tensão, e o nó final expressa as cargas da rede de distribuição que por sua vez são representadas pelos componentes ligados e reativos. Como pode ser observado na figura abaixo:

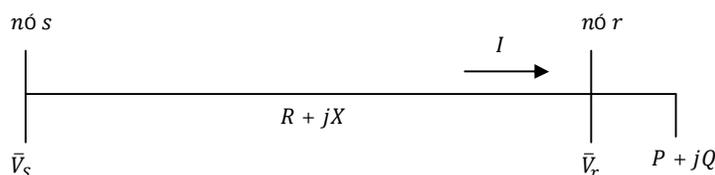


Figura 2 – Trecho da rede de distribuição

Onde:

- s nó do lado da fonte;
- r nó do lado da carga;
- \bar{V}_s tensão do nó da fonte ($\bar{V}_s = V_s \angle \phi_s$);
- \bar{V}_r tensão do nó da carga ($\bar{V}_r = V_r \angle \phi_r$);
- R, X resistência e reatância do trecho;
- P, Q potência ativa e reativa da carga;
- \bar{I} corrente no trecho.

Desse modo,

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r = \bar{I} \cdot (R + jX) \quad (3.23)$$

Porém

$$\bar{I} = \frac{P - jQ}{\bar{V}_r^*} \quad (3.24)$$

Fazendo (3.12) em (3.11), tem-se:

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r = \frac{P - jQ}{\bar{V}_r^*} \cdot (R + jX) \quad (3.25)$$

$$V_s \angle \phi_s - V_r \angle \phi_r = (P - jQ) \cdot (R + jX) \cdot \frac{1}{V_r \angle -\phi_r} \quad (3.26)$$

Multiplicando (3.26) por $V_r \angle -\phi_r$, tem-se:

$$V_s V_r \angle (\phi_s - \phi_r) - V_r^2 = (P - jQ) \cdot (R + jX) \quad (3.27)$$

Reescrevendo (3.27) na forma retangular, tem-se:

$$V_s V_r [\cos(\phi_s - \phi_r) + j \sin(\phi_s - \phi_r)] - V_r^2 = (P - jQ) \cdot (R + jX) \quad (3.28)$$

Desmembrando a equação (3.28) em parte real e parte imaginária e fazendo $(\phi_s - \phi_r) = \theta$, tem-se:

$$V_s V_r \cos \theta - V_r^2 = PR + QX \quad (3.29)$$

$$V_s V_r \sin \theta = PX - QR \quad (3.30)$$

Colocando em evidência $\cos \theta$ na equação (3.29) e $\sin \theta$ na equação (3.30), e elevando ao quadrado, tem-se:

$$\cos^2 \theta = \frac{V_r^4 + 2 \cdot V_r^2 \cdot (PR + QX) + (PR + QX)^2}{(V_s V_r)^2} \quad (3.31)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{(PX - QR)^2}{(V_s V_r)^2} \quad (3.32)$$

Somando as equações (3.31) e (3.32), em seguida multiplicando por $(V_s V_r)^2$ e utilizando recursos da simplificação, tem-se:

$$V_r^4 + [2 \cdot (PR + QX) - V_s^2] \cdot V_r^2 + (P^2 + Q^2) + (R^2 + X^2) = 0 \quad (3.33)$$

A equação (3.33) (CESPEDES, 1990) é a parte fundamental no processo do cálculo do fluxo de potência para sistemas radiais, pois fornece o módulo da tensão no nó carga conhecendo-se a tensão no nó da fonte, a impedância do trecho e a potência no nó da carga.

Para o cálculo da potência equivalente para um determinado nó basta somar todas as potências referentes às cargas e as perdas de potência dos trechos que estão após o nó em questão. Na soma das cargas se inclui a carga do próprio nó. Esse somatório se dá no sentido do nó da carga ao nó da fonte, ou seja, no sentido oposto ao da corrente.

Uma vez calculada a potência equivalente para cada nó da rede, inicia-se o cálculo das tensões através da equação (3.33). Esse cálculo se dá no sentido do nó da fonte ao nó da carga, ou seja, no sentido da corrente. Como o cálculo se dá

tomando-se dois em dois nós, o nó da carga num primeiro cálculo de tensão, torna-se o nó da fonte no segundo cálculo de tensão. E assim segue até o último nó da rede.

Dessa forma temos o seguinte algoritmo para o método de Cespedes para a solução do fluxo de potência:

1. Ler os dados da rede, incluindo parâmetros do trecho, a magnitude da tensão no nó da fonte, e as cargas para a tensão nominal;
2. Assumir uma magnitude de tensão para cada nó para o cálculo da estimativa de carga daquelas que dependem da tensão;
3. Calcular a potência equivalente para cada nó, somando-se cargas e perdas estimadas, em sentido nó carga para nó fonte;
4. Calcular novas magnitudes de tensão para cada nó, utilizando a equação (3.33), em sentido nó fonte para nó carga;
5. Recalcular as perdas com as novas magnitudes de tensão;
6. Verificar se a variação em módulo das perdas recalculadas em relação ao valor anterior é maior do que o erro especificado, retornar ao passo 3, caso a variação seja menor do que o erro deve-se calcular todos os outros resultados necessários, tais como correntes por exemplo.

As perdas ativas e reativas de cada trecho podem ser calculadas através das equações (CESPEDES, 1990):

$$P_p = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.34)$$

$$P_q = X \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3.35)$$

Onde:

P_p e P_q perdas ativa e reativa do trecho;

R e X resistência e reatância do trecho;

P e Q potência ativa e reativa da carga;

V_r módulo da tensão no nó da carga.

A figura 3 mostra o fluxograma do método de Cespedes.

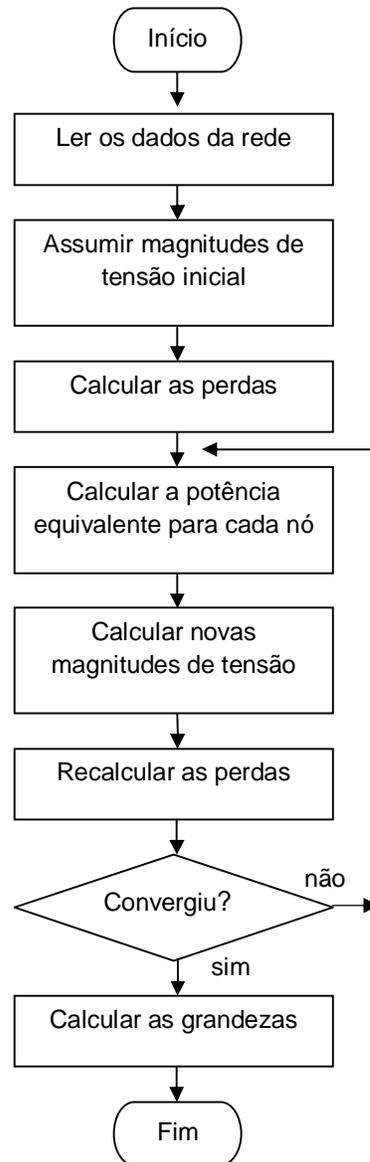


Figura 3 – Fluxograma do método de Cespedes

3.4. Cálculo de curtos-circuitos típicos

As falhas que ocorrem em redes de distribuição geralmente são ocasionadas por descargas atmosféricas, por fatores externos que venham a romper os condutores ou possibilitar o contato entre eles, manobras incorretas ou falha dos equipamentos. Para quantificar as grandezas, será apresentada a modelagem dos curtos-circuitos típicos nos terminais de um gerador síncrono. Esta modelagem se estende ao sistema elétrico de potência, devido ao fato do gerador síncrono ser o único elemento ativo do sistema.

Os curtos-circuitos apresentados são: curto-circuito monofásico à terra, curto-circuito bifásico, curto-circuito bifásico à terra e o curto-circuito trifásico. “Apenas o curto-circuito trifásico é equilibrado, contendo somente componentes de sequência positiva. Os demais curtos-circuitos são desequilibrados, contendo componentes de sequência positiva, negativa e zero.” (KINDERMANN, 1997, p. 117).

Para qualquer tipo de falta pode-se aplicar a seguinte notação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

E juntamente com as equações que descrevem as condições da falta será possível determinar I_{cc} em termos de E_a , Z_1 , Z_2 e Z_0 (STEVENSON, 1986, p. 326). Os curtos-circuitos apresentados serão todos curtos-circuitos francos, ou seja, a impedância de falta é nula.

3.4.1. Curto-circuito monofásico à terra

O circuito esquemático da figura 4 representa um curto-circuito monofásico à terra em um gerador Y com neutro aterrado em vazio, onde o curto-circuito acontece na fase a:

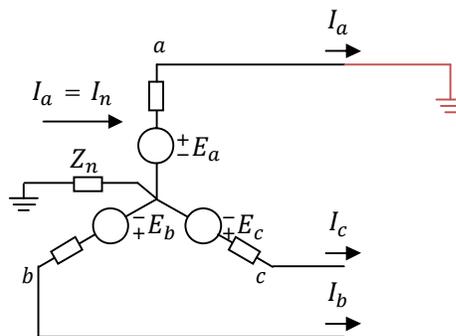


Figura 4 – Curto-circuito monofásico à terra

Temos as seguintes condições da falta:

$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0 \quad (3.37)$$

Sendo $I_b = 0$ e $I_c = 0$, a relação das componentes simétricas de corrente resulta em:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Logo, tem-se que I_{a0} , I_{a1} e I_{a2} são iguais a $I_a/3$ e

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} \quad (3.39)$$

Recrevendo a relação (3.36) utilizando a relação (3.39), tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Efetuada algumas operações matemáticas, tem-se:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -I_{a1} \cdot Z_0 + E_a - I_{a1} \cdot Z_1 - I_{a1} \cdot Z_2 \quad (3.41)$$

Como $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$, resolvemos a equação (3.41) obtém-se:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3.42)$$

Considerando que $I_a = 3 \cdot I_{a1}$, tem-se:

$$I_{cc} = I_a = \frac{3 \cdot E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \text{ para } Z_n = 0 \quad (3.43)$$

Para representar o curto-circuito monofásico à terra, tem-se o seguinte circuito equivalente:

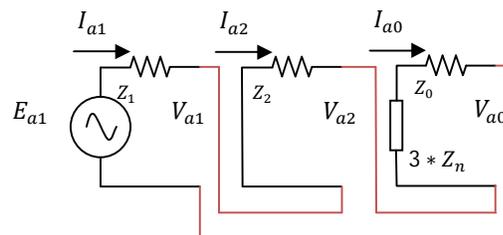


Figura 5 – Circuito equivalente do curto-circuito monofásico à terra

3.4.2. Curto-circuito bifásico

O circuito esquemático da figura 6 representa um curto-circuito bifásico sem aterramento em um gerador Y com neutro aterrado em vazio, onde o curto-circuito acontece nas fases b e c e a fase a é deixada em aberto:

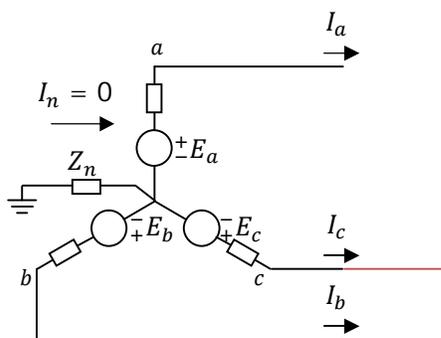


Figura 6 - Curto-circuito bifásico

Temos as seguintes condições da falta:

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c = I_{cc} \quad (3.44)$$

Como $I_c = -I_b$ e $I_a = 0$, a relação das componentes simétricas de corrente resulta em:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Portanto, tem-se que:

$$I_{a0} = 0 \quad (3.46)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(\alpha - \alpha^2)I_b \quad (3.47)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(\alpha^2 - \alpha) - I_b \quad (3.48)$$

As tensões podem ser expressas seguindo a relação:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Considerando uma impedância de falta Z_f , temos que a tensão sobre ela será:

$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b = (\alpha^2 - \alpha) \times (V_{a1} - V_{a2}) \quad (3.50)$$

Fazendo (3.36) na equação acima, tem-se que:

$$Z_f \cdot I_b = (\alpha^2 - \alpha) \times (E_a - Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a2}) \quad (3.51)$$

Sendo $I_{a2} = -I_{a1}$, a relação acima pode ser reescrita como:

$$Z_f \cdot I_b = (\alpha^2 - \alpha) \times (E_a - I_{a1} \times (Z_1 + Z_2)) \quad (3.52)$$

Tem-se ainda a relação $I_b = 3 \cdot I_a / (\alpha - \alpha^2)$, logo, tem-se que:

$$\frac{Z_f \cdot 3 \cdot I_a}{(\alpha - \alpha^2)} = (\alpha^2 - \alpha) \times (E_a - I_{a1} \times (Z_1 + Z_2)) \quad (3.53)$$

Isolando I_{a1} na relação acima, e levando em consideração que $(\alpha - \alpha^2) \times (\alpha^2 - \alpha) = 3$, tem-se:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.54)$$

Fazendo a relação (3.47) na equação acima, teremos a corrente de curto-circuito para fase-fase:

$$I_b = \frac{-j\sqrt{3}E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (3.55)$$

Para representar o curto-circuito bifásico franco, sem impedância de falta, tem-se o seguinte circuito equivalente:

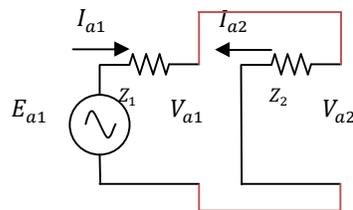


Figura 7 - Circuito equivalente do curto-circuito bifásico

3.4.3. Curto-circuito bifásico à terra

O circuito esquemático da figura 8 representa um curto-circuito bifásico à terra em um gerador Y com neutro aterrado em vazio, onde o curto-circuito acontece nas fases c e b a fase a é deixada em aberto:

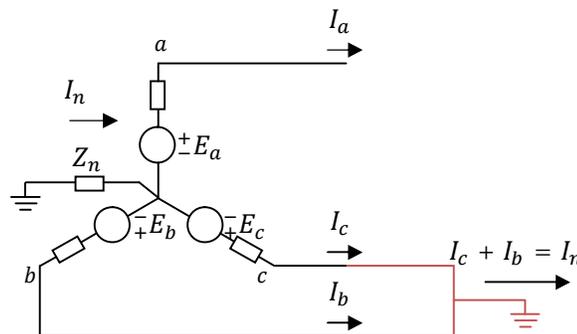


Figura 8 - Curto-circuito bifásico à terra

Temos as seguintes condições da falta:

$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_a = 0 \quad I_{cc} = I_b + I_c \quad (3.56)$$

Sendo $V_b = V_c$, na relação

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Tem-se:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (3.58)$$

Considerando uma impedância de falta Z_f , temos que a tensão V_b será:

$$V_b = Z_f \cdot (I_b + I_c) \quad (3.59)$$

Reescrevendo a relação acima, utilizando as componentes para correntes

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Tem-se:

$$\begin{aligned} V_b &= Z_f(I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2}) \\ V_b &= Z_f \cdot [2 \cdot I_{a0} + (\alpha^2 + \alpha)I_{a1} + (\alpha + \alpha^2)I_{a2}] \quad (3.61) \end{aligned}$$

Se considerarmos $\alpha^2 + \alpha = -1$, tem-se:

$$V_b = Z_f \cdot [2 \cdot I_{a0} - I_{a1} - I_{a2}] \quad (3.62)$$

Sabe-se que $I_a = 0$, e que $I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$, logo:

$$V_b = Z_f \cdot 3 \cdot I_{a0} \quad (3.63)$$

Considerando $V_b = V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2}$, substituindo $V_{a1} = V_{a2}$ tem-se:

$$V_b = V_{a0} + (\alpha^2 - \alpha)V_{a1} \quad (3.64)$$

Logo,

$$V_b = V_{a0} - V_{a1} \quad (3.65)$$

Igualando (3.63) e (3.65), tem-se:

$$Z_f \cdot 3 \cdot I_{a0} = -Z_0 I_{a0} - E_a + Z_1 I_{a1} \quad (3.66)$$

Portanto, tem-se que:

$$I_{a0} = \frac{-E_a + Z_1 I_{a1}}{3 \cdot Z_f + Z_0} \quad (3.67)$$

Comparando, tem-se que:

$$I_{cc} = 3I_{a0} \quad (3.68)$$

Para I_{a1} , considerando $V_{a1} = V_{a2}$, tem-se

$$I_{a2} = \frac{Z_1 I_{a1} - E_a}{Z_2} \quad (3.69)$$

Fazendo (3.67) e (3.69) em $I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$:

$$\frac{-E_a + Z_1 I_{a1}}{3Z_f + Z_0} + I_{a1} + \frac{Z_1 I_{a1} - E_a}{Z_2} = 0 \quad (3.70)$$

Isolando I_{a1} , e utilizando dos recursos de simplificação, tem-se:

$$I_{a1} = \frac{-E_a}{Z_1 + Z_2 / (3Z_f + Z_0)}, \text{ para } Z_N = 0. \quad (3.71)$$

Para representar o curto-circuito bifásico à terra, tem-se o seguinte circuito equivalente:

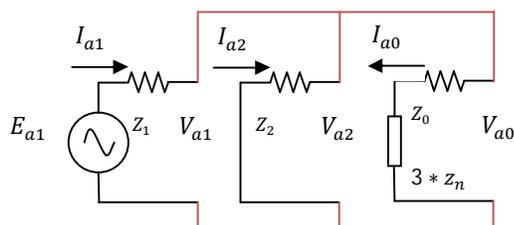


Figura 9 - Circuito equivalente do curto-circuito bifásico à terra

3.4.4. Curto-circuito trifásico

O circuito esquemático da figura 10 representa um curto-circuito trifásico à terra em um gerador Y com neutro aterrado em vazio.

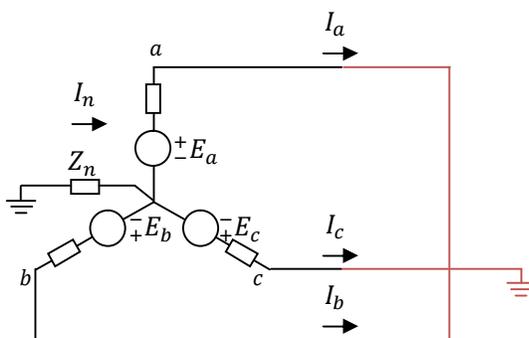


Figura 10 - Curto-circuito trifásico

“Pela própria natureza física dos tipos de curtos-circuitos, o trifásico é o mais raro.” (KINDERMANN, 1997, p. 140). Temos as seguintes condições da falta:

$$V_a = 0 \quad V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad (3.72)$$

Sendo $V_a = 0$, $V_b = 0$ e $V_c = 0$, a relação das componentes simétricas de tensão resulta em:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Portanto, V_{a0} , V_{a1} e V_{a2} são iguais a:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = 0 \quad (3.74)$$

O curto-circuito trifásico é o único considerado simétrico, pois apresenta apenas as componentes de sequência positiva em seu circuito equivalente.

Portanto, tem-se que:

$$I_{cc} = I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (3.75)$$

Para representar o curto-circuito trifásico à terra, tem-se o seguinte circuito equivalente:

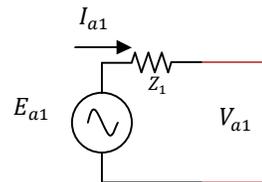


Figura 11 - Circuito equivalente do curto-circuito trifásico

3.5. Coordenação da proteção

Os estudos de proteção em sistemas aéreos de distribuição devem atender o aspecto da zela dos materiais e equipamentos e da melhoria da confiabilidade do sistema vinculadas à racionalização dos custos.

As correntes de curto-circuito trazem efeitos mecânicos e térmicos aos equipamentos do sistema. Os efeitos mecânicos podem deformar condutores e romper materiais isolantes, já os efeitos térmicos podem deteriorar materiais condutores e isolantes. Além destes efeitos, se as correntes de curtos-circuitos não forem interrompidas, em um intervalo de tempo adequado, podem causar danos a pessoas e animais.

Para minimizar os efeitos provenientes das correntes de curto-circuito é comum a alocação de equipamentos de proteção. Um destes equipamentos é a

chave-fusível devido a sua ótima relação custo-benefício e pela facilidade na sua instalação e operação.

O princípio de funcionamento da chave-fusível como equipamento de proteção se dá, conforme Eletrobrás, v. 02 (1982, p. 60):

Por ocasião da circulação de sobrecorrente em uma chave-fusível, devido ao efeito térmico, o elemento fusível se funde, interrompendo o circuito. A alta temperatura do arco provoca a queima e a decomposição parcial do revestimento interno do cartucho, gerando gases que interrompem o arco no instante da corrente nula. A pressão dentro do cartucho aumenta em função dos incrementos de temperatura e a geração dos gases cria condições dentro do tubo que ajudam a desionizar o caminho do arco. A pressão exercida também ajuda a manter a condição de circuito aberto, uma vez que as partículas ionizadas forçam a abertura das extremidades do cartucho, sendo expelidas em seguida.

O uso de chaves fusíveis é condicionado à compatibilização das características elétricas da rede onde será instalada e suas próprias características elétricas. Dentre elas: a tensão nominal e o Nível Básico de Isolamento – NBI deve ser semelhantes as da rede, a corrente nominal da chave ser 50% superior do valor nominal do elo fusível instalado e a capacidade de interrupção da chave ser superior a corrente de curto-circuito máxima da rede no ponto de instalação.

Quando a chave fusível for utilizada para proteção de transformadores de distribuição o elo fusível deve evitar principalmente os efeitos térmicos no momento da corrente de curto-circuito. Para tal é necessário que o elo fusível seja dimensionado para:

- operar em curtos-circuitos no transformador, de forma a isolar essa possível falha da rede primária;
- suportar uma possível sobrecarga do transformador, sem alterar a vida útil;
- fundir em até 17 segundos, quando for submetido a uma corrente de 250% a 300% da corrente nominal do transformador; e
- suportar a corrente transitória de magnetização, estimada em 8 a 12 vezes a corrente nominal do transformador, durante 0,1 segundo.

Quando a chave fusível for utilizada para proteção de ramais o elo fusível deve fundir-se de maneira a isolar o trecho parte do circuito em caso de curto-circuito. Para tal é necessário que a corrente nominal do elo fusível seja:

- igual 125% da corrente de carga do ramal em questão; e

- no máximo igual a $\frac{1}{4}$ da corrente de curto-circuito fase-terra no final do ramal.

A coordenação entre dois elos fusíveis em série é satisfatória quando o tempo total de interrupção do elo fusível protetor for no máximo 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido. A figura abaixo ilustra o conceito de elo fusível protetor e protegido.

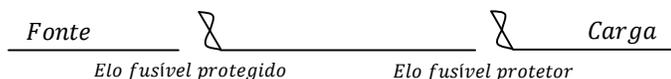


Figura 12 – Elos fusíveis protegido e protetor

O elo fusível protegido deve coordenar com o elo fusível protetor, para o valor da máxima corrente de curto-circuito, no ponto de instalação do elo fusível protetor. E deve coordenar pelo menos com o valor da corrente de curto-circuito fase-terra.

Para ampliar a faixa de coordenação entre os elos fusíveis e reduzir ao mínimo os tipos de elos fusíveis utilizados, deve-se optar sempre que possível por:

- somente elos preferenciais (6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200K);
- somente elos não-preferenciais (8, 12, 20, 30, 50 e 80K).

É prevista uma coordenação satisfatória entre elos fusíveis do tipo *K* até uma corrente igual a 13 vezes a nominal do elo fusível protegido e do tipo *T* até uma corrente igual a 24 vezes a nominal do elo fusível protegido, tanto entre os elos preferenciais adjacentes, como entre elos não-preferenciais adjacentes. Deve-se restringir o uso de elos fusíveis do tipo *H* para proteção de transformadores de distribuição.

Para a coordenação de elos-fusíveis, devem ser utilizadas as tabelas de coordenação abaixo, (ELETROBRÁS, v. 02, p. 78 - 80):

Tabela 4 - Coordenação de elos fusíveis tipo *K* e *H*

Elo fusível protetor	Elo fusível protegido													
	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
1H	125	230	380	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
2H		45	220	450	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
3H		45	220	450	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
5H		45	220	450	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8H		45	220	450	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200

Tabela 5 - Coordenação de elos fusíveis tipo *T* e *H*

Elo fusível protetor	Elo fusível protegido													
	8T	10T	12T	15T	20T	25T	30T	40T	50T	65T	80T	100T	140T	200T
1H	400	520	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
2H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
3H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
5H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200
8H	240	500	710	920	1200	1500	2000	2540	3200	4100	5000	6100	9700	15200

Deve-se atentar-se para o número elevado de elos fusíveis em série, o que pode tornar impraticável a coordenação seletiva do sistema. Para estes casos, deve-se optar por reduzir a quantidade de chaves fusíveis e instalar religadores ou seccionadores.

4. Apresentação e análise dos resultados

As distribuidoras são responsáveis por fornecer um produto e um serviço de qualidade. De acordo com ANEEL - PRODIST, mod. 08 (2012, p. 03), para a qualidade do produto, são considerados à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, e para a qualidade dos serviços, são considerados indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais.

Para este trabalho será apresentado o dimensionamento dos condutores considerando a corrente do circuito I e seu respectivo perfil de tensão, pois se trata de um aspecto da qualidade do produto. E o dimensionamento dos elos fusíveis, visto que a atuação do sistema de proteção influencia diretamente a qualidade dos serviços prestados.

4.1. Dimensionamento dos condutores de acordo com a capacidade de corrente e queda de tensão

Considerando os dados de potência ativa e reativa dos transformadores da rede, considerando fator de demanda de 0,80 e fator de potência de 0,92, e os dados de resistência e reatância equivalente de cada trecho da rede, já apresentados no anexo 03. O anexo 04, traz os valores de tensão e corrente para regime permanente obtidos através do cálculo de fluxo de potência utilizando o método de Céspedes, processados no MatLab®.

Pode-se perceber que o nível de tensão sofre uma variação de 11,01 %, o que é considerado inadequado, visto que a própria concessionária, através da NTD-08, considera o nível de tensão primária admissível entre +5% e -5% com relação a corrente nominal do sistema. Na prática tal variação é suprida pelos ajustes de TAP dos transformadores, tanto da subestação como dos transformadores da rede, onde os transformadores operam fora da tensão nominal.

Considerando que os cabos instalados no circuito I atendem as características estipuladas na tabela 1, da NTC-42 da concessionária local, a capacidade de condução de corrente dos cabos CAA existentes no circuito I é:

Tabela 6 - Capacidade de condução de corrente dos cabos de alumínio nu

Bitola (AWG)	Capacidade de condução de corrente (A)	Tipo de cabo
2/0	275	Quail
2	185	Sparrow
4	140	Swan

Pode-se perceber pelos resultados apresentados no anexo 04 que os cabos do circuito são capazes de conduzir as correntes. Porém, vale lembrar que a média de vida útil dos cabos de alumínio com alma de aço é de cerca de 30 anos, e grande parte do circuito I, principalmente os cabos alimentadores já alcançaram esse tempo de instalação. Logo a deteriorização dos materiais compromete a segurança e o funcionamento das instalações.

4.2. Dimensionamento dos elos fusíveis de acordo com a coordenação da proteção

Para o sistema de proteção do circuito tem-se três situações:

4.2.1. Proteção do primário dos transformadores

Para a proteção do primário de cada transformador é indicado utilizar um conjunto de chaves fusíveis, de forma a isolar o transformador da rede em caso de curto no mesmo. A instalação do conjunto de chaves fusíveis permite ainda a abertura da alimentação do transformador para eventual manutenção.

Os elos fusíveis são instalados de acordo com a tabela 07, como prevê a tabela 03 da NTC-05 da concessionária local.

Tabela 7 - Dimensionamento de Elos fusíveis

Potência (kVA) do transformador trifásico	Elo fusível para rede 13,8kV
15	1H
30	2H
45	2H
75	5H
112,5	6K
150	8K
225	10K
300	12K
500	25K
750	40K
1000	40K
1500	65K
2000	100K

4.2.2. Proteção dos ramais

Para a proteção no início de ramais, onde a probabilidade de interrupções é baixa, é aconselhável utilizar um conjunto de chaves fusíveis. Tais elos são dimensionados através da corrente do ramal. Assim como nos transformadores, o uso de chaves fusíveis possibilita as eventuais manutenções, pois é possível desenergizar apenas o ramal em questão.

4.2.3. Proteção do circuito

Em casos de proteção de alimentadores, onde não há consumidores protegidos a disjuntor de média tensão, o uso de chaves fusíveis é uma opção possível e economicamente viável. A coordenação entre elos fusíveis faz com que uma menor parte do circuito fique desenergizada em caso de alguma falta.

Para este circuito, foram calculados a intensidade de corrente de curtos-circuitos para dois pontos estratégicos do circuito I, nas barras 131 e 91. Pois a coordenação entre elos fusíveis perde sua funcionalidade quando possui mais de três chaves fusíveis em série. O anexo 5 e a imagem 13, trazem os pontos e as respectivas correntes de faltas típicas.

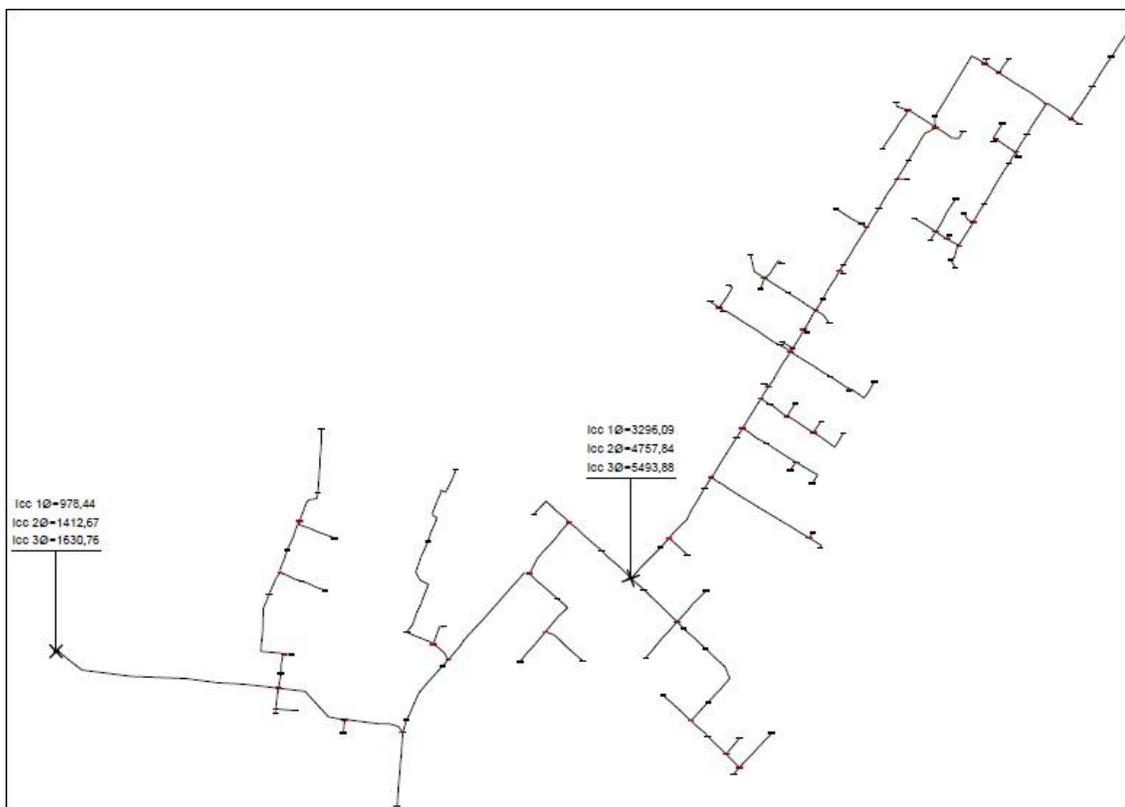


Figura 13 – Pontos de cálculo de curto-circuito

Como pode ser observado, as faltas que foram calculadas nas barras 131 e 91 vão possibilitar o dimensionamento dos elos fusíveis a serem instalados nas barras 91 e 44.

Determinação do elo fusível para a barra 91:

A corrente nominal do elo fusível, deve ser:

1º critério: superior 125% da corrente nominal do circuito I na barra 91;

$$I_{\text{nom elo}} \geq 125\% \cdot I_{\text{nom barra 91}}$$

$$I_{\text{nom elo}} \geq 125\% \cdot 75,89 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom elo}} \geq 94,86 \text{ A}$$

2º critério: inferior a ¼ do valor da menor corrente de curto-circuito na barra 131.

De acordo com o 2º critério:

$$I_{\text{nom elo}} \leq \frac{I_{\text{cc } \phi 1 \text{ barra 131}}}{4}$$

$$I_{\text{nom elo}} \leq \frac{978,44 \text{ A}}{4}$$

$$I_{\text{nom elo}} \leq 244,61 \text{ A}$$

Além deste critério, o elo-fusível da barra 91 deve coordenar com o maior elo dos transformadores a jusante da barra. Neste caso é 40K.

Pelas tabelas de coordenação, apresentadas no capítulo 03, conclui-se que para a barra 91 devem ser adotados elos fusíveis de 100K.

Determinação do elo fusível para a barra 44:

A corrente nominal do elo fusível, deve ser:

1° critério: superior 125% da corrente nominal do circuito I na barra 44;

$$I_{\text{nom elo}} \geq 125\% \cdot I_{\text{nom barra 44}}$$

$$I_{\text{nom elo}} \geq 125\% \cdot 140,05 \text{ A}$$

$$I_{\text{nom elo}} \geq 175,06 \text{ A}$$

2° critério: inferior a ¼ do valor da menor corrente de curto-circuito na barra 91.

De acordo com o 2° critério:

$$I_{\text{nom elo}} \leq \frac{I_{\text{cc } \phi 1 \text{ barra 91}}}{4}$$

$$I_{\text{nom elo}} \leq \frac{3296,09 \text{ A}}{4}$$

$$I_{\text{nom elo}} \leq 824,02 \text{ A}$$

Além deste critério, o elo-fusível da barra 44 deve coordenar com o elo protetor da barra 91. Neste caso é 100K.

Pelas tabelas de coordenação, apresentadas no capítulo 03, conclui-se que para a barra 44 devem ser adotados elos fusíveis de 200K.

Logo, tem-se uma opção para sistema de proteção coordenado para o circuito I. A imagem 14, traz os pontos de locação e os respectivos elos fusíveis.

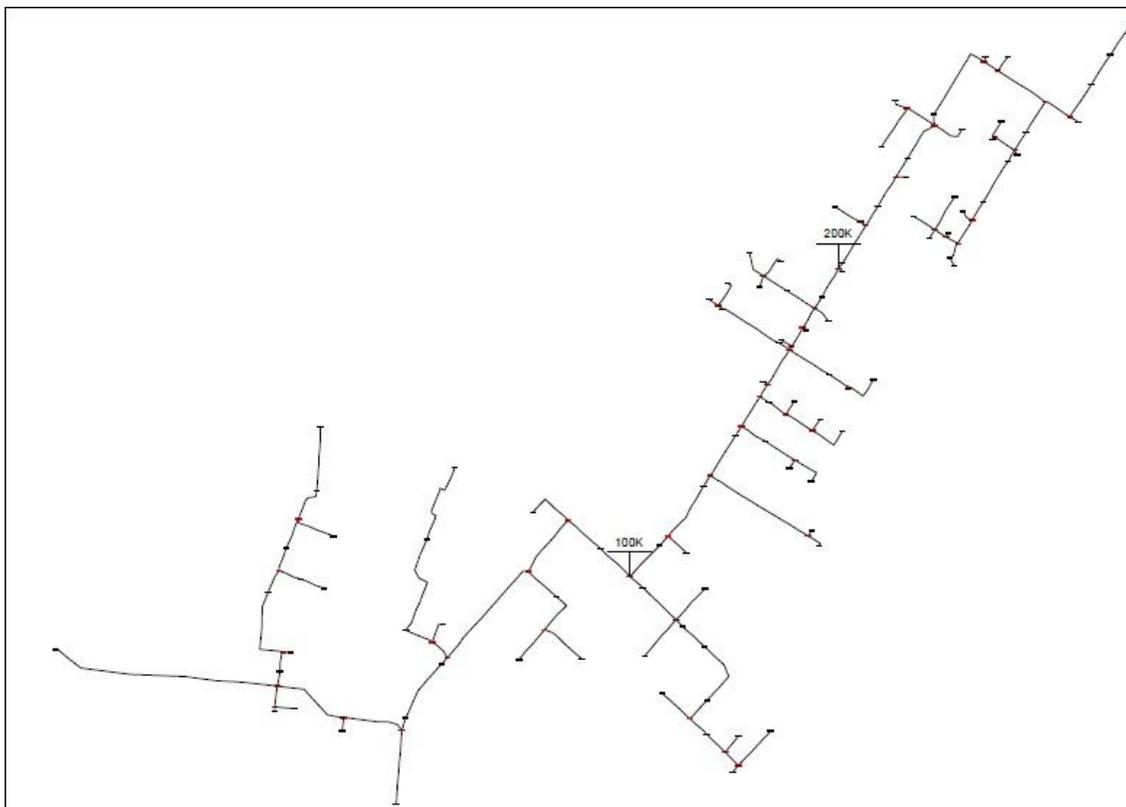


Figura 14 – Pontos de locação de elos fusíveis coordenados

5. Conclusão

No desenvolvimento deste trabalho foi possível analisar o circuito I do município de Jataí. De forma a notar que o mesmo encontra-se numa situação de relativo abandono. Pois, a muitos anos não é objeto de estudo da concessionária, e relatos de manutenção são apenas de reparos e não de melhorias.

Através das ferramentas de simulação foi possível perceber que sua infraestrutura atual apresenta péssimos índices no perfil de tensão apresentado e não possui um sistema de proteção capaz de atuar em caso de faltas.

Mesmo diante de todas essas situações, é um circuito em pleno funcionamento, com poucos registros de reclamações, por consequência da regulação da própria subestação que o alimenta.

As perspectivas são muito ruins, pois embora em pleno funcionamento hoje há perspectivas de um considerável aumento de carga. Este trabalho se conteve em apresentar apenas o mínimo que pode ser feito na atual situação e que poderá ajudar na qualidade do serviço prestado.

A federalização da concessionária traz a expectativas de investimentos, até mesmo para capital aberto já que “é uma empresa que oferece serviços exclusivos e de primeira necessidade em um Estado que está crescendo muito” (PULCINELLI, 2014, p.8). Porém nem a federalização tem data certa para ser concretizada, e enquanto isso os colaboradores da concessionária trabalham para suprir o urgente e inadiável.

Referências

- ANEEL. **Qualidade da Energia Elétrica**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional; mod. 08. Brasília, 2012.
- CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. **NTC-05**: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição. Goiânia, 2012.
- CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. **NTD-08**: Critérios de projetos de redes de distribuição aéreas urbanas – Classes 15 e 36,2 kV. Goiânia, 1996.
- CELG DISTRIBUIÇÃO S.A. **NTC-42**: Cabos Nus de Alumínio com Alma de Aço - Especificação. Goiânia, 2010.
- CESPEDES G., Renato. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Bogota, v. 5, n. 1, p. 391–396. Jan. 1990.
- ELETROBRÁS, Comitê de Distribuição. **Planejamento de sistemas de distribuição**. Coleção Distribuição de energia elétrica; vol. 01. Rio de Janeiro: Campus/Eletróbrás, 1982.
- ELETROBRÁS, Comitê de Distribuição. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Coleção Distribuição de energia elétrica; vol. 02. Rio de Janeiro: Campus/Eletróbrás, 1982.
- FITZGERALD, Arthur E.; KINGSLEY Jr., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**: com introdução a eletrônica de potência. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- HAFFNER, Sérgio. Proteção de sistemas elétricos. Disponível em; <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/haffner/materiais/PSE_aula07_2pag.pdf>. Acesso em: jun. 2014.
- KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito**. 2 ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- NEXANS, **Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço – CAA (Série AWG) ACSR**, Versão 05.06. São Paulo, 201?.
- PULCINELI, Fabiana. Novo acordo busca valorizar ações. **O Popular**, Goiânia, 29 de julho de 2014. Economia. p. 16.
- ROBBA, Ernesto João; et al. **Introdução a sistemas elétricos de potência**: componentes simétricas. 2 ed ver. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- STEVENSON, William D.. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

Anexo 02

Onde:

Bi: barra inicial;

Bf: barra final;

P: potência ativa na barra;

Q: potência reativa na barra;

R1 e R2: resistência de sequência positiva e negativa do trecho;

X1 e X2: reatância de sequência positiva e negativa do trecho;

R0: resistência de sequência zero do trecho;

X0: reatância de sequência zero do trecho.

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0
0	1	82802,41	35266,99	0,084577	0,060098	0,253730	0,180293
1	2	82802,41	35266,99	0,081005	0,057560	0,243015	0,172680
2	3	0,00	0,00	0,088916	0,063181	0,266747	0,189543
3	4	82802,41	35266,99	0,023565	0,016744	0,070694	0,050233
3	5	0,00	0,00	0,066205	0,047043	0,198615	0,141130
5	6	55201,61	23511,33	0,247127	0,065492	0,741382	0,196475
6	7	0,00	0,00	0,141120	0,037398	0,423360	0,112195
7	8	33120,96	14106,80	0,033572	0,008897	0,100717	0,026691
7	9	0,00	0,00	0,163856	0,043424	0,491567	0,130271
9	10	110403,22	47022,65	0,021931	0,005812	0,065792	0,017436
9	11	33120,96	14106,80	0,131636	0,034885	0,394907	0,104655
7	12	55201,61	23511,33	0,088819	0,023538	0,266456	0,070614
12	13	82802,41	35266,99	0,322729	0,085527	0,968187	0,256581
13	14	0,00	0,00	0,147746	0,039154	0,443237	0,117463
14	15	110403,22	47022,65	0,059486	0,023546	0,178458	0,070638
14	16	0,00	0,00	0,186762	0,049494	0,560286	0,148482
16	17	82802,41	35266,99	0,117803	0,031219	0,353408	0,093657
17	18	55201,61	23511,33	0,059030	0,015644	0,177089	0,046931
16	19	0,00	0,00	0,060290	0,023865	0,180871	0,071594
19	20	22080,64	9404,53	0,029104	0,007713	0,087312	0,023139
19	21	0,00	0,00	0,057866	0,022905	0,173598	0,068715
21	22	55201,61	23511,33	0,068189	0,018071	0,204567	0,054213
21	23	82802,41	35266,99	0,110035	0,043555	0,330104	0,130664
21	24	55201,61	23511,33	0,259573	0,068790	0,778720	0,206370
5	25	0,00	0,00	0,129975	0,092357	0,389925	0,277070
25	26	55201,61	23511,33	0,114721	0,030402	0,344163	0,091207
25	27	0,00	0,00	0,037534	0,026671	0,112602	0,080012
27	28	55201,61	23511,33	0,032922	0,008725	0,098765	0,026174
27	29	55201,61	23511,33	0,199677	0,141885	0,599030	0,425654
29	30	0,00	0,00	0,025763	0,018307	0,077289	0,054920
30	31	55201,61	23511,33	0,231154	0,061259	0,693463	0,183776
30	32	0,00	0,00	0,224255	0,059430	0,672765	0,178290
32	33	55201,61	23511,33	0,108421	0,028733	0,325263	0,086198
32	34	82802,41	35266,99	0,311687	0,082601	0,935060	0,247802
30	35	55201,61	23511,33	0,101165	0,071885	0,303496	0,215656

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0
35	36	0,00	0,00	0,050580	0,035941	0,151739	0,107822
36	37	55201,61	23511,33	0,046284	0,018320	0,138852	0,054961
36	38	55201,61	23511,33	0,079361	0,056391	0,238082	0,169174
38	39	0,00	0,00	0,051347	0,036486	0,154042	0,109458
39	40	0,00	0,00	0,051874	0,013747	0,155621	0,041241
40	41	55201,61	23511,33	0,013867	0,003675	0,041602	0,011025
40	42	82802,41	35266,99	0,193285	0,051223	0,579854	0,153668
39	43	55201,61	23511,33	0,103179	0,073316	0,309537	0,219949
43	44	0,00	0,00	0,014085	0,010008	0,042254	0,030024
44	45	33120,96	14106,80	0,031843	0,008439	0,095530	0,025316
44	46	55201,61	23511,33	0,075852	0,053899	0,227557	0,161696
46	47	0,00	0,00	0,030754	0,021853	0,092262	0,065559
47	48	55201,61	23511,33	0,131259	0,034785	0,393777	0,104356
47	49	33120,96	14106,80	0,222680	0,059013	0,668040	0,177038
49	50	0,00	0,00	0,189108	0,050116	0,567323	0,150347
50	51	33120,96	14106,80	0,077964	0,020661	0,233893	0,061984
50	52	55201,61	23511,33	0,198626	0,052638	0,595879	0,157915
50	53	110403,22	47022,65	0,118046	0,046726	0,354139	0,140177
47	54	0,00	0,00	0,052386	0,037224	0,157157	0,111672
54	55	220806,43	94045,31	0,029155	0,007727	0,087466	0,023180
54	56	0,00	0,00	0,050095	0,035596	0,150285	0,106789
56	57	82802,41	35266,99	0,081303	0,021546	0,243909	0,064639
56	58	0,00	0,00	0,008897	0,006322	0,026692	0,018967
58	59	55201,61	23511,33	0,055409	0,021932	0,166226	0,065796
59	60	82802,41	35266,99	0,287886	0,113953	0,863659	0,341859
60	61	0,00	0,00	0,025368	0,010041	0,076104	0,030124
61	62	55201,61	23511,33	0,045865	0,018155	0,137596	0,054464
61	63	110403,22	47022,65	0,124537	0,049295	0,373611	0,147885
58	64	82802,41	35266,99	0,208047	0,082350	0,624140	0,247051
64	65	0,00	0,00	0,099753	0,039485	0,299259	0,118454
65	66	82802,41	35266,99	0,006965	0,002757	0,020894	0,008270
65	67	82802,41	35266,99	0,157553	0,062364	0,472659	0,187091
58	68	0,00	0,00	0,094876	0,067416	0,284628	0,202249
68	69	22080,64	9404,53	0,034240	0,009074	0,102720	0,027222
68	70	0,00	0,00	0,032324	0,022968	0,096971	0,068905
70	71	82802,41	35266,99	0,047298	0,018722	0,141894	0,056165
71	72	0,00	0,00	0,091830	0,036349	0,275489	0,109046
72	73	33120,96	14106,80	0,103764	0,027499	0,311293	0,082496
72	74	0,00	0,00	0,136196	0,053910	0,408589	0,161730
74	75	33120,96	14106,80	0,094314	0,024994	0,282942	0,074983
74	76	55201,61	23511,33	0,284415	0,075373	0,853244	0,226120
70	77	0,00	0,00	0,080595	0,057269	0,241786	0,171806
77	78	33120,96	14106,80	0,125848	0,049814	0,377545	0,149442
78	79	0,00	0,00	0,151966	0,060152	0,455897	0,180456
79	80	82802,41	35266,99	0,069610	0,018447	0,208830	0,055342
79	81	55201,61	23511,33	0,241683	0,064049	0,725049	0,192146
77	82	55201,61	23511,33	0,025261	0,017950	0,075783	0,053849
82	83	0,00	0,00	0,108453	0,077064	0,325359	0,231191
83	84	0,00	0,00	0,264197	0,187731	0,792590	0,563192
84	85	55201,61	23511,33	0,044152	0,011701	0,132457	0,035103
84	86	55201,61	23511,33	0,039294	0,027921	0,117881	0,083763

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0
83	87	82802,41	35266,99	0,030050	0,021353	0,090150	0,064058
87	88	0,00	0,00	0,140615	0,099917	0,421845	0,299751
88	89	55201,61	23511,33	0,107809	0,042673	0,323426	0,128020
88	90	82802,41	35266,99	0,029323	0,020836	0,087969	0,062509
90	91	0,00	0,00	0,098384	0,069909	0,295153	0,209727
91	92	55201,61	23511,33	0,118950	0,031523	0,356849	0,094569
92	93	0,00	0,00	0,313604	0,083109	0,940812	0,249326
93	94	55201,61	23511,33	0,325999	0,086394	0,977997	0,259181
93	95	55201,61	23511,33	0,066443	0,017608	0,199328	0,052824
95	96	55201,61	23511,33	0,204738	0,054258	0,614214	0,162774
96	97	55201,61	23511,33	0,311745	0,123397	0,935234	0,370190
97	98	0,00	0,00	0,112613	0,044575	0,337840	0,133726
98	99	55201,61	23511,33	0,165730	0,065600	0,497189	0,196800
98	100	55201,61	23511,33	0,100392	0,039738	0,301177	0,119213
100	101	0,00	0,00	0,110685	0,043812	0,332055	0,131436
101	102	55201,61	23511,33	0,140778	0,037308	0,422333	0,111923
101	103	0,00	0,00	0,084424	0,033417	0,253273	0,100252
103	104	55201,61	23511,33	0,041094	0,016266	0,123281	0,048798
103	105	55201,61	23511,33	0,205380	0,081295	0,616139	0,243884
93	106	33120,96	14106,80	0,292701	0,077569	0,878102	0,232707
91	107	55201,61	23511,33	0,272636	0,072252	0,817908	0,216755
107	108	0,00	0,00	0,296262	0,078513	0,888785	0,235538
108	109	82802,41	35266,99	0,215022	0,085111	0,645067	0,255334
108	110	0,00	0,00	0,445805	0,118143	1,337414	0,354430
110	111	82802,41	35266,99	0,163140	0,064575	0,489420	0,193725
111	112	0,00	0,00	0,315385	0,083581	0,946154	0,250742
112	113	55201,61	23511,33	0,268459	0,071145	0,805376	0,213434
112	114	82802,41	35266,99	0,326615	0,086557	0,979846	0,259671
110	115	0,00	0,00	0,821948	0,217826	2,465845	0,653478
115	116	0,00	0,00	0,096315	0,038124	0,288944	0,114372
116	117	55201,61	23511,33	0,154970	0,041069	0,464911	0,123207
116	118	82802,41	35266,99	0,128251	0,050765	0,384752	0,152295
118	119	82802,41	35266,99	0,709556	0,188041	2,128667	0,564122
119	120	82802,41	35266,99	0,600124	0,159040	1,800373	0,477120
115	121	33120,96	14106,80	0,057010	0,015108	0,171029	0,045325
121	122	22080,64	9404,53	0,444658	0,117840	1,333973	0,353519
122	123	0,00	0,00	0,090548	0,023996	0,271643	0,071989
123	124	22080,64	9404,53	0,326115	0,129085	0,978345	0,387254
123	125	0,00	0,00	0,419080	0,111061	1,257241	0,333184
125	126	33120,96	14106,80	0,059519	0,023559	0,178557	0,070677
125	127	0,00	0,00	0,533476	0,141377	1,600429	0,424132
127	128	0,00	0,00	0,142370	0,037730	0,427110	0,113189
128	129	55201,61	23511,33	0,031312	0,008298	0,093937	0,024895
128	130	55201,61	23511,33	0,130677	0,034631	0,392031	0,103893
127	131	552016,08	235113,27	1,662934	0,440697	4,988802	1,322091
127	132	55201,61	23511,33	0,101145	0,026805	0,303435	0,080414
132	133	0,00	0,00	0,137713	0,036496	0,413140	0,109487
133	134	55201,61	23511,33	0,046258	0,012259	0,138775	0,036777
133	135	55201,61	23511,33	0,555458	0,147203	1,666375	0,441609
135	136	0,00	0,00	0,170019	0,045057	0,510056	0,135171
136	137	55201,61	23511,33	0,162298	0,043011	0,486893	0,129032

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0
137	138	55201,61	23511,33	0,170840	0,045275	0,512521	0,135824
136	139	55201,61	23511,33	0,161647	0,042838	0,484941	0,128515
139	140	0,00	0,00	0,212083	0,056204	0,636248	0,168613
140	141	55201,61	23511,33	0,277567	0,073558	0,832700	0,220675
140	142	55201,61	23511,33	0,260703	0,069089	0,782110	0,207268
142	143	55201,61	23511,33	0,437296	0,115889	1,311888	0,347666

Anexo 03

Onde:

Bi: barra inicial;

Bf: barra final;

P: potência ativa na barra, em pu ;

Q: potência reativa na barra, em pu ;

R1 e R2: resistência de sequência positiva e negativa do trecho, em pu ;

X1 e X2: reatância de sequência positiva e negativa do trecho, em pu ;

R0: resistência de sequência zero do trecho, em pu ;

X0: reatância de sequência zero do trecho, em pu ;

V: tensão na barra, em pu (para primeira iteração).

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0	V
0	1	0,041401	0,017633	0,000888	0,000631	0,002665	0,001893	1,000000
1	2	0,041401	0,017633	0,000851	0,000604	0,002552	0,001813	1,000000
2	3	0,000000	0,000000	0,000934	0,000664	0,002801	0,001991	1,000000
3	4	0,041401	0,017633	0,000247	0,000176	0,000742	0,000528	1,000000
3	5	0,000000	0,000000	0,000695	0,000494	0,002086	0,001482	1,000000
5	6	0,027601	0,011756	0,002595	0,000688	0,007786	0,002063	1,000000
6	7	0,000000	0,000000	0,001482	0,000393	0,004446	0,001178	1,000000
7	8	0,016560	0,007053	0,000353	0,000093	0,001058	0,000280	1,000000
7	9	0,000000	0,000000	0,001721	0,000456	0,005162	0,001368	1,000000
9	10	0,055202	0,023511	0,000230	0,000061	0,000691	0,000183	1,000000
9	11	0,016560	0,007053	0,001382	0,000366	0,004147	0,001099	1,000000
7	12	0,027601	0,011756	0,000933	0,000247	0,002798	0,000742	1,000000
12	13	0,041401	0,017633	0,003389	0,000898	0,010168	0,002695	1,000000
13	14	0,000000	0,000000	0,001552	0,000411	0,004655	0,001234	1,000000
14	15	0,055202	0,023511	0,000625	0,000247	0,001874	0,000742	1,000000
14	16	0,000000	0,000000	0,001961	0,000520	0,005884	0,001559	1,000000
16	17	0,041401	0,017633	0,001237	0,000328	0,003711	0,000984	1,000000
17	18	0,027601	0,011756	0,000620	0,000164	0,001860	0,000493	1,000000
16	19	0,000000	0,000000	0,000633	0,000251	0,001900	0,000752	1,000000
19	20	0,011040	0,004702	0,000306	0,000081	0,000917	0,000243	1,000000
19	21	0,000000	0,000000	0,000608	0,000241	0,001823	0,000722	1,000000
21	22	0,027601	0,011756	0,000716	0,000190	0,002148	0,000569	1,000000
21	23	0,041401	0,017633	0,001156	0,000457	0,003467	0,001372	1,000000
21	24	0,027601	0,011756	0,002726	0,000722	0,008178	0,002167	1,000000
5	25	0,000000	0,000000	0,001365	0,000970	0,004095	0,002910	1,000000
25	26	0,027601	0,011756	0,001205	0,000319	0,003614	0,000958	1,000000
25	27	0,000000	0,000000	0,000394	0,000280	0,001183	0,000840	1,000000
27	28	0,027601	0,011756	0,000346	0,000092	0,001037	0,000275	1,000000
27	29	0,027601	0,011756	0,002097	0,001490	0,006291	0,004470	1,000000
29	30	0,000000	0,000000	0,000271	0,000192	0,000812	0,000577	1,000000
30	31	0,027601	0,011756	0,002428	0,000643	0,007283	0,001930	1,000000
30	32	0,000000	0,000000	0,002355	0,000624	0,007065	0,001872	1,000000
32	33	0,027601	0,011756	0,001139	0,000302	0,003416	0,000905	1,000000

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0	V
32	34	0,041401	0,017633	0,003273	0,000867	0,009820	0,002602	1,000000
30	35	0,027601	0,011756	0,001062	0,000755	0,003187	0,002265	1,000000
35	36	0,000000	0,000000	0,000531	0,000377	0,001594	0,001132	1,000000
36	37	0,027601	0,011756	0,000486	0,000192	0,001458	0,000577	1,000000
36	38	0,027601	0,011756	0,000833	0,000592	0,002500	0,001777	1,000000
38	39	0,000000	0,000000	0,000539	0,000383	0,001618	0,001150	1,000000
39	40	0,000000	0,000000	0,000545	0,000144	0,001634	0,000433	1,000000
40	41	0,027601	0,011756	0,000146	0,000039	0,000437	0,000116	1,000000
40	42	0,041401	0,017633	0,002030	0,000538	0,006090	0,001614	1,000000
39	43	0,027601	0,011756	0,001084	0,000770	0,003251	0,002310	1,000000
43	44	0,000000	0,000000	0,000148	0,000105	0,000444	0,000315	1,000000
44	45	0,016560	0,007053	0,000334	0,000089	0,001003	0,000266	1,000000
44	46	0,027601	0,011756	0,000797	0,000566	0,002390	0,001698	1,000000
46	47	0,000000	0,000000	0,000323	0,000230	0,000969	0,000689	1,000000
47	48	0,027601	0,011756	0,001378	0,000365	0,004135	0,001096	1,000000
47	49	0,016560	0,007053	0,002339	0,000620	0,007016	0,001859	1,000000
49	50	0,000000	0,000000	0,001986	0,000526	0,005958	0,001579	1,000000
50	51	0,016560	0,007053	0,000819	0,000217	0,002456	0,000651	1,000000
50	52	0,027601	0,011756	0,002086	0,000553	0,006258	0,001658	1,000000
50	53	0,055202	0,023511	0,001240	0,000491	0,003719	0,001472	1,000000
47	54	0,000000	0,000000	0,000550	0,000391	0,001650	0,001173	1,000000
54	55	0,110403	0,047023	0,000306	0,000081	0,000919	0,000243	1,000000
54	56	0,000000	0,000000	0,000526	0,000374	0,001578	0,001121	1,000000
56	57	0,041401	0,017633	0,000854	0,000226	0,002562	0,000679	1,000000
56	58	0,000000	0,000000	0,000093	0,000066	0,000280	0,000199	1,000000
58	59	0,027601	0,011756	0,000582	0,000230	0,001746	0,000691	1,000000
59	60	0,041401	0,017633	0,003023	0,001197	0,009070	0,003590	1,000000
60	61	0,000000	0,000000	0,000266	0,000105	0,000799	0,000316	1,000000
61	62	0,027601	0,011756	0,000482	0,000191	0,001445	0,000572	1,000000
61	63	0,055202	0,023511	0,001308	0,000518	0,003924	0,001553	1,000000
58	64	0,041401	0,017633	0,002185	0,000865	0,006555	0,002595	1,000000
64	65	0,000000	0,000000	0,001048	0,000415	0,003143	0,001244	1,000000
65	66	0,041401	0,017633	0,000073	0,000029	0,000219	0,000087	1,000000
65	67	0,041401	0,017633	0,001655	0,000655	0,004964	0,001965	1,000000
58	68	0,000000	0,000000	0,000996	0,000708	0,002989	0,002124	1,000000
68	69	0,011040	0,004702	0,000360	0,000095	0,001079	0,000286	1,000000
68	70	0,000000	0,000000	0,000339	0,000241	0,001018	0,000724	1,000000
70	71	0,041401	0,017633	0,000497	0,000197	0,001490	0,000590	1,000000
71	72	0,000000	0,000000	0,000964	0,000382	0,002893	0,001145	1,000000
72	73	0,016560	0,007053	0,001090	0,000289	0,003269	0,000866	1,000000
72	74	0,000000	0,000000	0,001430	0,000566	0,004291	0,001698	1,000000
74	75	0,016560	0,007053	0,000990	0,000262	0,002971	0,000787	1,000000
74	76	0,027601	0,011756	0,002987	0,000792	0,008961	0,002375	1,000000
70	77	0,000000	0,000000	0,000846	0,000601	0,002539	0,001804	1,000000
77	78	0,016560	0,007053	0,001322	0,000523	0,003965	0,001569	1,000000
78	79	0,000000	0,000000	0,001596	0,000632	0,004788	0,001895	1,000000
79	80	0,041401	0,017633	0,000731	0,000194	0,002193	0,000581	1,000000
79	81	0,027601	0,011756	0,002538	0,000673	0,007614	0,002018	1,000000
77	82	0,027601	0,011756	0,000265	0,000189	0,000796	0,000566	1,000000
82	83	0,000000	0,000000	0,001139	0,000809	0,003417	0,002428	1,000000
83	84	0,000000	0,000000	0,002775	0,001972	0,008324	0,005915	1,000000

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0	V
84	85	0,027601	0,011756	0,000464	0,000123	0,001391	0,000369	1,000000
84	86	0,027601	0,011756	0,000413	0,000293	0,001238	0,000880	1,000000
83	87	0,041401	0,017633	0,000316	0,000224	0,000947	0,000673	1,000000
87	88	0,000000	0,000000	0,001477	0,001049	0,004430	0,003148	1,000000
88	89	0,027601	0,011756	0,001132	0,000448	0,003397	0,001344	1,000000
88	90	0,041401	0,017633	0,000308	0,000219	0,000924	0,000656	1,000000
90	91	0,000000	0,000000	0,001033	0,000734	0,003100	0,002203	1,000000
91	92	0,027601	0,011756	0,001249	0,000331	0,003748	0,000993	1,000000
92	93	0,000000	0,000000	0,003293	0,000873	0,009880	0,002618	1,000000
93	94	0,027601	0,011756	0,003424	0,000907	0,010271	0,002722	1,000000
93	95	0,027601	0,011756	0,000698	0,000185	0,002093	0,000555	1,000000
95	96	0,027601	0,011756	0,002150	0,000570	0,006450	0,001709	1,000000
96	97	0,027601	0,011756	0,003274	0,001296	0,009822	0,003888	1,000000
97	98	0,000000	0,000000	0,001183	0,000468	0,003548	0,001404	1,000000
98	99	0,027601	0,011756	0,001740	0,000689	0,005221	0,002067	1,000000
98	100	0,027601	0,011756	0,001054	0,000417	0,003163	0,001252	1,000000
100	101	0,000000	0,000000	0,001162	0,000460	0,003487	0,001380	1,000000
101	102	0,027601	0,011756	0,001478	0,000392	0,004435	0,001175	1,000000
101	103	0,000000	0,000000	0,000887	0,000351	0,002660	0,001053	1,000000
103	104	0,027601	0,011756	0,000432	0,000171	0,001295	0,000512	1,000000
103	105	0,027601	0,011756	0,002157	0,000854	0,006471	0,002561	1,000000
93	106	0,016560	0,007053	0,003074	0,000815	0,009222	0,002444	1,000000
91	107	0,027601	0,011756	0,002863	0,000759	0,008590	0,002276	1,000000
107	108	0,000000	0,000000	0,003111	0,000825	0,009334	0,002474	1,000000
108	109	0,041401	0,017633	0,002258	0,000894	0,006774	0,002682	1,000000
108	110	0,000000	0,000000	0,004682	0,001241	0,014046	0,003722	1,000000
110	111	0,041401	0,017633	0,001713	0,000678	0,005140	0,002035	1,000000
111	112	0,000000	0,000000	0,003312	0,000878	0,009937	0,002633	1,000000
112	113	0,027601	0,011756	0,002819	0,000747	0,008458	0,002241	1,000000
112	114	0,041401	0,017633	0,003430	0,000909	0,010290	0,002727	1,000000
110	115	0,000000	0,000000	0,008632	0,002288	0,025896	0,006863	1,000000
115	116	0,000000	0,000000	0,001011	0,000400	0,003034	0,001201	1,000000
116	117	0,027601	0,011756	0,001627	0,000431	0,004882	0,001294	1,000000
116	118	0,041401	0,017633	0,001347	0,000533	0,004041	0,001599	1,000000
118	119	0,041401	0,017633	0,007452	0,001975	0,022355	0,005924	1,000000
119	120	0,041401	0,017633	0,006303	0,001670	0,018908	0,005011	1,000000
115	121	0,016560	0,007053	0,000599	0,000159	0,001796	0,000476	1,000000
121	122	0,011040	0,004702	0,004670	0,001238	0,014009	0,003713	1,000000
122	123	0,000000	0,000000	0,000951	0,000252	0,002853	0,000756	1,000000
123	124	0,011040	0,004702	0,003425	0,001356	0,010275	0,004067	1,000000
123	125	0,000000	0,000000	0,004401	0,001166	0,013204	0,003499	1,000000
125	126	0,016560	0,007053	0,000625	0,000247	0,001875	0,000742	1,000000
125	127	0,000000	0,000000	0,005603	0,001485	0,016808	0,004454	1,000000
127	128	0,000000	0,000000	0,001495	0,000396	0,004486	0,001189	1,000000
128	129	0,027601	0,011756	0,000329	0,000087	0,000987	0,000261	1,000000
128	130	0,027601	0,011756	0,001372	0,000364	0,004117	0,001091	1,000000
127	131	0,276008	0,117557	0,017464	0,004628	0,052392	0,013885	1,000000
127	132	0,027601	0,011756	0,001062	0,000282	0,003187	0,000845	1,000000
132	133	0,000000	0,000000	0,001446	0,000383	0,004339	0,001150	1,000000
133	134	0,027601	0,011756	0,000486	0,000129	0,001457	0,000386	1,000000
133	135	0,027601	0,011756	0,005833	0,001546	0,017500	0,004638	1,000000

Bi	Bf	P	Q	R1 e R2	X1 e X2	R0	X0	V
135	136	0,000000	0,000000	0,001786	0,000473	0,005357	0,001420	1,000000
136	137	0,027601	0,011756	0,001704	0,000452	0,005113	0,001355	1,000000
137	138	0,027601	0,011756	0,001794	0,000475	0,005382	0,001426	1,000000
136	139	0,027601	0,011756	0,001698	0,000450	0,005093	0,001350	1,000000
139	140	0,000000	0,000000	0,002227	0,000590	0,006682	0,001771	1,000000
140	141	0,027601	0,011756	0,002915	0,000773	0,008745	0,002318	1,000000
140	142	0,027601	0,011756	0,002738	0,000726	0,008214	0,002177	1,000000
142	143	0,027601	0,011756	0,004592	0,001217	0,013777	0,003651	1,000000

Anexo 04

Onde:

Bi: barra inicial;

Bf: barra final;

V (pu): tensão na Barra em pu;

I (pu): corrente na Barra em pu;

V (kV): tensão na Barra em kV;

I (A): corrente na Barra em A.

Bi	Bf	V (pu)	I (pu)	V (kV)	I (A)
0	1	1,0000	1,2904	13,80	187,01
1	2	0,9988	1,2920	13,78	187,24
2	3	0,9980	1,2930	13,77	187,39
3	4	0,9980	0,0260	13,77	3,77
3	5	0,9976	1,2675	13,77	183,69
5	6	0,9969	0,1755	13,76	25,43
6	7	0,9966	0,1755	13,75	25,44
7	8	0,9966	0,0105	13,75	1,52
7	9	0,9965	0,0452	13,75	6,55
9	10	0,9965	0,0348	13,75	5,04
9	11	0,9930	0,0105	13,70	1,52
7	12	0,9930	0,1203	13,70	17,44
12	13	0,9843	0,1214	13,58	17,59
13	14	0,9826	0,1216	13,56	17,62
14	15	0,9825	0,0353	13,56	5,11
14	16	0,9816	0,0864	13,55	12,53
16	17	0,9815	0,0177	13,54	2,56
17	18	0,9815	0,0177	13,54	2,56
16	19	0,9815	0,0688	13,54	9,97
19	20	0,9815	0,0070	13,54	1,02
19	21	0,9814	0,0618	13,54	8,95
21	22	0,9814	0,0177	13,54	2,56
21	23	0,9814	0,0265	13,54	3,84
21	24	0,9696	0,0179	13,38	2,59
5	25	0,9696	1,1236	13,38	162,84
25	26	0,9696	0,0179	13,38	2,59
25	27	0,9694	1,1060	13,38	160,29
27	28	0,9694	0,0179	13,38	2,59
27	29	0,9687	1,0889	13,37	157,81
29	30	0,9687	1,0889	13,37	157,81
30	31	0,9686	0,0179	13,37	2,59
30	32	0,9685	0,0447	13,37	6,48
32	33	0,9685	0,0179	13,37	2,59
32	34	0,9670	0,0269	13,34	3,89
30	35	0,9670	1,0281	13,34	149,01
35	36	0,9666	1,0286	13,34	149,07
36	37	0,9666	0,0179	13,34	2,60
36	38	0,9663	1,0109	13,33	146,51

Bi	Bf	V (pu)	I (pu)	V (kV)	I (A)
38	39	0,9662	1,0111	13,33	146,53
39	40	0,9662	0,0448	13,33	6,50
40	41	0,9662	0,0179	13,33	2,60
40	42	0,9661	0,0269	13,33	3,90
39	43	0,9661	0,9663	13,33	140,05
43	44	0,9661	0,9663	13,33	140,05
44	45	0,9652	0,0108	13,32	1,57
44	46	0,9652	0,9565	13,32	138,62
46	47	0,9650	0,9567	13,32	138,65
47	48	0,9649	0,0180	13,32	2,60
47	49	0,9645	0,0647	13,31	9,37
49	50	0,9643	0,0647	13,31	9,37
50	51	0,9642	0,0108	13,31	1,57
50	52	0,9642	0,0180	13,31	2,60
50	53	0,9642	0,0359	13,31	5,21
47	54	0,9648	0,8743	13,31	126,71
54	55	0,9648	0,0718	13,31	10,41
54	56	0,9648	0,8025	13,31	116,30
56	57	0,9644	0,0269	13,31	3,90
56	58	0,9644	0,7759	13,31	112,45
58	59	0,9642	0,0539	13,31	7,81
59	60	0,9637	0,0539	13,30	7,82
60	61	0,9637	0,0539	13,30	7,82
61	62	0,9636	0,0180	13,30	2,61
61	63	0,9636	0,0359	13,30	5,21
58	64	0,9640	0,0539	13,30	7,81
64	65	0,9639	0,0539	13,30	7,81
65	66	0,9639	0,0269	13,30	3,91
65	67	0,9638	0,0269	13,30	3,91
58	68	0,9644	0,6681	13,31	96,82
68	69	0,9638	0,0072	13,30	1,04
68	70	0,9638	0,6613	13,30	95,84
70	71	0,9637	0,0395	13,30	5,73
71	72	0,9636	0,0395	13,30	5,73
72	73	0,9636	0,0108	13,30	1,57
72	74	0,9635	0,0288	13,30	4,17
74	75	0,9635	0,0108	13,30	1,57
74	76	0,9634	0,0200	13,29	2,90
70	77	0,9636	0,6219	13,30	90,13
77	78	0,9634	0,0449	13,29	6,51
78	79	0,9632	0,0450	13,29	6,52
79	80	0,9632	0,0270	13,29	3,91
79	81	0,9632	0,0180	13,29	2,61
77	82	0,9630	0,5774	13,29	83,68
82	83	0,9630	0,5774	13,29	83,68
83	84	0,9628	0,0360	13,29	5,21
84	85	0,9628	0,0180	13,29	2,61
84	86	0,9628	0,0180	13,29	2,61
83	87	0,9629	0,5414	13,29	78,47
87	88	0,9628	0,5415	13,29	78,48
88	89	0,9628	0,0180	13,29	2,61

Bi	Bf	V (pu)	I (pu)	V (kV)	I (A)
88	90	0,9628	0,5235	13,29	75,87
90	91	0,9626	0,5236	13,28	75,89
91	92	0,9626	0,1008	13,28	14,61
92	93	0,9493	0,1022	13,10	14,81
93	94	0,9493	0,0183	13,10	2,65
93	95	0,9475	0,0731	13,08	10,60
95	96	0,9443	0,0734	13,03	10,63
96	97	0,9413	0,0736	12,99	10,67
97	98	0,9407	0,0736	12,98	10,67
98	99	0,9407	0,0184	12,98	2,67
98	100	0,9404	0,0553	12,98	8,01
100	101	0,9403	0,0553	12,98	8,01
101	102	0,9402	0,0184	12,97	2,67
101	103	0,9402	0,0368	12,97	5,34
103	104	0,9402	0,0184	12,97	2,67
103	105	0,9402	0,0184	12,97	2,67
93	106	0,9264	0,0113	12,78	1,63
91	107	0,9398	0,4331	12,97	62,77
107	108	0,9364	0,4347	12,92	63,00
108	109	0,9363	0,0277	12,92	4,02
108	110	0,9342	0,4079	12,89	59,11
110	111	0,9339	0,0464	12,89	6,72
111	112	0,9336	0,0464	12,88	6,72
112	113	0,9335	0,0186	12,88	2,69
112	114	0,9335	0,0278	12,88	4,03
110	115	0,9324	0,3622	12,87	52,50
115	116	0,9322	0,0465	12,86	6,73
116	117	0,9322	0,0186	12,86	2,69
116	118	0,9320	0,0279	12,86	4,04
118	119	0,9313	0,0279	12,85	4,04
119	120	0,9221	0,0282	12,72	4,08
115	121	0,9235	0,3188	12,74	46,21
121	122	0,9181	0,3207	12,67	46,48
122	123	0,9174	0,3209	12,66	46,51
123	124	0,9173	0,0075	12,66	1,09
123	125	0,9149	0,3143	12,63	45,55
125	126	0,9149	0,0114	12,63	1,65
125	127	0,9125	0,3037	12,59	44,01
127	128	0,9125	0,0380	12,59	5,50
128	129	0,9124	0,0190	12,59	2,75
128	130	0,9124	0,0190	12,59	2,75
127	131	0,8899	0,1946	12,28	28,21
127	132	0,8955	0,0774	12,36	11,21
132	133	0,8949	0,0774	12,35	11,22
133	134	0,8949	0,0194	12,35	2,81
133	135	0,8932	0,0582	12,33	8,43
135	136	0,8929	0,0582	12,32	8,43
136	137	0,8928	0,0194	12,32	2,81
137	138	0,8927	0,0194	12,32	2,81
136	139	0,8927	0,0388	12,32	5,62
139	140	0,8924	0,0388	12,32	5,63

Bi	Bf	V (pu)	I (pu)	V (kV)	I (A)
140	141	0,8922	0,0194	12,31	2,82
140	142	0,8920	0,0194	12,31	2,82
142	143	0,8918	0,0194	12,31	2,82

Anexo 05

Onde:

S_b (potência de base) = 2 MVA;

V_b (tensão de base) = 13,8 kV;

I_b (corrente de base) = 144,93 A.

Barra 131	lcc-trifásico (pu)	11,2523
	lcc-bifásico (pu)	9,7474
	lcc-monofásico (pu)	6,7513
	lcc-trifásico (A)	1630,76
	lcc-bifásico (A)	1412,67
	lcc-monofásico (A)	978,44

Barra 91	lcc-trifásico (pu)	37,9078
	lcc-bifásico (pu)	32,8291
	lcc-monofásico (pu)	22,7430
	lcc-trifásico (A)	5493,88
	lcc-bifásico (A)	4757,84
	lcc-monofásico (A)	3296,09