

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

Rafaela Oliveira da Silva

**Análise de faltas simétricas e assimétricas na rede primária de
distribuição da Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa - PB
Novembro 2017**

RAFAELA OLIVEIRA DA SILVA

**ANÁLISE DE FALTAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS NA REDE
PRIMÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica como um dos pré-
requisitos para a obtenção do título em
Bacharel em Engenharia Elétrica sob
orientação do Prof. Clivaldo Silva de
Araújo.**

**João Pessoa - PB
Novembro 2017**

SILVA, Rafaela Oliveira da

Análise de faltas simétricas e assimétricas na rede primária de distribuição da Universidade Federal da Paraíba./ Rafaela Oliveira da Silva. – João Pessoa, 2017.

46 folhas.

Orientador: Prof. Dr. Clivaldo Silva de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I – UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Curto-circuito
2. Fluxo de Potência
3. Rede de Distribuição
4. Sistemas Elétricos.

Rafaela Oliveira da Silva

**Análise de faltas simétricas e assimétricas na rede primária de
distribuição da Universidade Federal da Paraíba**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Data de Avaliação: ____/____/____

Nota: _____

Avaliado por:

Prof. Dr. Clivaldo Silva de Araújo (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa – PB
Novembro 2017

*Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.
(Bíblia Sagrada, Provérbios 16:3).*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem o seu amor eu nada seria.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu namorado Lucas, por todo o amor, compreensão e apoio.

Ao professor e orientador Clivaldo pelos ensinamentos, atenção e paciência. Aos demais professores pelo conhecimento compartilhado.

Aos amigos, pelo carinho e torcida.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho pretende analisar através de simulações computacionais faltas simétricas e assimétricas na rede de distribuição do Campus I da Universidade Federal da Paraíba. As simulações de curtos-circuitos em sistemas elétricos são de grande relevância para o planejamento e operação do mesmo, ao permitir antever as consequências danosas dos defeitos simulados. Tal conhecimento proporciona a tomada de medidas necessárias para minimizar essas consequências. Neste trabalho de conclusão de curso, abordam-se curtos-circuitos trifásicos e monofásicos em uma rede de distribuição primária.

Palavras-Chaves: Curto-circuito. Fluxo de Potência. Rede de Distribuição. Sistemas Elétricos.

ABSTRACT

This work intends to analyze, through computational simulations, symmetrical and asymmetric faults in the distribution network of Campus I of the Federal University of Paraíba. Simulations of short circuits in electrical systems are of great relevance for the planning and operation of the same, allowing to anticipate the harmful consequences of the simulated defects. Such knowledge provides the necessary measures to minimize these consequences. In this work, three-phase and single-phase short circuits are addressed in a primary distribution network.

Key-words: Short circuit. Power Flow. Distribution network. Electrical Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de curto-circuito trifásico.	12
Figura 1.2: Esquema de curtos-circuitos assimétricos.....	13
Figura 2.1: Fasores das componentes simétricas positiva, negativa e zero.....	19
Figura 2.2: Exemplo gráfico do teorema de Fortescue para sistemas trifásicos.....	19
Figura 4.1: Vista aérea do Campus I da UFPB.	24
Figura 4.2: Chave seccionadora a óleo.....	26
Figura 4.3: Chave seccionadora do tipo faca.....	26
Figura 4.4: Aquisição de dados.	27
Figura 4.5: Tela com aquisição de dados.	28
Figura 4.6: Interface gráfica do gerenciador CCK.	28
Figura 4.7: Perfil de carga médio do Campus I.....	31
Figura 5.1: Interface gráfica do programa DIgSILENT PowerFactory®.....	33
Figura 5.2: Ilustração do método completo.	34
Figura 5.3: Rede de distribuição Campus I implementada no DIgSILENT PowerFactory® ..	36
Figura 6.1: Chaves seccionadoras numeradas de 1 a 19.....	38
Figura 0.1: Rede de distribuição Campus I implementada no DIgSILENT PowerFactory® ..	45
Figura 0.2: Chaves seccionadoras numeradas de 1 a 19.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Ocorrência dos tipos de Faltas.....	13
Tabela 4.1: Transformadores instalados no Campus I da UFPB.....	25
Tabela 4.2: Valores médios da Potência ativa, aparente e fator de potência.....	29
Tabela 4.3: Consumo dos transformadores em relação as suas potências nominais.....	32
Tabela 6.1: Resultados para curto-circuito trifásico franco.....	39
Tabela 6.2: Resultados para curto-circuito monofásico franco.....	40
Tabela 6.3 Resultados para curtos-circuitos na entrada.....	40

SUMÁRIO

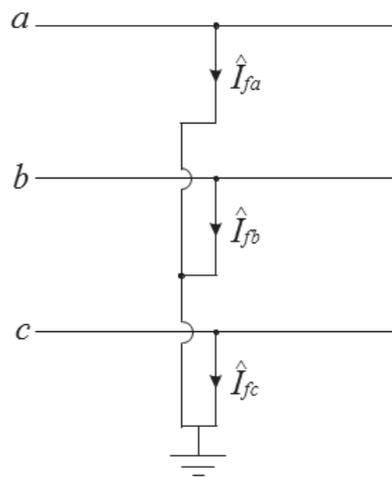
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos.....	15
1.3. Organização do Documento	15
2. COMPONENTES SIMÉTRICAS	16
2.1. Introdução	16
2.2. Teorema de Fortescue.....	16
2.3. Componentes simétricas em sistemas trifásicos	18
3. FLUXO DE POTÊNCIA.....	20
3.1. Fluxo de potência com o método iterativo de Newton-Raphson.....	22
4. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB.....	24
4.1. Aquisição de dados	27
4.2. Distribuição das potências das cargas	31
5. PROGRAMA DIGSILENT POWERFACTORY®	33
5.1. Método Completo	34
5.2. Implementação da rede.....	35
6. RESULTADOS	37
7. CONCLUSÃO.....	42
7.1. Trabalhos futuros	42
8. REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE	44

1. INTRODUÇÃO

Uma falta ou curto-circuito consiste em um contato elétrico entre condutores sob potenciais diferentes, esse contato pode ser direto (franco ou através de impedância), ou indireto (através de arco voltaico). Os curtos-circuitos ocorrem de maneira aleatória nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e como consequência durante esses eventos geralmente correntes maiores são estabelecidas, com a elevação de temperaturas e solicitações térmicas, além dos esforços mecânicos e deformações de materiais (ZANETTA, 2006).

Os curtos-circuitos em SEP podem ser simétricos ou assimétricos. A falta simétrica ocorre quando todas as fases da rede são solicitadas de modo idêntico e conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de curto. Na figura 1.1 é ilustrado o conceito de falta simétrica, onde \hat{I}_{fa} , \hat{I}_{fb} e \hat{I}_{fc} são as correntes de falta nas fases a, b e c respectivamente.

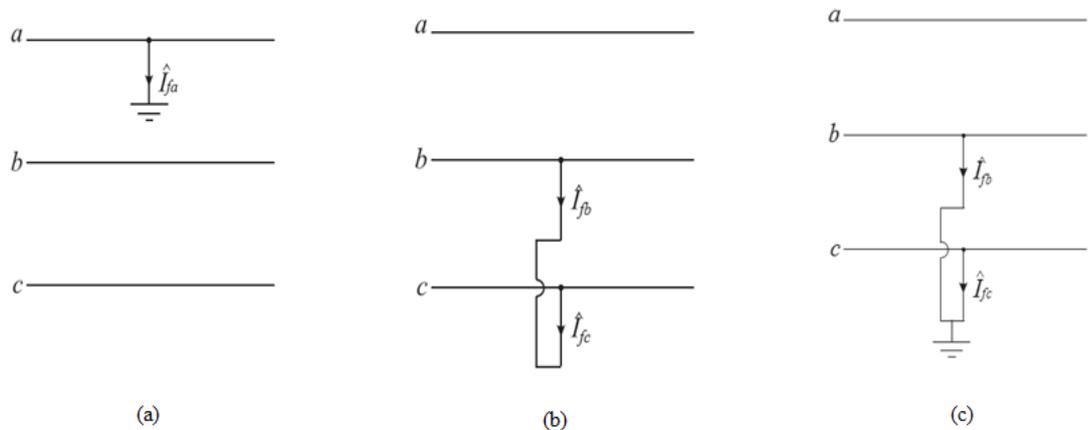
Figura 1.1: Esquema de curto-circuito trifásico.



Fonte: STEVENSON (1986).

As faltas assimétricas são caracterizadas por diferentes correntes nas fases, havendo assim um desequilíbrio. Os curtos-circuitos assimétricos ocorrem como faltas fase-terra simples, faltas fase-fase, ou faltas dupla fase-terra. O caminho para a corrente de falta entre linhas ou entre linha e terra pode ou não conter uma impedância (STEVENSON, 1986). As figuras 1.2 (a), (b) e (c) representam o esquemas de faltas fase-terra, linha-linha e fase-terra dupla, respectivamente.

Figura 1.2: Esquema de curtos-circuitos assimétricos.



Fonte: STEVENSON (1986).

As faltas ocorrem em pontos aleatórios dos SEP e suas causas podem ser por problemas de isolamento, mecânicos, elétricos, de natureza térmica, de manutenção ou por problemas de outra natureza, como atos de vandalismo, queimadas ou acidentes com animais (KINDERMANN, 1992).

O curto-circuito simétrico ou trifásico é o mais raro de acontecer, por causa da sua própria natureza física, que necessita que todas as fases sejam afetadas. Em compensação a falta fase-terra é a mais comum. As percentagens médias de ocorrência de cada tipo estão na tabela 1.1 (KINDERMANN, 1992).

Tabela 1.1: Ocorrência dos tipos de Faltas.

Tipos de Faltas	Ocorrências em %
3ϕ	06
2ϕ	15
$2\phi - terra$	16
$1\phi - terra$	63

Fonte: KINDERMANN (1992, p. 140).

Além disso, também podemos classificar os curtos-circuitos como temporários ou permanentes. As faltas temporárias são qualificadas por desaparecerem após a atuação dos equipamentos de proteção e imediato restabelecimento do sistema. As faltas permanentes

requerem a intervenção de manutenção antes que faça a religação do sistema com sucesso. Cerca de 96% dos curtos-circuitos são de caráter temporário (KINDERMANN,1992).

1.1. Motivação

Se os curtos-circuitos não forem rapidamente eliminados, os danos nos equipamentos que integram a rede elétrica poderão ser elevados e irreversíveis. Portanto a análise de faltas é muito importante para a proteção em SEP, tendo em vista que os cálculos de redes em curto são fundamentais para o dimensionamento adequado das proteções nos sistemas. O conhecimento da corrente de falta atende a diversas finalidades, listadas a seguir (KINDERMANN, 1992):

- Conhecer a dimensão do seu valor.
- Dimensionar a linha de transmissão ou distribuição em relação a seu limite suportável de elevação da temperatura devido ao curto-circuito.
- Dimensionar o disjuntor quanto à secção dos seus contatos e a capacidade disruptiva da sua câmara de extinção de arco elétrico.
- Dimensionar o transformador de corrente (TC) quanto ao nível de saturação da sua curva de magnetização definido pela sua classe de exatidão.
- Efetuar a coordenação de relés.
- Análise das sobretensões na frequência industrial devido à falta.
- Conhecer o tempo de atuação do relé, conseqüentemente o tempo de eliminação do defeito, para analisar as perturbações devido às harmônicas e da estabilidade dinâmica do sistema elétrico.

Todas essas finalidades podem ser aplicadas na rede de distribuição do Campus I da UFPB se conhecida suas correntes de curto-circuito.

1.2. Objetivos

A meta deste trabalho é fazer o estudo de caso de faltas simétrica e assimétricas na rede primária de distribuição do Campus I da Universidade Federal da Paraíba, tendo como objetivos específicos os seguintes:

- Realizar simulações de fluxo de carga na rede de distribuição do Campus I da UFPB no software DIgSILENT®.
- Realizar simulações de falta simétricas e assimétricas na rede de distribuição do Campus I da UFPB no software DIgSILENT®.
- Avaliar e Discutir os resultados obtidos.

1.3. Organização do Documento

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado como segue:

- No Capítulo 2 encontra-se uma breve explicação sobre componentes simétricas.
- O Capítulo 3 aborda fluxo de potência para melhor entendimento do método utilizado.
- No Capítulo 4 é apresentado o sistema de distribuição estudado.
- O Capítulo 5 é dedicado ao programa DIgSILENT PowerFactory®, método utilizado e implementação da rede de distribuição.
- No Capítulo 6 são apresentados todos os resultados das simulações feitas.

2. COMPONENTES SIMÉTRICAS

2.1. Introdução

Os sistemas trifásicos podem ser classificados como simétricos ou assimétricos. Circuitos trifásicos simétricos são sistemas que satisfazem as condições de tensões senoidais de mesma magnitude e defasadas entre si de $2\pi/3$ radianos ou 120° elétricos. Circuitos trifásicos assimétricos são sistemas que não atendem pelo menos uma das condições citadas acima (ROBBA, 1996). Da mesma forma, as linhas e as cargas trifásicas podem ser classificadas em equilibradas ou desequilibradas. Linhas constituídas de impedâncias iguais nas três fases e cargas iguais nas três fases são consideradas equilibradas, caso contrário são desequilibradas.

As faltas geram desbalanceamentos em SEP, dificultando os cálculos e simulações da ocorrência, exceto as faltas simétricas em um sistema equilibrado que tem por característica corrente simétrica nas três fases. Como solução a este problema a formulação proposta por Fortescue foi adaptada e aplicada aos elementos que compõem o SEP. Isto possibilitou que as técnicas já conhecidas e dominadas de circuitos trifásicos equilibrados fossem aplicadas aos sistemas desbalanceados pelos curtos-circuitos, através das componentes simétricas (KINDERMANN, 1992).

2.2. Teorema de Fortescue

O teorema de Fortescue consiste na decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas em “n” sistemas de fasores equilibrados, denominadas componentes simétricas dos fasores originais. 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).

Nota-se, que fisicamente o sentido da sequência 2, ou de todas as sequências de ordem par, tem seus conjuntos de sequência girando contrários ao da sequência 1, ou de ordem ímpar (KINDERMANN, 1992).

2.3. Componentes simétricas em sistemas trifásicos

Para as redes trifásicas, o teorema de Fortescue fica assim formulado: “Um sistema trifásico de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas trifásicos de três fasores balanceados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, negativa e zero” (KINDERMANN, 1992).

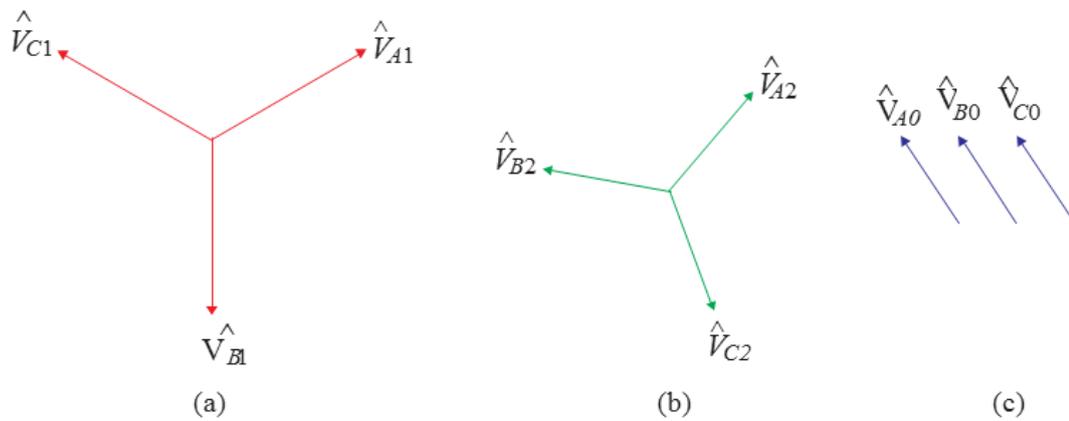
As componentes de sequência positiva constituem de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° entre si, e com a mesma sequência de fase do sistema original. As componentes de sequência negativa consistem de três fasores iguais em módulo, defasados de 120° , mas com sequência de fase oposta ao sistema de fasores originais. Enquanto, as componentes de sequência zero consistem de três fasores iguais em módulo e com defasamento nulo entre si.

Considerando o sistema trifásico original representado pelos fasores V_a, V_b, V_c os três conjuntos de componentes simétricas são caracterizados pelos índices adicionais 1, 2 e 0 para sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

- Sequência Positiva: V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}
- Sequência Negativa: V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}
- Sequência Zero: V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}

Nas figuras 2.1 (a), (b) e (c) são ilustrados os fasores das componentes simétricas positiva, negativa e zero, respectivamente:

Figura 2.1: Fasores das componentes simétricas positiva, negativa e zero.

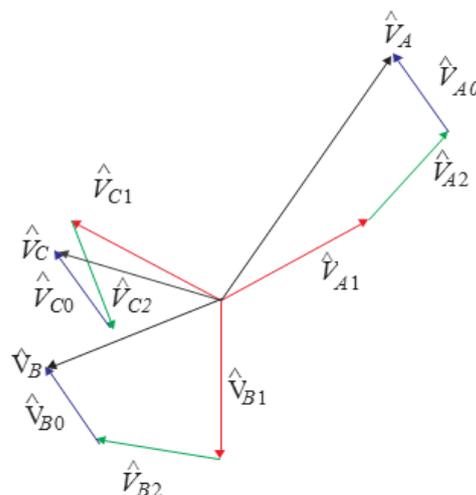


Fonte: STEVENSON (1986).

Os fasores desequilibrados são constituídos pela soma das componentes simétricas, como mostra a expressão da equação 2.3 e ilustra a figura 2.2:

$$\begin{aligned}
 V\hat{a} &= V\hat{a}1 + V\hat{a}2 + V\hat{a}0 \\
 V\hat{b} &= V\hat{b}1 + V\hat{b}2 + V\hat{b}0 \\
 V\hat{c} &= V\hat{c}1 + V\hat{c}2 + V\hat{c}0
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Figura 2.2: Exemplo gráfico do teorema de Fortescue para sistemas trifásicos.



Fonte: STEVENSON (1986).

3. FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo de fluxo de potência ou fluxo de carga é uma das mais importantes soluções na análise de SEP. A análise de fluxo de potência em redes elétricas consiste basicamente na determinação do estado da rede (magnitude das tensões nodais e os ângulos de fase), da distribuição dos fluxos e das injeções de potências ativa e reativa nas barras, dentre outras grandezas de interesse. A rede é representada por um conjunto equações e inequações algébricas, que é utilizada em situações nas quais as variações com o tempo são lentas o suficiente para que se possam ignorar os efeitos transitórios. Para se considerar os efeitos transitórios deve ser utilizada uma modelagem dinâmica envolvendo equações diferenciais além das equações algébricas. O cálculo do fluxo de carga é, em geral, realizado utilizando-se métodos computacionais desenvolvidos especificamente para a resolução do sistema de equações e inequações algébricas que representam o modelo estático da rede (MONTICELLI, 1983).

Os elementos de um SEP podem ser classificados em dois grupos: os que estão ligados entre um nó qualquer e o nó-terra, como são o caso de geradores, cargas, reatores e capacitores; e os que estão ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linhas de transmissão, transformadores e defasadores. Os geradores e as cargas são considerados como parte externa dos sistemas, e são modelados por meio de injeções de potência nos nós da rede. Para a parte interna do sistema são considerados os demais elementos. As equações básicas do fluxo de carga são adquiridas aplicando o princípio da conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede, isto é, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que fluem pelos componentes internos que têm este nó como um de seus terminais. Isso equivale à aplicação da primeira Lei de Kirchhoff e a segunda Lei de Kirchhoff é aplicada para expressar os fluxos de potência nos componentes internos como funções das tensões (estados) de seus nós terminais (MONTICELLI, 1983).

Com o objetivo de estabelecer noções fundamentais para o fluxo de potência, a seguir será apresentada uma formulação mais simples (formulação básica) do problema de fluxo de carga, onde a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas.

V_k = magnitude da tensão nodal (barra k);

Θ_k = ângulo da tensão nodal;

P_k = geração líquida (geração menos carga) de potência ativa;

Q_k = injeção líquida de potência reativa.

Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas incógnitas, definem-se três tipos de barras:

Barra PQ – são dados P_k e Q_k , e calculados V_k e Θ_k ;

Barra PV – são dados P_k e V_k , e calculados Θ_k e Q_k ;

Barra de Referência – são dados V_k e Θ_k , e calculados P_k e Q_k .

As barras dos tipos PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração. A barra de referência, ou barra $V\theta$, tem uma dupla função, fornece a referência angular do sistema, além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema (MONTICELLI, 1983).

O conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc. Isso representa a primeira lei de Kirchhoff e pode ser expresso matematicamente de acordo com as equações (3.1) e (3.2).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.2)$$

Onde:

$K = 1 \dots NB$, sendo NB o número de barras da rede;

$\Omega_k \rightarrow$ conjunto das barras vizinhas da barra k;

$V_k, V_m \rightarrow$ magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k \rightarrow m$;

$\theta_k, \theta_m \rightarrow$ ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k \rightarrow m$;

$P_{km} \rightarrow$ fluxo de potência ativa no ramo $k \rightarrow m$;

$Q_{km} \rightarrow$ fluxo de potência reativa no ramo $k \rightarrow m$;

O conjunto de inequações, que fazem parte do problema de fluxo de carga com controle de tensão e potência reativa, é formado entre outras, pelas restrições nas magnitudes das tensões nodais das barras PQ e pelos limites nas injeções de potência reativa nas barras PV, dadas por (MONTICELLI, 1983):

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (3.3)$$

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max} \quad (3.4)$$

3.1. Fluxo de potência com o método iterativo de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson, também conhecido como método das tangentes, tem como objetivo o cálculo do fluxo de potência ativa e reativa em cada barra, em um processo iterativo, em que o desvio dos valores de referência é calculado em cada iteração dada pelas equações de potências, também chamadas de equações de balanço de potência, modeladas pelas equações (3.5) e (3.6).

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k = P_k^{esp} - V_k \sum_{j=1}^{n+m+1} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k = Q_k^{esp} - V_k \sum_{j=1}^{n+m+1} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.6)$$

O índice “esp” indica valores especificados de potência ativa e reativa, enquanto G e B são a condutância e a susceptância entre as barras k e m, calculadas na matriz de admitância Y. Por definição, as barras de carga ou PQ têm definidos os valores de P e Q, assim os valores de ΔP e ΔQ tendem a zero na solução. O mesmo acontece para ΔP das barras de geração ou PV. Para melhorar a convergência do cálculo iterativo substitui-se o termo ΔQ por $\Delta Q/V$ (MONTICELLI, 1983).

Expondo as equações (3.5) e (3.6) na forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde H , M , N e L constituem a matriz jacobiana J :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Dessa forma, os componentes ΔV e $\Delta \theta$ da tensão nodal podem ser escritos em termos dos desvios ΔP e ΔQ e da matriz Jacobiana e atualizam as tensões nas barras e as potências injetadas.

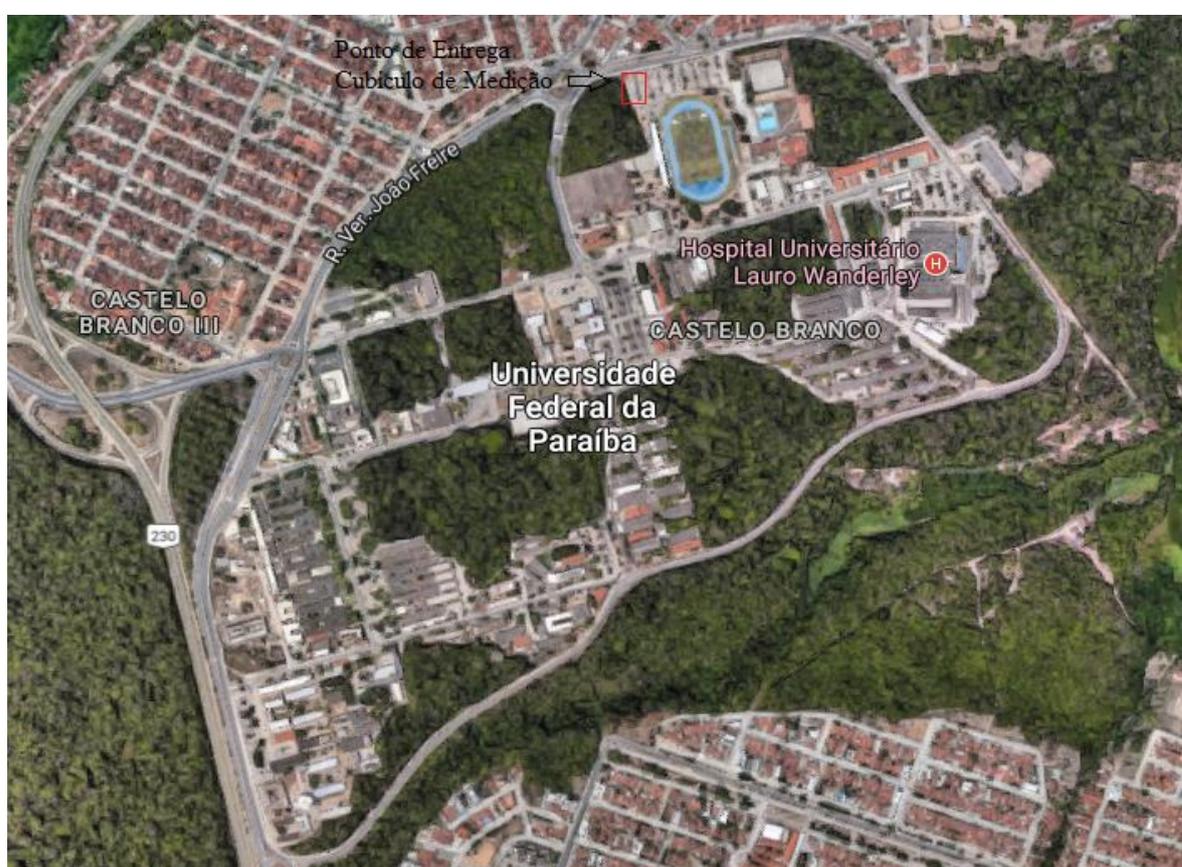
O critério de convergência, dado pela equação (3.9), quando satisfeito para o processo e o resultado é dado. ϵ (tolerância) é um número arbitrariamente pequeno.

$$\max(\Delta P, \Delta Q) < \epsilon \quad (3.9)$$

4. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA UFPB

A rede primária de distribuição do Campus I da Universidade Federal da Paraíba é alimentada por uma tensão nominal de 13,8 kV, o ponto de entrega de energia da concessionária local situa-se ao lado do setor esportivo da universidade, conforme ilustrado na figura 4.1, nesse ponto encontra-se ainda o cubículo de medição.

Figura 4.1: Vista aérea do Campus I da UFPB.



Fonte: Google Maps.

O Campus tem uma potência instalada em transformadores de 10.305 kVA, sendo essa quantidade dividida em 80 de transformadores de potências nominais diferentes. Na tabela 4.1 é listado a quantidade de transformadores e suas respectivas potências nominais.

Tabela 4.1: Transformadores instalados no Campus I da UFPB.

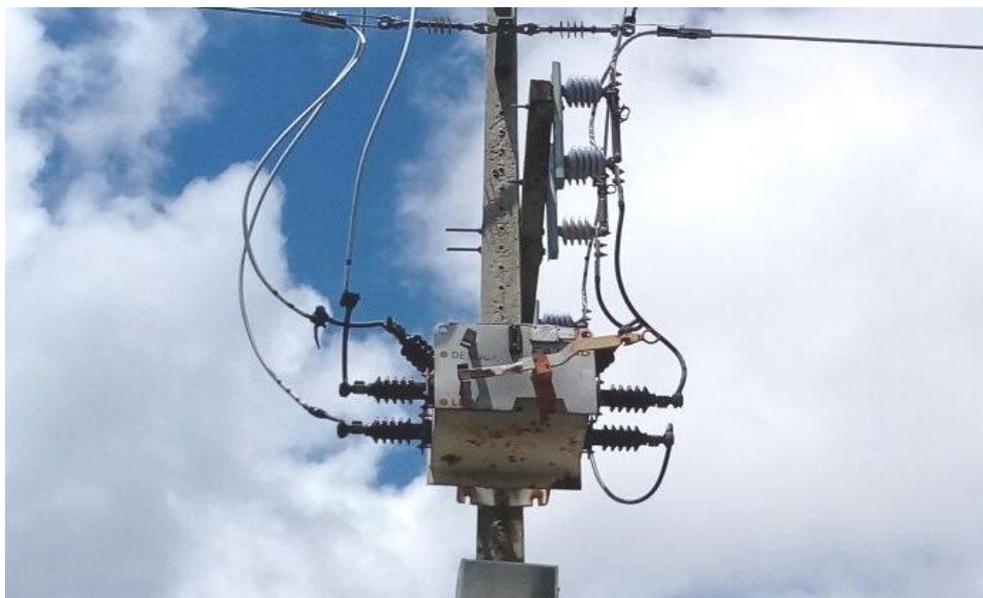
Quantidade de Transformadores	Potência Nominal por Transformador (KVA)
3	300
11	225
25	150
12	112,5
19	75
7	45
3	30

Fonte: Prefeitura Universitária – UFPB (2017).

A estrutura da rede possui três chaves a óleo e dezenove chaves seccionadoras tipo faca. As chaves a óleo são dispositivos com capacidade de manobra com carga, isto é, são capazes de fazerem a abertura da rede sob carga. As chaves seccionadoras do tipo faca recebem esse nome porque sua lâmina de contato lembra uma faca, são dispositivos destinados a seccionar partes dos sistemas elétricos. São instaladas em pontos estratégicos visando seccionar a rede para minimizar os efeitos das interrupções programadas ou não; e ou estabelecer seccionamento visível em equipamentos como chaves a óleo.

Nas figuras 4.2 e 4.3 são ilustradas, respectivamente, a chave seccionadora a óleo e a chave seccionadora tipo faca.

Figura 4.2: Chave seccionadora a óleo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 4.3: Chave seccionadora do tipo faca.



Fonte: HIPERMAKRO (2017).

4.1. Aquisição de dados

Na preparação dessa pesquisa foram obtidos alguns dados junto com o departamento de elétrica da prefeitura universitária, entre eles, a planta da rede de distribuição elétrica com a localização dos dois tipos de chaves seccionadoras existentes e dos transformadores e suas respectivas potências nominais.

Também foram coletados os dados de potência ativa e fator de potência medidos no ponto de fornecimento de energia elétrica da concessionária, referentes aos dias de 17 de julho a 25 de julho, no período de 06h30min as 17h00min, excluído o final de semana, pois nos fins de semana as atividades são reduzidas no Campus I. Nas figuras 4.4 e 4.5 são apresentados como foram realizadas as medições no cubículo.

Figura 4.4: Aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria (2017).

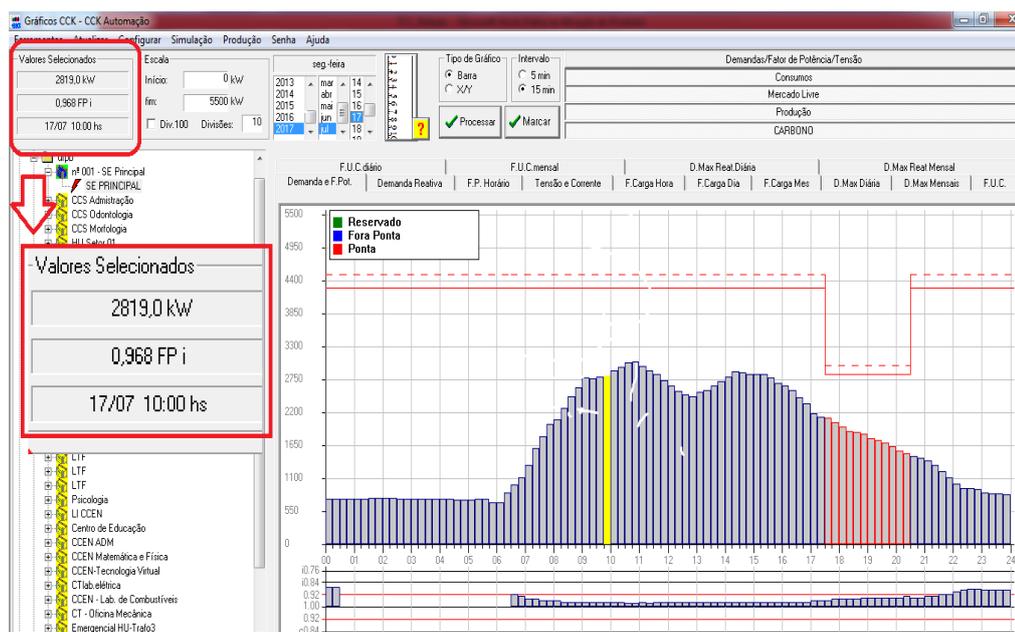
Figura 4.5: Tela com aquisição de dados.



Fonte: Autoria própria (2017).

Os dados de medição foram obtidos a cada 15 minutos, com os valores médios de potência ativa e fator de potência. Na figura 4.6 é mostrada a interface gráfica do gerenciador CCK. Como exemplo destaca-se em vermelho os valores de potência ativa e os valores de fator de potência para o horário de 10 horas do dia 17 de julho de 2017.

Figura 4.6: Interface gráfica do gerenciador CCK.



Fonte: Prefeitura Universitária – UFPB (2017).

A potência aparente é dada pela equação 4.10.

$$S = \frac{P}{FP} \quad (4.10)$$

Onde:

S → Potência aparente;

P → Potência ativa;

FP → Fator de potência.

Na tabela 4.2 são apresentados os valores médios de potência ativa (P), fator de potência (FP) e potência aparente (S), referentes aos sete dias de medição, no horário de 06h30min as 17h00min.

Tabela 4.2: Valores médios da Potência ativa, aparente e fator de potência.

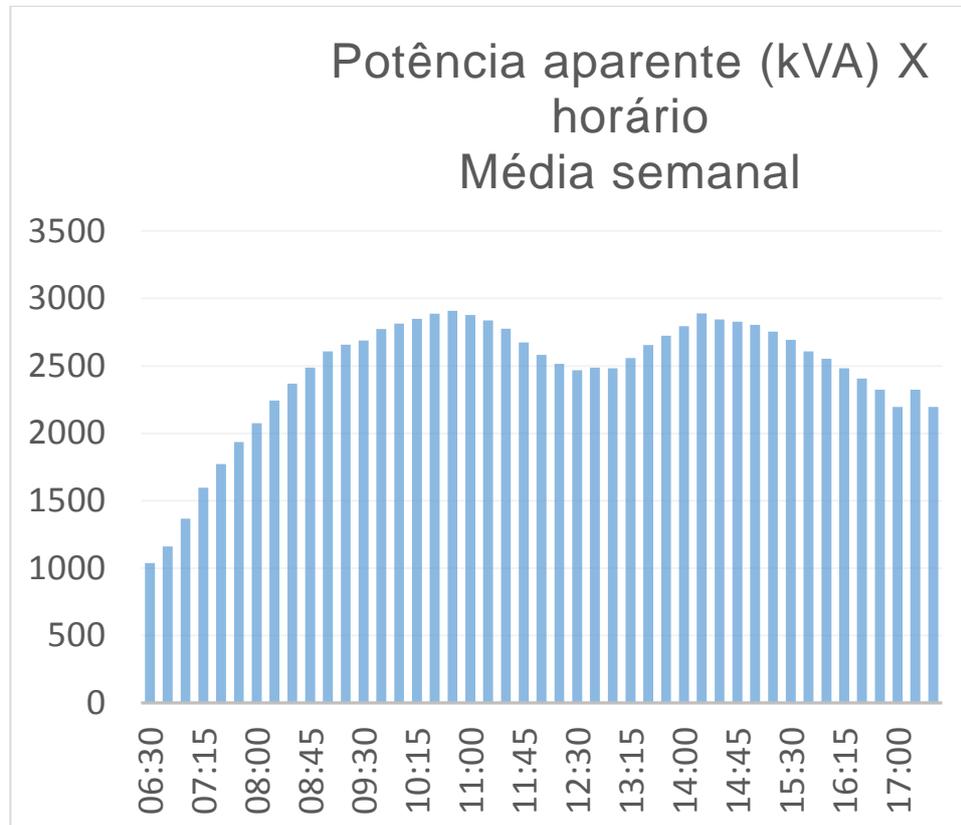
Horário	P(kW)	FP méd	S(kVA)
06:30	950,9	0,916	1038,104
06:45	1076,6	0,928	1159,918
07:00	1286,9	0,941	1367,973
07:15	1512,5	0,947	1597,380
07:30	1689,1	0,953	1771,415
07:45	1853,3	0,958	1934,700
08:00	1995,4	0,962	2074,436
08:15	2166,7	0,965	2244,510
08:30	2291,1	0,967	2370,012
08:45	2406,2	0,967	2488,091
09:00	2523,4	0,967	2607,946
09:15	2574,7	0,969	2657,127
09:30	2605,9	0,969	2689,181
09:45	2689,8	0,969	2774,634
10:00	2731,7	0,971	2814,412
10:15	2763,4	0,970	2848,535

10:30	2802,7	0,970	2888,541
10:45	2824,3	0,970	2909,944
11:00	2792,6	0,971	2877,021
11:15	2753,3	0,970	2838,449
11:30	2690,9	0,969	2775,811
11:45	2593,4	0,970	2674,571
12:00	2501,3	0,969	2582,237
12:15	2436,0	0,968	2516,039
12:30	2387,0	0,967	2468,554
12:45	2404,1	0,966	2487,506
13:00	2401,0	0,967	2482,601
13:15	2475,7	0,968	2557,584
13:30	2569,0	0,968	2654,307
13:45	2636,2	0,967	2724,228
14:00	2707,7	0,968	2795,778
14:15	2801,5	0,969	2889,800
14:30	2760,5	0,970	2845,802
14:45	2743,7	0,970	2828,971
15:00	2717,3	0,969	2803,473
15:15	2669,3	0,968	2755,895
15:30	2605,0	0,967	2693,006
15:45	2522,4	0,967	2607,417
16:00	2467,2	0,966	2552,824
16:15	2394,7	0,964	2482,004
16:30	2317,0	0,962	2407,472
16:45	2232,0	0,960	2323,949
17:00	2105,7	0,958	2197,011
16:45	2232,0	0,960	2323,949
17:00	2105,7	0,958	2197,011

Fonte: Autoria própria (2017).

Com base na tabela 4.2, na figura 4.7 é ilustrado o perfil de carga do Campus I no período e horário estudados.

Figura 4.7: Perfil de carga médio do Campus I.



Fonte: Autoria própria (2017).

4.2. Distribuição das potências das cargas

Para o estudo de faltas trabalharão com o valor de consumo mais elevado apresentado no tópico anterior, referente ao horário das 10h45min com valor médio de potência ativa, aparente e fator de potência de 2824,3 kW, 2909,9 kVA e 0,97, respectivamente.

Como o Campus I atualmente não disponibiliza de outras medições, além da medição na entrada do fornecimento de energia elétrica, foi adotado um cálculo para a distribuição da potência em cada transformador do Campus. O cálculo baseia-se na equação 4.2.

$$\text{Potência do transformador} = \frac{D}{S} P \quad 4.2$$

Onde:

D → Demanda total da rede em kVA.

S → Soma da potência nominal de todos os transformador da rede em kVA.

P → Potência nominal do transformador calculado.

Dessa forma, pode-se fazer uma estimativa da potência consumida em cada transformador da rede. Na tabela 4.3 são mostradas as potências obtidas para os transformadores.

Tabela 4.3: Consumo dos transformadores em relação as suas potências nominais.

Quantidade	Potência nominal (kVA)	Potência consumida (kW)
3	30	8,21
7	45	12,32
19	75	20,54
12	112,5	30,81
25	150	41,08
11	225	61,62
3	300	82,16
Total = 80	Total = 10305	Total = 2824,3

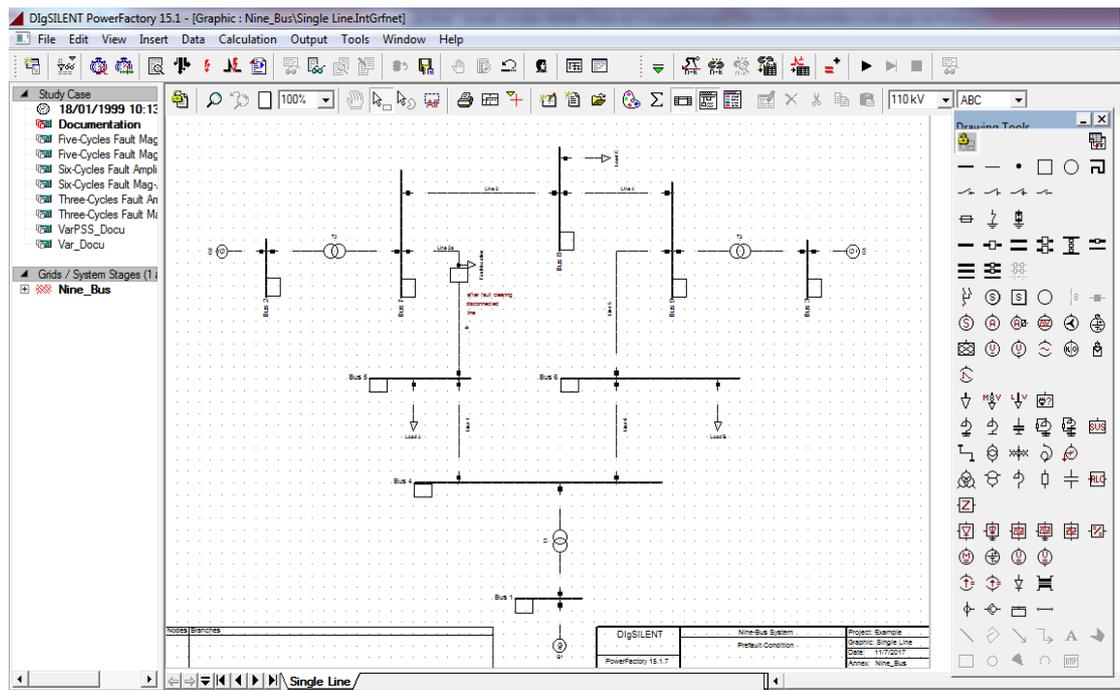
Fonte: Autoria própria (2017).

5. PROGRAMA DIGSILENT POWERFACTORY®

O programa DIgSILENT PowerFactory® desenvolvido pela empresa DIgSILENT (Digital SIMulation and Electrical NeTwork), é uma ferramenta de engenharia auxiliada por computador para a análise de sistemas de energia elétrica industriais de transmissão e distribuição. Foi projetado como um pacote de *software* avançado, integrado e interativo, dedicado ao sistema de energia elétrica e análise de controle, a fim de alcançar os objetivos principais de planejamento e otimização da operação. Também foi o primeiro software de análise de sistema de potência com uma interface gráfica unifilar integrada que inclui funções de desenhos, recursos de edição e relevantes características do cálculo estático, e dinâmico dos sistemas de energia. Os recursos disponibilizados pelo programa destacam-se análise de fluxos de potência; análise de curto-circuito; análise de harmônicos; fluxo de potência ótimo.

A figura 5.1 mostra a interface do programa, onde se observa a esquerda o espaço destinado a construir o diagrama do sistema elétrico e, a direita, todos os componentes elétricos disponíveis no programa.

Figura 5.1: Interface gráfica do programa *DIgSILENT PowerFactory*®



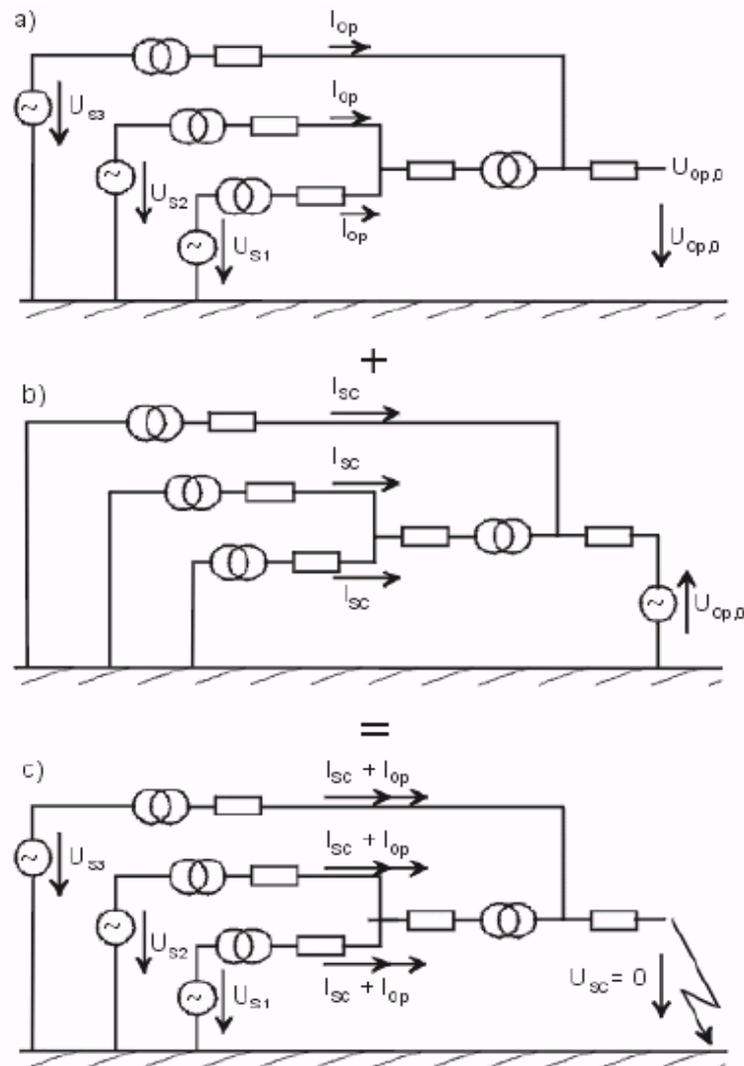
Fonte: *print screen* interface do programa DIgSILENT PowerFactory® (2017).

5.1. Método Completo

O método utilizado nesse trabalho foi o método completo, também conhecido como método da superposição, baseia-se em um ponto de operação específico da rede. O método de superposição calcula as correntes de curto-circuito esperadas na rede com base na condição de operação da rede existente. Se os modelos do sistema estiverem corretos, os resultados desse método são sempre mais exatos do que os resultados do método de aproximação.

Nas figuras 5.2 a), b) e c) são demonstrados o princípio do método da superposição, ilustrando a soma da condição pré-falta com a condição de falta obtendo assim o valor total.

Figura 5.2: Ilustração do método completo.



Fonte: Manual, DIGSILENT (2011).

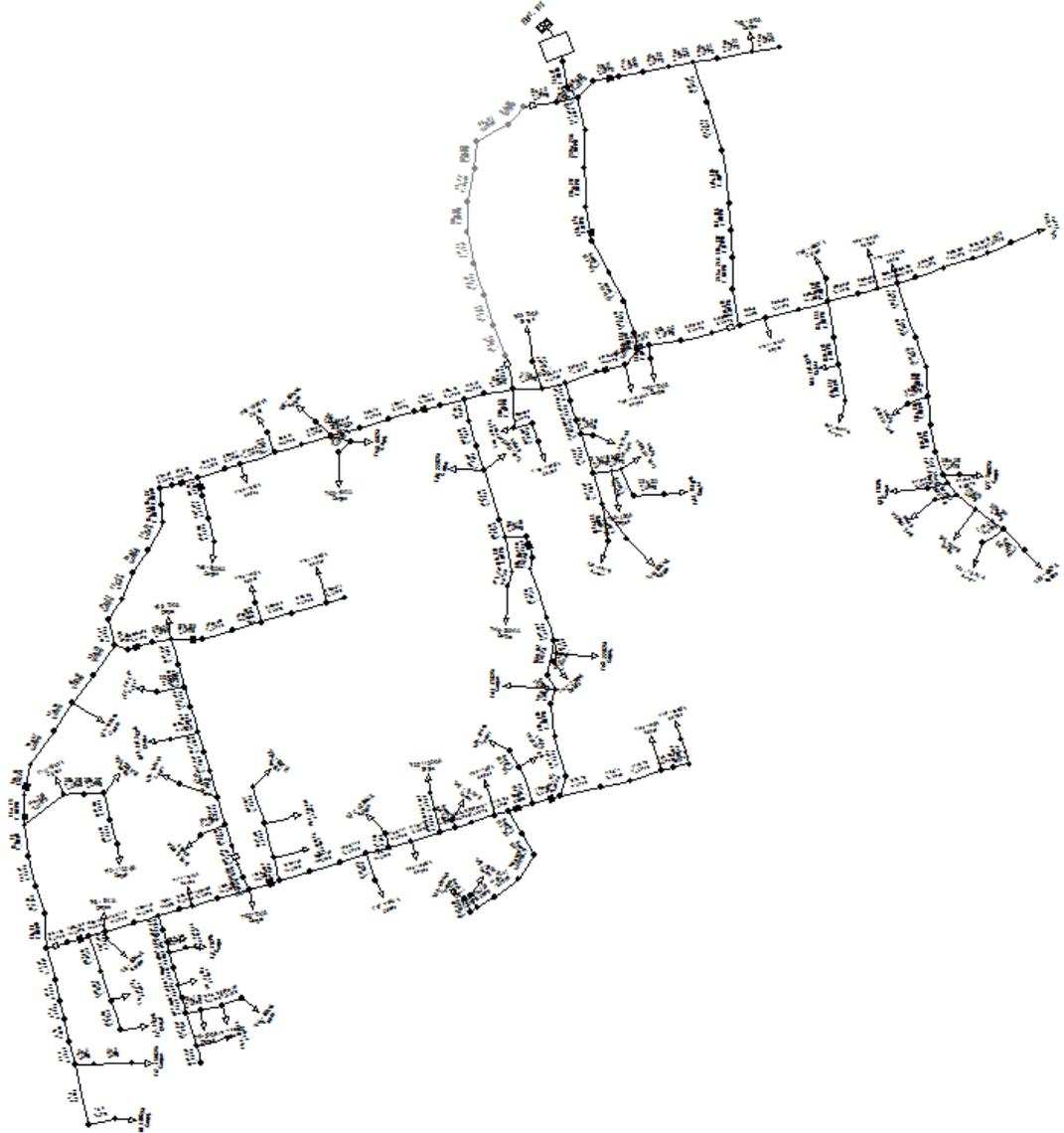
5.2. Implementação da rede

É importante ressaltar que este trabalho não pretende descrever detalhadamente todas as funções e componentes do programa DIgSILENT PowerFactory®, entretanto para um bom entendimento da implementação é interessante o conhecimento dos componentes utilizados. Na implementação da rede, para esse estudo de caso, foram usados cinco componentes disponíveis na barra de ferramentas do programa. São eles:

- *External grid*: Representa o barramento infinito. Correspondente à ligação do Campus I com a rede da concessionária local. Essa barra serve de referência angular para as outras barras do sistema. Sendo a referência colocada em 0° e a magnitude de tensão em 1 p.u.
- *Junction/internal node*: A rede da UFPB é constituída de 253 postes, para representá-los utilizou-se o elemento *Junction/internal node*.
- *Line*: É o elemento do software que representa as linhas de distribuição. Para sua implementação, foram criadas bibliotecas que especificam os parâmetros de resistência dos condutores, assim como, o correto espaçamento das fases entre si e a sua distância para o solo.
- *General Load*: Os transformadores da rede foram representados por cargas de acordo com o seu consumo. Conforme tabela 4.3, o valor do consumo está relacionado à potência nominal do transformador e ao consumo total da universidade.
- *Switch*: É o elemento que representa as chaves a óleo e chaves faca na rede de distribuição da UFPB.

Na figura 5.3 é mostrada a rede de distribuição do Campus I implementada.

Figura 5.3: Rede de distribuição Campus I implementada no *DIgSILENT PowerFactory*®



Fonte: *print screen* interface do programa *DIgSILENT PowerFactory*® (2017).

6. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do estudo de faltas para o sistema elétrico em questão. O objetivo deste capítulo é definir as correntes de falta na entrada de fornecimento de energia e em todas as 19 chaves seccionadoras espalhadas pelo Campus I. Para tanto, foram simulados os curtos-circuitos trifásicos e monofásicos desprezando a impedância de falta em todos eles.

Ressalta-se que o programa DIgSILENT PowerFactory® considera que as faltas monofásicas ocorrem na fase A. Para melhor entendimento, as chaves foram numeradas. Na figura 6.1 é ilustrada a numeração assumida.

Figura 6.1: Chaves seccionadoras numeradas de 1 a 19.



Fonte: Autoria própria (2017).

Nas tabelas 6.1 e 6.2 são mostrados os resultados das magnitudes (em RMS) das correntes de falta iniciais simétricas (I_k) para os curtos-circuitos trifásicos e para os monofásicos, respectivamente, utilizando o método completo.

Tabela 6.1: Resultados para curto-circuito trifásico franco.

Chave	I_k (kA)
1	139,434
2	76,302
3	31,213
4	41,418
5	137,104
6	30,674
7	27,442
8	21,941
9	15,589
10	14,295
11	10,324
12	10,253
13	8,424
14	9,872
15	11,907
16	14,5
17	13,486
18	18,862
19	18,817

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 6.2: Resultados para curto-circuito monofásico franco.

Chave	Ik - Fase A (kA)
1	81,916
2	41,614
3	17,547
4	21,835
5	80,305
6	16,223
7	14,288
8	11,37
9	8,077
10	7,535
11	5,754
12	5,677
13	4,831
14	5,499
15	6,43
16	7,542
17	7,116
18	9,754
19	9,771

Fonte: Autoria própria (2017).

Os resultados com os valores de Ik para a entrada de fornecimento de energia elétrica são dados na tabela 6.3.

Tabela 6.3 Resultados para curtos-circuitos na entrada.

Entrada de fornecimento de energia elétrica	
Trifásico	Ik = 285,704 kA
Monofásico	Ik = 218,076 kA

Fonte: Autoria própria (2017).

Observou-se que as chaves 1, 2 e 5 localizadas a jusante da entrada obtiveram as maiores correntes de falta trifásica chegando a valores eficazes de 139,434 kA, enquanto as correntes nas chaves 11, 12 e 13, mais distante da entrada de fornecimento de energia, apresentaram valores em torno de 5 kA, conforme esperado, tendo em vista o *layout* da rede. Os valores das correntes de curto-circuito encontrados no ponto de entrega da concessionária chegaram a 285,704 kA para as faltas trifásicas e 218,076 kA para as faltas monofásicas, todas do tipo franco.

As correntes de curto-circuito trifásico são importantes para os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente, capacidade de interrupção dos disjuntores, capacidade térmica dos cabos e capacidade dinâmica dos barramentos e equipamentos, entre outros. As correntes de curto-circuito monofásico são importantes nos ajustes dos valores mínimos dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, para o limite das tensões de passo e contato, entre outros.

7. CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizada uma análise das correntes de falta na rede primária de distribuição do Campus I. A rede estudada foi implementada no programa DIgSILENT PowerFactory® , para isso, foram levantados diversos parâmetros tais como: localização das cargas e potência dos transformadores. Além disso, obteve-se por meio de medição o consumo na entrada do fornecimento de energia elétrica. Nas simulações efetuadas foram obtidas as correntes iniciais simétricas de curto-circuito trifásico e monofásico franco, importantes para o correto dimensionamento do sistema de proteção e dos elementos que compõem o sistema de distribuição.

Destaca-se a importância desses resultados para o departamento de elétrica da prefeitura universitária, assim, pode-se obter o correto dimensionamento dos dispositivos de proteção e manobra na rede primária de distribuição, tendo em vista as mudanças da rede que não pode colocar em risco a integridade dos equipamentos, funcionamento do sistema e segurança das pessoas.

O trabalho realizado proporcionou aprofundamento em conhecimentos importantes na área de sistemas elétricos de potência. Muito ainda deve ser feito para completar este estudo. No item seguinte, há algumas sugestões para elaboração de trabalhos futuros, a partir das simulações efetuadas das correntes de curto-circuito.

7.1. Trabalhos futuros

Para aperfeiçoar o trabalho proposto, tornando-o mais completo, apresenta-se duas sugestões:

- Dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção no cubículo de medição.
- Dimensionamento das chaves seccionadoras da rede primária de distribuição do Campus I.

8. REFERÊNCIAS

D, D. G. **User's Manual**: DlgSILENT GmbH. Alemanha, 2011.

HIPERMAKRO. Disponível em:
<<http://www.hipermakro.com.br/produto.php?cat=150&id=217&idprod=2837>>. Acesso em
02 de novembro de 2017.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. Porto Alegre: Sagra: DC Luzzatto, 1992.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

ROBBA, E. J. **Introdução a sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Edgard Blucher, 1996.

STEVENSSON, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

ZANETTA, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

APÊNDICE

Na figura 0.1 é ilustrado o diagrama unifilar da rede primária de distribuição do Campus I da UFPB, e na figura 0.2 é ilustrada a numeração adotada nas chaves seccionadoras da rede.

Figura 0.1: Rede de distribuição Campus I implementada no *DIgSILENT PowerFactory*®

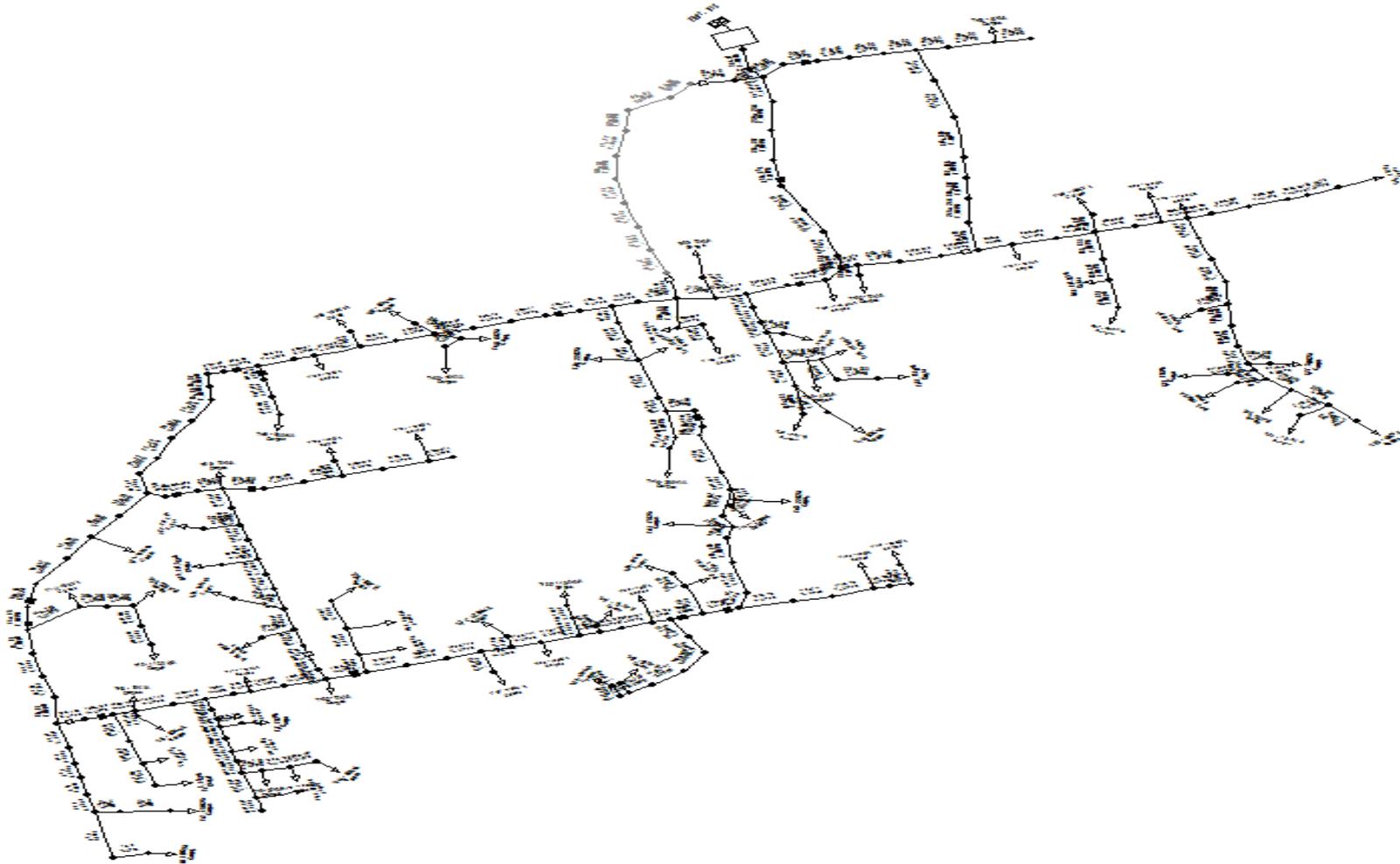


Figura 0.2: Chaves seccionadoras numeradas de 1 a 19.

