

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

**Avaliação da presença de curtos-circuitos
na rede elétrica usando o software
OpenDSS**

Autor: Lorrane Stephanie da Silva Biângulo
Orientador: Prof.(Dr.)Jorge Andrés Cormane Angarita

Brasília, DF
2017



Lorrane Stephanie da Silva Biângulo

Avaliação da presença de curtos-circuitos na rede elétrica usando o software OpenDSS

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof.(Dr.) Jorge Andrés Cormane Angarita

Brasília, DF

2017

Lorrane StephaniedaSilvaBiângulo

Avaliação da presença de curtos-circuitos na rede elétrica usando o software OpenDSS

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia, da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

**Prof.(Dr.)Jorge Andrés Cormane
Angarita**
Orientador

Prof.(Dr.) Alex Reis
Convidado 1

Prof.(Dr.) Rudi Henri Van Els
Convidado 2

Brasília, DF
2016

Resumo

O crescente consumo de energia elétrica e cargas sensíveis conectadas à rede de distribuição contribuem para o aumento da preocupação com a qualidade da energia elétrica fornecida aos usuários. A variação de tensão é um dos problemas mais comuns relacionados à qualidade e pode afetar seriamente os consumidores, principalmente os industriais, causando prejuízos técnicos e financeiros. Considerando a relevância destes efeitos, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar os impactos de curtos-circuitos em um sistema de distribuição. Para isto, foi utilizado o software OpenDSS, que além de outras funcionalidades, possibilita o estudo de faltas. Com o objetivo de avaliar os impactos destes fenômenos nos níveis de tensão do sistema, foram realizadas simulações, utilizando o modo Snapshot, aplicando uma falta nas barras dos transformadores do sistema em estudo. Como resultado destas simulações, o software apresenta um relatório com os níveis de tensão para todo o sistema, possibilitando o mapeamento da rede e a identificação dos pontos mais críticos.

Palavras-chaves: Sistemas de distribuição, curto circuito, níveis de tensão, OpenDSS.

Abstract

The increasing consumption of electrical energy and sensitive loads connected to the distribution network contribute to increase the concern with the quality of the electricity supplied to the users. Voltage variation is one of the most common quality problems and can seriously affect consumers, especially industrial consumers, causing technical and financial losses. Considering the relevance of these effects, the purpose of this final paper is to analyze the impacts of short circuits in a distribution system. For this, the software OpenDSS was used, besides other functionalities, this makes possible the study of faults. In order to evaluate the impact of these phenomena on the system voltage levels, simulations were performed using Snapshot mode, applying one fault at each system bus under study. As a result of these simulations, the software presents a report with voltage levels for the entire system, allowing the mapping of the network and the identification of the most critical points.

Key-words: Distribution systems, short circuit, voltage levels, OpenDSS.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento de cargas não lineares no Brasil	15
Figura 2 – Influência da conexão do transformador nos fasores de tensão.....	18
Figura 3 – Representação da rede elétrica.....	22
Figura 4 – Modelo para falta fase-fase.....	23
Figura 5 – Objeto de falta trifásico	24
Figura 6 – Objeto de falta fase-terra.....	25
Figura 7 – Objeto de falta fase-fase	25
Figura 8 – Objeto de falta fase-fase-terra	26
Figura 9 – Objeto de falta trifásica	26
Figura 10 – Diagrama Unifilar do sistema de distribuição	28
Figura 11 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 1, fase 1.....	30
Figura 12 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 2, fase 1.....	31
Figura 13 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 3	31
Figura 14 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 4.....	32
Figura 15 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 6	33
Figura 16 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 11	34
Figura 17 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 16	35
Figura 18 – Magnitudes das tensões durante falta fase-terra na barra 17	36

Lista de abreviaturas e siglas

QEE Qualidade de Energia Elétrica

OpenDSS Open Distribution System Simulation

VTCD Variação de tensão de curta duração

ONS Operador Nacional do Sistema

PLC Controladores lógicos programáveis

ASD Acionamentos de velocidades variável

Sumário

I	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	14
.		
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Qualidade de Energia	15
.		16
2.2	Variação de tensão de curta duração (VTCD)	16
2.2.1	VTCD devido à curto circuito	18
.		19
2.2.2	Efeitos de VTCDs	
.		
2.3	Curto Circuito	
..		
3	METODOLOGIA	21
3.1	Materiais	21
3.1.1	Estudo de faltas no OpenDSS	21
3.1.1.1	Modo Faultstudy	21
3.1.1.2	Modo Snapshot	24
3.1.1.3	Modo Monte Carlo	27
3.2	Métodos	28
3.2.1	Simulações preliminares	30
3.2.2	Avanços	37
	REFERÊNCIAS	39
4	ANEXOS	41
4.1	Anexo 1- Código utilizado no OpenDSS	41
4.2	Anexo 2- Parâmetros do sistema	43
4.3	Anexo 3- Resultados das tensões do sistema durante a falta	44

1 Introdução

A energia elétrica é um bem essencial para a sociedade moderna, proporciona bem-estar, segurança e conforto durante a execução das atividades cotidianas dos usuários. Com o avanço da tecnologia, novas cargas são incorporadas ao sistema elétrico, resultando no aumento do consumo e da dependência de um fornecimento contínuo e eficiente.

Deste modo, a preocupação com a qualidade da energia elétrica (QEE) que chega ao consumidor final aumenta na mesma proporção do consumo, devido ao incremento de cargas sensíveis a distúrbios na rede elétrica. Os problemas relacionados à qualidade de energia podem ocasionar grandes prejuízos, principalmente para consumidores industriais, seja pela interrupção dos processos produtivos, ou por danos em equipamentos.

Dentre os problemas de qualidade de energia elétrica, os mais comuns são as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). Estes fenômenos consistem na redução ou aumento temporário da tensão e podem ocorrer devido à partida de motores, sobrecargas e principalmente curtos-circuitos.

Diante deste cenário, é necessário a realização de estudos a fim de identificar os pontos mais críticos e tomar as devidas providências de modo a garantir o bom funcionamento do sistema de distribuição. Um meio eficiente de viabilizar estas análises é a utilização de softwares de simulação.

Um dos softwares muito utilizados em estudos de QEE para sistemas de distribuição é o Open Distribution System Simulation (OpenDSS). Este pode ser empregado para estudo de harmônicos, aplicação de sistemas de geração distribuída, fontes renováveis e armazenadores. Este é também uma eficiente ferramenta para o estudo de curtos-circuitos na rede elétrica.

Dentre os modos de estudo de curtos-circuitos disponíveis, o Snapshot possibilita a aplicação de falta em qualquer ponto da rede, tendo como um dos resultados as magnitudes das tensões em todo o sistema. Deste modo, é possível analisar sistemas de distribuição e agir de modo a diminuir os efeitos da propagação das faltas na variação da tensão e minimizar prejuízos aos consumidores finais e distribuidoras de energia elétrica.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento de um sistema de distribuição na presença de falta devido a curtos-circuitos usando o software OpenDSS.

1.2 Objetivos Específicos

- Automatizar as simulações do OpenDSS através do Matlab;
- Realizar simulações de faltas fase-terra, nas três fases das barras dos transformadores do sistema real;
- Analisar os níveis de tensão nas barras do sistema a ser estudado, durante a ocorrência das faltas.
- Avaliar a propagação dos efeitos dos curtos-circuitos simulados nos níveis de tensão das barras de todo o sistema.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Qualidade de Energia

Qualidade de energia pode ser definida como ausência de variações de tensão, sobretensões, deformações causadas por harmônicas e interrupções. (CABRAL,2010) Devido à falta de critérios específicos para a definição de qualidade de energia, o que se faz na prática é fazer um estudo do sistema elétrico e comparar com parâmetros de um sistema ideal. A partir desta referência, é possível obter uma escala e quantificar os desvios apresentados. (DECKMANN,)

A preocupação com qualidade de energia tem se tornado cada vez mais expressiva devido ao aumento de cargas não lineares, que injetam correntes distorcidas na rede, causando problemas de QEE. Por outro lado, estas mesmas cargas são sensíveis a estes distúrbios, podendo ser afetadas e sofrer danos. A figura 1 indica o aumento de cargas não lineares no Brasil, desde a década de 60, onde o número de cargas eletrônicas era muito pequeno, até o ano de 2005, representando mais da metade da potência instalada. (AMASIFEN,2008).

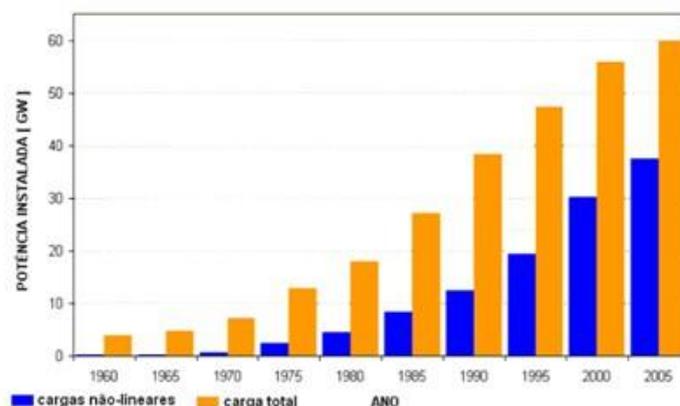


Figura 1: Crescimento de cargas não lineares no Brasil (RAVAGNANI,2008)

Na literatura, existem métodos para avaliar áreas vulneráveis, principalmente no nível de distribuição. Para isto, realizam-se medições em vários pontos, com o objetivo de gerar índices para ser analisados posteriormente. Estes métodos mostram-se eficazes, porém, requerem altos investimentos para a compra de equipamentos de medição e necessitam de longos períodos para se obter resultados conclusivos. Para resolver este problema, é possível utilizar métodos de simulação computacional, diminuindo assim os custos e o tempo de estudo e possibilitando antecipar problemas ocasionados por intempéries.

Entre os problemas relacionados à QEE, os mais difíceis de serem resolvidos são os resultados de fenômenos transitórios, entre estes, as variações de tensão de curta duração (VTCDs). Segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), “as variações de tensão de curta duração constituem-se em um dos principais fenômenos a serem tratados no âmbito da QEE, tendo em vista prejuízos que podem causar aos agentes consumidores, sendo um assunto que vem ganhando importância em função do crescente número de cargas sensíveis a este efeito”.(ONS, 2012)

2.2 Variação de tensão de curta duração (VTCD)

Variação de tensão de curta duração (VTCD) pode ser entendida como a variação no valor da tensão, que ocorre entre 8,33 ms (meio ciclo de um sinal com frequência de 60 Hz) e um minuto. Esta variação no valor eficaz da tensão ocorre principalmente devido a manobras de grandes cargas na rede, geralmente partida de grandes motores, sobrecargas e a ocorrência de faltas. As variações na amplitude da forma de onda e podem atuar nos dispositivos de proteção, gerando desligamentos, ou ainda afetar o funcionamento de equipamentos, gerando prejuízos aos consumidores de energia elétrica. (SANTOS; SILVA, 2003)

As Variações de tensão de curta duração (VTCDs) podem resultar em sérios problemas para os consumidores conectados à rede de distribuição. Dependendo das características do sistema, como local, topologia da rede, equipamentos e ligação dos transformadores, os sistemas trifásicos podem apresentar elevação ou afundamento de tensão em fases diferentes durante uma perturbação.(AMASIFEN,2008)

Para melhorar a qualidade da energia torna-se necessário desenvolver e utilizar ferramentas para avaliar as áreas mais críticas e nível de exposição dos consumidores, estimar VTCDs, bem como descobrir a localização e causa de faltas. Estas análises devem ser incorporadas nas atividades de operação, manutenção e planejamento de expansão do sistema. Definir as causas dos problemas do sistema também é muito importante para estabelecer responsabilidades, entre os agentes geradores, transmissores, distribuidores e consumidores de energia elétrica. (AMASIFEN,2008)

2.2.1 VTCD devido à curto circuito

A maioria das variações de tensão de curta duração ocorrem devido à Curtos-Circuitos, sendo estes fenômenos praticamente inevitáveis, as correntes de falta que circulam nas impedâncias do sistema resultam em quedas de tensão na rede. A duração da VTCD depende do tempo natural de extinção de faltas (quando ocorrem em períodos muito curtos, não sensibilizando os equipamentos de proteção) e do tempo de atuação do relé, juntamente com a abertura do disjuntor. Já a proporção destas

variações depende das

características da rede e das impedâncias, no ponto de falta e nos ramais. (AMASIFEN, 2008)

O tipo de curto circuito ocorrido na rede define as características que causam as VTCDs. As faltas podem ser equilibradas, trifásicas, ou desequilibradas, compreendendo os curtos-circuitos fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Além do tipo de falta, outros fatores influenciam as VTCDs, entre eles, a impedância da falta, tensão pré-falta, desempenho do sistema de proteção e conexão dos transformadores (FARQUI,2005)

O fator mais determinante para a magnitude da VTCD é o tipo de falta. Em ordem crescente, os tipos de curto circuito que causam afundamentos de tensão mais significantes: fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase, trifásico-terra e trifásico. Apesar de o último causar as piores condições de VTCD, representa apenas 5% das ocorrências. O tipo de falta mais frequente é o fase-terra, representando até 70% do total. (SANTOS; SILVA,2003)

Para a impedância de falta, considera-se a resistência de terra, de arco ou de contato entre os condutores. A impedância de falta é dificilmente igual a zero, neste caso, resultaria em efeitos mais severos. O arco elétrico ocorre devido ao aquecimento do ar ao redor da falta, decorrente da dissipação de correntes altas, que ionizam o ar.

Para o estudo de faltas é comum considerar a tensão de pré falta como 1 pu, o que gera um erro geralmente aceitável, porém, o resultado apresenta valores diferentes do valor real para estudos de VTCD. Em condições normais de operação a tensão de pré-falta costuma estar entre 0,95 e 1,05 pu. A magnitude de defasagem das barras são obtidas de acordo com a conexão dos transformadores. (AMASIFEN,2008)

O tempo de duração da VTCD depende do tempo de atuação do sistema de proteção, estes mecanismos são responsáveis por isolar equipamentos operando em condições críticas, como curtos-circuitos e sobrecargas. No sistema de distribuição, utiliza-se muito fusíveis e relés de sobrecorrente. A tensão é retomada rapidamente nos alimentadores principais, causando VTCDs consecutivas. (AMASIFEN,2008)

Fatores externos também influenciam na ocorrência de faltas no sistema. Pode-se citar a poluição, que deposita-se nos isoladores, diminuindo a isolação e aumentando a incidência de faltas fase-terra. Outros fatores, presentes principalmente em sistemas de distribuição contribuem para faltas no sistema, como vandalismo, queimadas, queda de árvores e acidentes rodoviários.

A ligação dos transformadores pode influenciar na VTCD, tanto na magnitude quanto no ângulo, principalmente quando este está localizado entre a barra de análise e o ponto de falta. Os diferentes tipos de conexão resultam em consequências diversas para a propagação da VTCD. Como por exemplo, na ligação delta estrela aterrado (D-Yt), como mostrado na figura 2, nos fasores de tensão das barras conectadas do lado do estrela aterrado há uma defasagem de 30° . (AMASIFEN,2008)

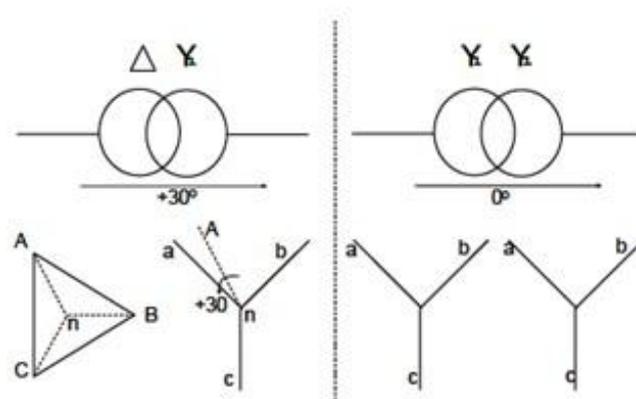


Figura 2: Influência da conexão do transformador nos fasores de tensão (AMASIFEN, 2008)

2.2.2 Efeitos de VTCDs

Descrever a sensibilidade e o efeito de variações de tensão em aparelhos eletro- eletrônicos é uma tarefa difícil, uma vez que estes comportam-se de maneira diferente. Porém, com o aumento da utilização de equipamentos eletrônicos no controle de processos, tornou-se fundamental o controle e limitação destas variações na tensão da rede.

Dentre os equipamentos sensíveis a estas variações pode-se citar controladores lógicos programáveis (PLC) e acionamentos de velocidades variável (ASD). Estes distúrbios na rede elétrica também podem causar prejuízos na execução de softwares (AMASIFEN, 2008). Para computadores, a queda de tensão pode causar sérios problemas, como panes e congelamento de sistemas, ocasionando arquivos corrompidos, perdas de dados ou danos em partes do hardware. (IBDA,)

Outros efeitos que podem ser causados pelas variações de tensão são a perda de sincronismo de máquinas síncronas, variação da velocidade de motores e atuação indevida de contadores de relés auxiliares. (AMASIFEN,2008)

2.3 Curto Circuito

O curto circuito é um fenômeno que ocorre quando há uma queda brusca no valor da impedância de um ponto do sistema, ocasionando sérios problemas na rede elétrica. A intensidade deste fenômeno depende de alguns fatores, como impedância e tipo de falta, topologia da rede, conexão de transformadores, entre outros. O curto circuito pode ser metálico, quando há curto-circuito direto ou por arco elétrico; ou causado por uma situação intermediária, quando é causado por galhos de árvores e outros objetos que caem nas linhas. (SCHNEIDER,)

As correntes de curto circuito atingem altos valores em um curto espaço de tempo, geralmente alcançando valores acima de 10 vezes a corrente nominal do sistema. Esta elevação súbita da corrente pode ocasionar acidentes, como para o caso de curto circuito através de arco elétrico, podendo ocorrer explosões e incêndios. (SCHNEIDER,)

Os principais objetivos do estudo de Curtos-Circuitos é obter correntes e tensões durante um defeito em um ponto do sistema elétrico. Os resultados destes estudos são importantes para dimensionar os equipamentos de proteção do sistema, para a segurança de pessoas e análises de sobretensões. (KAGAN,2005)

O estudo de curto circuito baseia-se na análise de um transitório eletromagnético. Na prática, este é realizado de uma forma simplificada. No começo do curto circuito há uma componente transitória (componente de corrente contínua), que decresce com o tempo, até que o sistema apresente apenas a componente de regime permanente.

3 Metodologia

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar os materiais e métodos utilizados no presente estudo, apresentando os seguintes pontos:

- Apresentação das características do funcionamento de estudos de faltas no OpenDSS, dividido em três modos :Fault Study, Snapshot e Monte Carlo.
- Apresentação do sistema de distribuição a ser analisado.
- Passos seguida para as simulações das faltas fase-terra nas barras.

3.1 Materiais

Para o presente estudo, utilizou-se o software OpenDSS, que conta com várias funções para a simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica, entre estes, o estudo defaltas.

3.1.1 Estudo de faltas no OpenDSS

O OpenDss constrói uma admitância nodal para descrever o sistema. Os cálculos de corrente de falta são executados de duas maneiras: simulando uma falta específica, determinada pela localização e definição de um ou mais objetos de falta no alimentador, ou através de um modo de solução genérico de falta.

Para o estudo de faltas existem três modos: Faultstudy, Monte Carlo e Snapshot. O modo Faultstudy é um estudo convencional que pode ser realizado através do comando “Set mode = Faultstudy”, para todas as barras do sistema, retornando o parâmetro X/R, tensões e correntes para todos os tipos de falta. Este modo é utilizado principalmente para parametrizar relés de proteção. Para o estudo do comportamento da tensão em geradores distribuídos, devido à várias faltas no sistema é utilizado o modo “Monte Carlo”.

3.1.1.1 Modo Faultstudy

Através deste modo, o programa realiza o estudo completo de faltas e determina o equivalente de Thevenin para cada barra do circuito. Além disso, prepara todos os dados necessários para fazer o relatório de estudo de faltas quando o comando Show Fault é solicitado pelo usuário.

O modo Faultstudy funciona de acordo com os seguintes passos:

- A matriz de admitâncias é construída, considerando todas as cargas;
- Os geradores são convertidos para o modo dinâmico (ou equivalente de Thevenin);
- Todos os objetos de falta são desabilitados;
- Realiza-se a solução das equações da matriz de admitâncias, incluindo a injeção de fontes e geradores, o resultado da tensão de curto circuito é armazenado;
- Calcula-se a solução da matriz de impedância de curto circuito de Thevenin para cada barra e o também o inverso do resultado. Os dois resultados passam a fazer parte do objeto de barra;
- As correntes de curto circuito para as diversas condições de são calculadas para cada barra. Para a falta em todas as fases, a corrente é calculada no momento em que o comando Solve é emitido. Para os outros tipos de curto circuito, as correntes são calculadas depois do comando Show.

Para realizar as simulações de faltas, o OpenDSS converte as fontes de tensão em equivalente de Norton, e as admitâncias resultantes são adicionadas na matriz de admitância (Y), considerando que estas estão conectadas ao terra. A representação desta transformação esta na figura3. O programa resolve a equação3.1, para tensões para o terra. O vetor de I corresponde ao vetor injeção de correntes no sistema.

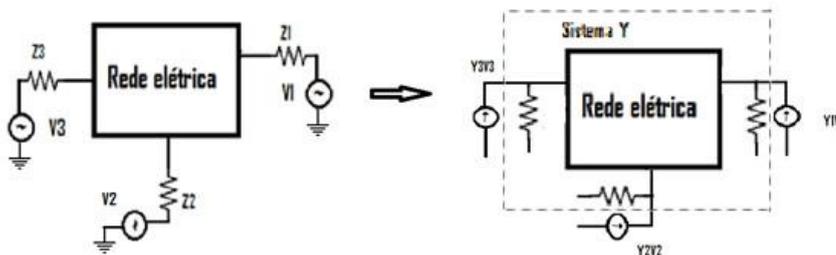


Figura 3: Representação da rede elétrica (DUGAN,2009)

$$\square = \square \square \quad (3.1)$$

O modo Fault Study é baseado no equivalente de Thevenin polifásico, para cada barra. Primeiramente calcula-se o vetor de tensão de curto-circuito em cada barra, depois, calcula-se a matriz de impedância de curto circuito para cada barra e o inverso (admitância), construindo assim a matriz Y . Todos estes dados são armazenados para a realização do cálculo do equivalente de Norton.

As correntes de curto circuito são calculadas, considerando falta em todas as fases para o terra. Para a falta fase terra, estas correntes são calculadas diretamente, uma vez que não há fluxo de corrente das outras fases para a barra. Outros dados importantes são as tensões nas fases que não fazem parte do curto circuito, estas também são calculadas e armazenadas. Se as tensões de base forem definidas, os valores são dados em pu.

Para a falta fase-fase, utiliza-se o equivalente de Norton em cada barra, ao invés do equivalente de Thevenin. Este método está representado na figura 4. A admitância de falta (Y_F) é conectada entre as fases que participam do curto. Esta é adicionada na matriz Y e o software resolve as equações lineares para as tensões. Apenas as tensões entre fases adjacentes são calculadas, ou seja, entre as fases A e B e B e C, não apresentado resultado entre as fases A e C, por exemplo.

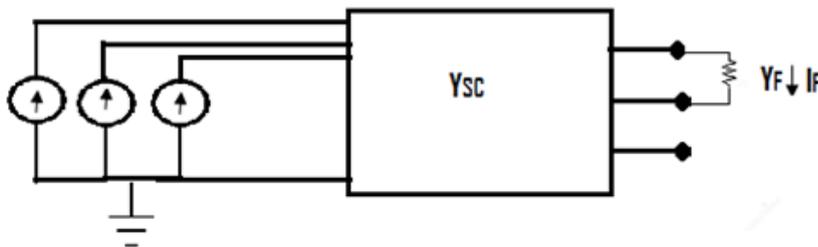


Figura 4: Modelo para falta fase-fase (DUGAN,2009)

```
Para a simulação do Fault Study, utiliza-se o código a
seguir: Set mode= faultstudy
//Para calcular as tensões em
pu: Calc voltag bases
Solve
Show fault
```

Os resultados no modo Fault Study são apresentados para Curtos-circuitos em cada barra, ou seja, as tensões e correntes do relatório apresentam os resultados das barras em curto, não mostrando os valores para as demais barras do sistema devido à falta em apenas uma das barras. Através do comando Show Fault, são apresentados os seguintes fatores como resultado:

- Fator X/R em todas as fases de cada barra do sistema;
- Tensões e corrente em cada fase de cada barra durante a ocorrência de falta fase terra;

- Tensões e corrente em cada fase de cada barra durante a ocorrência de falta fase-fase.

É possível também obter as tensões e ângulos em cada fase de cada barra e as componentes simétricas de cada barra para os curtos circuitos trifásico e fase-fase.

3.1.1.2 Modo Snapshot

No modo “Snapshot” é possível criar e analisar faltas, estas são consideradas como elementos do circuito e desta maneira, podem ser manipuladas. Para isto, o usuário deve informar o tipo de falta, em qual barra ocorre e o valor de resistência de falta.

O objeto de falta é um resistor polifásico de dois terminais, no caso mais simples é representado por um ramo com um resistor em cada fase especificada. O valor padrão, no caso de não ser representado, é de 0,1 m Ω , não sendo possível especificar uma falta de resistência zero. A figura 5 ilustra este tipo de objeto de falta.

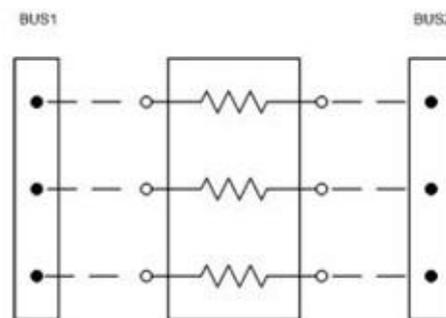


Figura 5: Objeto de falta (DUGAN,2009)

O objeto de falta também pode ser mais complexo, onde a rede resistiva é especificada como uma matriz de condutância nodal, representando qualquer rede resistiva entre os dois terminais.

Como o objeto de falta é simplesmente uma rede resistiva, não é utilizado apenas para representar uma resistência de curto-circuito, mas também para modelar uma resistência em série entre duas barras e ser modelado como uma carga resistiva.

Para a conexão dos objetos de falha, o processo é o mesmo de capacitores e reatores. O padrão do estudo é a falha fase-terra, ou seja, quando o usuário define as características da conexão do terminal 1, o segundo terminal é preenchido automaticamente no nó zero deste mesmo barramento. Para simular outros tipos de curto circuito, especifica-se a conexão do segundo terminal.

Para criar o objeto de falta, utiliza-se o comando New Fault, seguido do nome

da falta, depois, declara-se quantas fases estão envolvidas no curto-circuito e as conexões do primeiro terminal e do segundo, no caso de não ser com o terra.

O modo Snapshot apresenta os resultados de uma falta nas tensões de todo o sistema, possibilitando o estudo do impacto da falta no restante no sistema.

Falta Fase-terra

Este é o caso padrão, onde uma das fases é conectada ao terra. O exemplo a seguir é um caso de curto-circuito fase-terra, onde o terra é conectado ao nó 3. A figura 6 ilustra a falta fase terra. A seguir, o código para a implementação deste tipo de curto circuito.

New Fault.MySLGFault phases=1 Bus1=MyBus.3

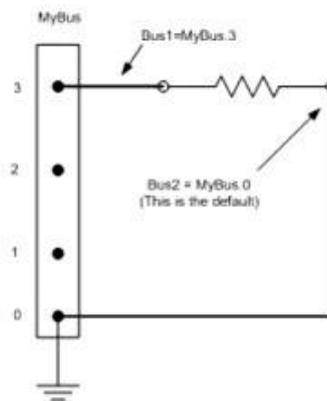


Figura 6: Objeto de falta fase-terra (DUGAN,2009)

Falta Fase-fase

Apesar de parecer lógico declarar uma falta bifásica para este caso, pois envolve duas fases, este é simplesmente um curto-circuito conectado entre duas fases da mesma barra. O exemplo a seguir representa uma falta entre as fases 2 e 3 (figura 7). A representação deste curto circuito é implementada no OpenDSS da seguinte maneira:

New Fault.MyLLFault phases=1 Bus1=MyBus.2 Bus2=MyBus.3

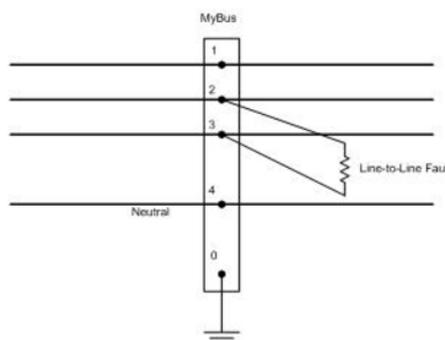


Figura 7: Objeto de falta fase-fase (DUGAN,2009)

Falta Fase-fase-terra

A maneira mais fácil de declarar o curto-circuito fase-fase-terra é declarar um objeto de falta como um elemento bifásico. Uma resistência com magnitude pequena é conectada entre cada fase e o terra. A figura 8 representa este tipo de falta. A seguir, a maneira como é implementado no software.

```
New Fault.MyLLGFault phases=2 Bus1=MyBus.2.3
```

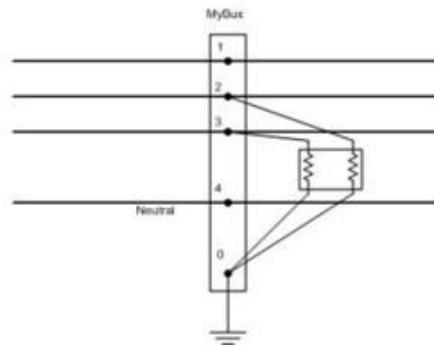


Figura 8: Objeto de falta fase-fase-terra

Falta trifásica

Para o curto-circuito trifásico, declara-se um objeto de falta como um elemento trifásico. Uma resistência com magnitude pequena é conectada entre cada fase e o terra. A figura 9 representa este tipo de falta. A seguir, o código para aplicar este curto circuito.

```
New Fault.MyLLGFault phases=3 Bus1=MyBus.1.2.3
```

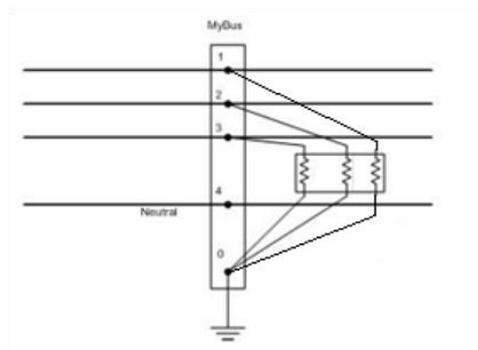


Figura 9: Objeto de falta trifásica (DUGAN,2009)

3.1.1.3 Modo Monte Carlo

O modo de falta Monte Carlo foi projetado para estudos do comportamento do sistema, através de faltas aplicadas aleatoriamente. Primeiramente, o usuário define um ou mais objetos de falta, na maioria dos casos, define-se muitas faltas para o sistema. Este modo é muito utilizado para analisar quais tensões são resultam de um local com Geração distribuída, com muitas faltas no sistema, calculando entre outros parâmetros, índices de afundamento de tensão.

Deste modo, o OpenDss seleciona uma falta de cada vez, desabilitando os outros tipos e resolve o circuito, utilizando um valor de resistência para o objeto de falta aleatório. Executa-se uma solução direta, ou seja, não iterativa, e as cargas são tratadas como impedâncias constantes.

O algoritmo interno realiza os seguintes passos:

- Realiza a solução sem faltas;
- Mudando para o modo Monte Carlo Fault Study, força os geradores a mudar para a tensão relacionada à reatância e reinicia os monitores;
- O modelo de carga é fixado para a admitância;
- O tempo é fixado em zero, pois a hora é utilizada como contador;
- Para um número específico de vezes:
- O algoritmo incrementa o contador de horas;
- Uma falta é escolhida aleatoriamente;
- A resistência da falta também é escolhida aleatoriamente;
- Calcula-se a solução direta da corrente como produto da admitância e tensão.
A matriz Y então é recalculada e obtem-se as injeções de todas as fontes e máquinas.

Um exemplo da aplicação do método de estudo de faltas Monte Carlo, com 500 faltas diferentes, é representado a seguir:

```
Compile circuitfile.txt  
  
// Para estabilizar a bases de soluções sem  
faltas: solve  
  
//Para definir as faltas: Redirect  
faultdefinitions.txt
```

```
Solve mode=MF number= 500
```

```
//Resultado
```

```
Show mon monitor1
```

3.2 Métodos

Estabeleceu-se um sistema a ser estudado e a partir deste, foram realizadas simulações de faltas nas barras do sistema, utilizando o software OpenDSS. A partir destes resultados, é possível analisar os níveis de tensão nas barras. figura10.

Para o estudo preliminar simulou-se o curto circuito fase-terra, por se tratar de um dos tipos de falta mais frequentes nos sistemas de distribuição. O modo de falta utilizado foi o Snapshot, por realizar uma falta por vez e apresentar no relatório de resultados as tensões em todas as barras do sistema, sendo possível analisar a propagação dos efeitos da falta nos níveis de tensão em todo o sistema.

Para o presente estudo de caso, o sistema utilizado para as simulações foi um alimentador real, que faz parte da área de concessão da distribuidora CEB, em Brasília.

3.2.2 Sistema elétrico CEB

A concessão da CEB-Distribuição abrange uma área de 5783 Km², compreendendo todo o Distrito Federal, dividida em 31 regiões administrativas. O sistema é suprido principalmente por Furnas Centrais Elétricas S. A., por meio das subestações Samambaia – 345/138 kV, Brasília Sul – 345/138 kV e Brasília Geral – 230/34,5 kV, com capacidade de 675 MVA, 900 MVA e 240 MVA, respectivamente. A CEB também recebe energia de Corumbá III e IV, com potência instalada de 93 MW e 127 MW.

O sistema apresenta tensões entre 15 e 138 kV e apresenta 34 subestações e 15 alimentadores em 138 kV, 5 em 69 kV e 14 em 34,5 kV, totalizando a capacidade de transformação de 2232 MVA. (CEB, 2017)

A alimentação de parte de Brasília é realizada por meio de sistema primário subterrâneo, em topologia de malhas. Porém, para a maioria dos locais utiliza-se a topologia radial. Neste caso, o circuito tem início na subestação e ramifica-se para alimentar a região. A cidade de Taguatinga apresenta esta tipologia, apresentando 12 alimentadores em tensão primária de distribuição (138 kV). Para o presente estudo, utilizou-se o alimentador TG01.

Alimentador TG011

O alimentador TG01 fornece energia elétrica para a região de Taguatinga Norte, atendendo parte da carga residencial e comercial, além de iluminação pública nos trechos de baixa tensão. O sistema utilizado para o presente estudo de caso foi modelado pela CEB, no software OpenDSS. A figura X apresenta o sistema de alimentação de Taguatinga, com destaque para o alimentador TG01.

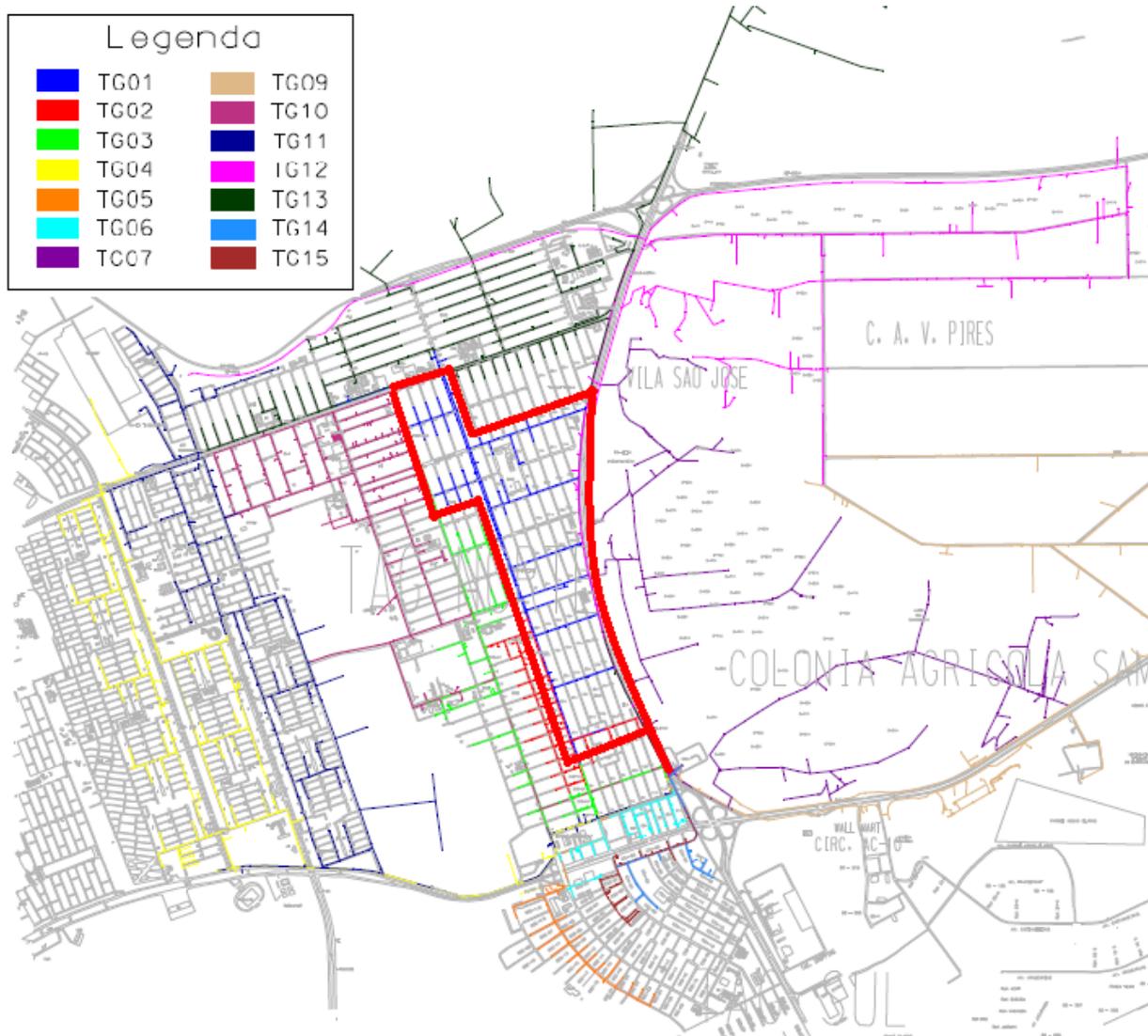


Figura X- Sistema de alimentação de Taguatinga

Com base nos dados fornecidos pela CEB, foi possível identificar que este alimentador atende 4 cargas em média tensão e 7941 cargas em baixa tensão, sendo destas:

- 5309 cargas residenciais.
- 1738 cargas comerciais.
- 7 cargas industriais.
- 887 cargas de iluminação pública.

O sistema simulado conta com 85 transformadores trifásicos (13,8 kV/380V), com dois enrolamentos, conectados em delta estrela aterrado, com potências variando entre 30 e 1000 kVA, sendo:

- 2 de 30 kVA;
- 2 de 45 kVA;
- 31 de 75 kVA;
- 30 de 112,5 kVA;
- 16 de 150 kVA;
- 2 de 225 kVA;
- 2 de 1000 kVA.

A localização das unidades consumidoras foi planejada, de modo que os transformadores alimentem somente um tipo de carga (residencial ou comercial). Os transformadores localizados na avenida comercial atendem cargas comerciais e os instalados no interior das quadras atendem exclusivamente cargas residenciais. (Shayani, 2010).

A figura y apresenta o percurso da rede de média tensão (13,8kV) do alimentador TG01, indicando a sua topologia radial e os transformadores de distribuição.



Legenda: — Alimentador 13,8 kV ● Transformador 13,8 kV/380 V Escala: 200m

Figura y- Percurso do alimentado TG01. Fonte: Shayani,2010

O sistema apresenta 8192 barras, sendo 453 em média tensão e 7739 em baixa tensão. Todas as barras em média tensão são trifásicas, já as barras em baixa tensão são compostas por barras monofásicas, bifásicas e trifásicas. A **tabela Z** apresenta as barras em baixa tensão. De acordo com as conexões.

Tabela Z: Fases conectadas das barras do sistema

Barras monofásicas			Barras Bifásicas			Barras trifásicas
Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fases 1 e 2	Fases 2 e 3	Fases 3 e 1	4339
686	183	710	87	1709	25	

Para as simulações das faltas, utilizou-se interface entre os softwares Matlab e OpenDSS. Através do Matlab foi possível automatizar as simulações.

O sistema simulado foi do alimentador TG01 para um dia útil do mês de janeiro. Para analisar a propagação no sistema, foram aplicadas faltas fase-terra nas barras dos oitenta e cinco transformadores, tanto do lado do primário quanto do secundário, para cada hora do dia, de acordo com a curva de carga. A figura U apresenta o diagrama do processo de simulações, onde as caixas alaranjadas são processos do Matlab e as caixas vermelhas são processos do OpenDSS.

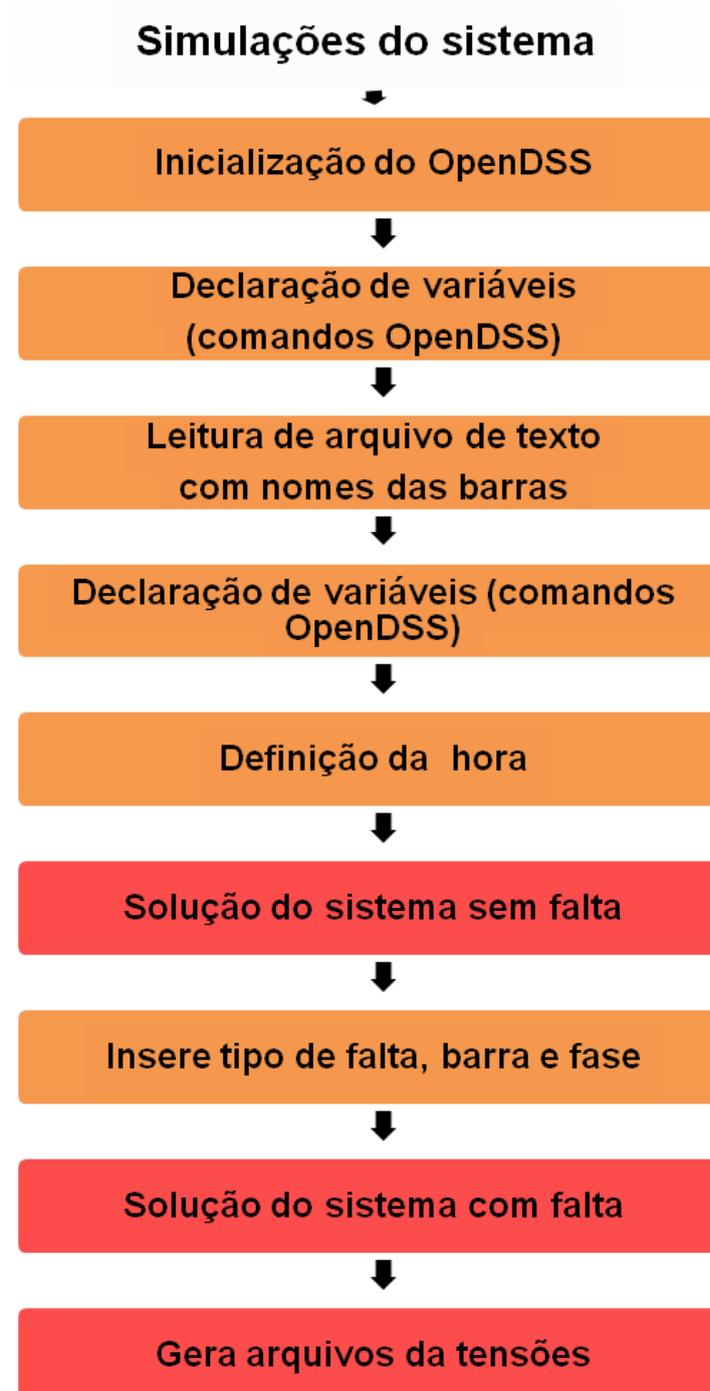


Figura U

As simulações resultaram em 85 arquivos .CSV para cada hora do dia, totalizando 2040 arquivos para falta em cada umas das fases. Estes, apresentam dados da tensão em todas as barras do sistema para as três fases (Base kV, magnitude, ângulo e tensão em pu).

Os arquivos .CSV foram salvos identificando o nome da barra que foi aplicada o curto, a hora e a fase, de modo a serem identificados pelo Matlab durante a organização dos dados das simulações.

Referências

AMASIFEN, J. C. C. *Metodologias para avaliação de riscos e dos custos de interrupções em processos causados por faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 4 vezes nas páginas15,16,17 e18.

CABRAL, R. J. Análise numérica de curto circuito utilizando componentes simétricas e componentes de fases para obter índices de afundamento de tensão. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Citado na página15.

DECKMANN, S. M. P. J. A. Avaliação da qualidade da energia elétrica. Unicamp, Campinas, São Paulo. Citado na página15.

DUGAN, R. Reference guide: The open distribution system simulator-openss. Electric Power Research Institute, 2009. Citado 5 vezes nas páginas22,23,24,25e26.

FARQUI, T. C. Afundamentos de tensão em indústrias de papel e celulose. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Citado na página17.

IBDA. Programa de formação técnica continuada: Os efeitos dos curtos-circuitos. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura (IBDA).

Disponível em:

<"<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=28&Cod=1858>">. Citado na página18.

KAGAN, N. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Editora Blucher, São Paulo, 2005. Citado na página19.

RAVAGNANI, L. L. Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008. Citado na página15.

SANTOS, R. F. S.; SILVA, S. R. Sensibilidade de controlador lógico programável frente a afundamentos de tensão. V Seminário brasileiro sobre qualidade de energia, Aracaju, SE, 2003. Citado 2 vezes nas páginas16e17.

SCHNEIDER. Programa de formação técnica continuada: Os efeitos dos curtos-circuitos. Disponível em:<"https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf">. Citado na página19.

4 Anexos